

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté : Technologie

Année :2020/2021

Département : Electronique

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} Cycle

Intitulée

**Modélisation et Commande d'un Système de
Conversion d'Energie Eolienne**

Option : Automatique

Par : OTMANE RACHEDI Meriem

Rapporteur : SAIDI Mohammed Larbi
Co-rapporteur : ARBAOUI Fayçal

Pr. Université de Annaba
Pr. Université de Annaba

DEVANT Le JURY

PRESIDENT : ABBASSI Hadj Ahmed
Examineur : LAFIFI Mohamed Mourad
Examineur : MOUSSAOUI Abdelkrim

Pr. Université de Annaba
M.C.A Université de Annaba
Pr. U – 08 mai 1945– GUELMA

النمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح

الملخص

تعتبر مصادر الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح الأكثر قبولاً من الناحية البيئية عند مقارنتها بمصادر الطاقة التقليدية القائمة على الوقود الأحفوري. تعتمد طاقة الرياح بشكل أساسي على الظروف الجغرافية والمناخية، لهذا السبب من الضروري بناء نظام قادر على توليد أقصى قدر من الطاقة تحت هذه القيود.

انطلاقاً من سرعة الرياح تنتج أنظمة توربينات الرياح الطاقة الكهربائية بعد تحويل سرعة الرياح إلى طاقة ميكانيكية بواسطة المولد. تستخدم العديد من توربينات الرياح المولد ألحثي ذو التغذية المزدوجة (DFIG) باستخدام الدوار الملفوف أو الدوار من نوع القفص.

يتسبب توصيل توربينات الرياح بالمولد عن طريق صندوق السرعة في حدوث مشكلات تتعلق بأنظمة الرياح متغيرة السرعة، في الوقت الحاضر يتم تفضيل المولد المتزامن ذو المغناطيس الدائم (PMSG) نظراً لكثافة الطاقة العالية وخفة الوزن والكفاءة العالية. غالباً ما يتم توصيل هذه الآلات مباشرة بالتوربين مما يلغي الحاجة إلى علبة السرعة. هذا يقلل التكلفة الإجمالية وموثوقية النظام.

حظيت أنظمة توربينات الرياح متغيرة السرعة VSWT باهتمام واسع النطاق بين أنظمة الطاقة المتجددة المختلفة. تركز هذه الأطروحة على جزء التحكم النسبي التكاملي ذو الترتيب الجزئي الضبابي (FFOPI) للتوربينات الرياح متغيرة السرعة التي تقود مباشرة (PMSG) الهدف الرئيسي من هذه الدراسة الوصول إلى أقصى تتبع لنقطة الطاقة القصوى (MPPT) من خلال مجموعة من التحكم المتقدم FFOPI المستند إلى التحكم المطبق على المحول الجانبي للمولد. الفكرة الأساسية لوحدة التحكم هي تنفيذ وحدة تحكم المنطق الضبابي (FLC) في تسلسل مع وحدة تحكم التكامل النسبي الجزئي (FOPI). يتم إجراء دراسة مقارنة مع أنظمة التحكم الكلاسيكية PI. لا يمكن لوحدة التحكم التقليدية تقديم أداء جيد بما يكفي لـ (VSWT) ومع ذلك وجدت النتائج أن النموذج المقترح (FFOPI) أكثر فعالية وجدوى للتحكم في المولد المتزامن للمغناطيس الدائم للحفاظ على أقصى استخلاص للطاقة.

الكلمات المفتاحية:

التحكم النسبي التكامل ذو الترتيب الجزئي، وحدة التحكم المنطق الضبابي، MPPT، PMSG، توربينات الرياح.

Modeling and control of a wind energy conversion system

ABSTRACT

An alternative energy source such as wind energy is more environmentally acceptable when compared to the traditional fossil fuels-based energy sources. Wind power depends mainly on geographic and climate conditions. For that reason, it is required to build a system able to generate maximum power under these constraints.

From the wind speed, wind turbine systems produce the electrical energy after converting wind speed to mechanical energy by the generator. Several wind turbines use the doubly fed induction generator (DFIG) using wound-rotor or cage type rotor. The connection of the wind turbine to the generator with the gearbox causes the problems related with variable-speed wind systems.

Nowadays, permanent magnet synchronous generators (PMSG's) are favored due to their, high-power density, lightweight, and high efficiency. Such machines are often directly connected to the turbine removing the need of a gearbox.

Variable speed wind turbine systems (VSWT's) have been in receipt of extensive attention among the various renewable energy systems. The thesis focuses on fuzzy fractional order proportional-integral (FFOPI) control segment for variable speed wind turbine (VSWT) directly driving (PMSG). The main objective of this study is to reach maximum power point tracking (MPPT) through combination of advanced control based on FFOPI control applied to generator side converter (turbine and PMSG). The basic idea of the FFOPI controller is to implement a fuzzy logic controller (FLC) in cascade with Fractional Order Proportional Integral controller (FOPI). A comparative study with FOPI and classical PI control schemes is made. The traditional PI controller cannot deliver a sufficiently great performance for the VSWT. However, the results found that the proposed approach (FFOPI) is more effective and feasible for controlling the permanent magnet synchronous generator to maintain maximum power extraction.

Keywords:

Fractional order proportional-integral, Fuzzy logic controller, MPPT, PMSG, Wind turbine

Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne

Résumé

Une source d'énergie alternative telle que l'énergie éolienne est plus acceptable sur le plan environnemental que les sources d'énergie traditionnelles basées sur les combustibles fossiles. L'énergie éolienne dépend principalement des conditions géographiques et climatiques. Pour cette raison, il est nécessaire de construire un système capable de générer une puissance maximale sous ces contraintes.

À partir de la vitesse du vent, les systèmes éoliens produisent de l'énergie électrique après avoir converti la vitesse du vent en énergie mécanique par le générateur. Plusieurs éoliennes utilisent le générateur à induction à double alimentation (DFIG) avec un rotor bobiné ou un rotor à cage. Le raccordement de l'éolienne au générateur avec la boîte de vitesses est à l'origine des problèmes liés aux systèmes éoliens à vitesse variable.

De nos jours, les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG's) sont préférés en raison de leurs densités de puissance élevée, de leurs légèretés et de leurs hauts rendements. Ces machines sont souvent directement connectées à la turbine, ce qui rend inutile l'utilisation d'une boîte de vitesses.

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable (VSWT) ont fait l'objet d'une attention particulière parmi les divers systèmes d'énergie renouvelable. Cette thèse se concentre sur le segment de contrôle de l'intégrale proportionnelle d'ordre fractionnaire flou (FFOPI) pour les éoliennes à vitesse variable (VSWT) à entraînement direct PMSG. L'objectif principal de cette étude est d'atteindre le suivi du point de puissance maximale (MPPT) grâce à la combinaison d'un contrôle avancé basé sur le contrôle FFOPI appliqué au convertisseur côté générateur (turbine et PMSG). L'idée de base du contrôleur FFOPI est d'implémenter un contrôleur à logique floue (FLC) en cascade avec un contrôleur intégré proportionnel d'ordre fractionnaire (FOPI). Une étude comparative avec les schémas de contrôle FOPI et PI classiques est réalisée.

Le contrôleur PI traditionnel ne peut pas offrir des performances suffisamment élevées pour les VSWT.

Cependant, les résultats ont montré que l'approche proposée (FFOPI) est plus efficace et faisable pour contrôler le générateur synchrone à aimant permanent afin de maintenir l'extraction de puissance maximale.

Mots clés :

Commande proportionnelle-intégrale d'ordre fractionnaire, contrôleur à logique floue, MPPT, PMSG, éolienne.

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au sein du laboratoire d'automatique et signaux Annaba (LASA), laboratoire de recherche au niveau du département d'électronique de l'université Badji-Mokhtar de Annaba.

La réalisation de cette thèse est le fruit d'un travail qui a impliqué plusieurs personnes que je tiens à remercier de tout cœur.

Je souhaite commencer par adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse Monsieur Mohammed Larbi SAIDI, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba. Je suis profondément reconnaissante envers lui pour sa confiance, son extrême patience, sa disponibilité très dévouée et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens pour mener à bien cette thèse. J'ai eu l'honneur de travailler sous sa direction.

J'exprime aussi ma reconnaissance et mes remerciements à Monsieur Fayçal ARBAOUI, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, pour avoir co-dirigé ce travail de thèse ainsi que pour ses conseils soulevés lors de nos discussions.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Professeur ABBASSI Hadj Ahmed, pour avoir accepté de présider et jury mon travail.

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à l'évaluation de ce travail :

Monsieur LAFIFI Mohamed Mourad Maitre de conférence classe A à l'université Badji Mokhtar Annaba

Et Monsieur MOUSSAOUI Abdelkrim Professeur à l'université 08 mai 1945 GUELMA

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à tous les membres du laboratoire LASA pour leur agréable compagnie durant mon parcours. Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance envers eux pour tous les très bons moments partagés ensemble.

Nul mot ne pourrait exprimer mon grand amour, ma plus profonde gratitude et mon immense respect à mes très chers parents, leur confiance, leur soutien et leur encouragement sont toujours mes sources de forces pour prospérer dans la vie. Je remercie mes frères et mes sœurs et toute ma grande famille pour leur encouragement et leur soutien.

Pour conclure, je souhaite bien évidemment remercier mon époux Ramzi, pour son encouragement et son soutien depuis le début de ces travaux de thèse, pour m'avoir supporté, écouté et consolé pendant les moments difficiles. Je ne peux finir sans remercier mes enfants Takie et Aya qui nous a apporté beaucoup de bonheur depuis leur naissance.

ACRONYMES ET ABREVIATIONS

SER :	Sources d'énergie renouvelables
SCEE :	Système de conversion de l'énergie éolienne
MPPT:	Maximum power point tracking
PMSM:	Permanent magnet synchronous machines
WECS:	Wind energy conversion system
VSWT:	Variable Speed Wind Turbine
PMSG:	Permanent magnet synchronous generator
VAWT:	Vertical axis wind turbine
HAWT:	Horizontal axis wind turbine
FLC:	Fuzzy logic control
SVM:	Space vector modulation
MAS:	Machine asynchrone
DFIG	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MS :	Machine Synchrone
db:	Décibel
MLI :	Modulation de Largeur d'Impulsion
FMM :	Force Manitou-Motrice
FEM :	Force Electromotrice
DC :	Direct Curent
AC :	Alternatif Courent

NOMENCLATURE

λ	: la vitesse réduite
v	: Vitesse de vent (m/s)
C_p	: Coefficient de puissance
C_t	: Coefficient de couple
P_e	: La puissance éolienne (w)
T_e	: Le couple éolienne (Nm)
T_m	: Le couple électromagnétique (Nm)
P_t	: La puissance fournie par la masse d'air (w)
P	: La masse volumique d'air (Kg/m ³)
S	: Section (m ²)
dx	: Longueur d'une colonne (m)
P_w	: La puissance extraite du vent (w)
m	: La masse d'air en mouvement traversant la surface des pales en une seconde
P_{opt}	: La puissance totale théoriquement (w)
R	: Rayon de la turbine (m)
Ω_t	: Vitesse mécanique de la turbine (rad/s)
β	: Angle de calage (degré)
n_p	: Nombre des pales de l'éolienne
p	: Nombre de pair de pole
J	: Inertie totale de la chine éolienne (Kg m ²)
θ	: Position statorique
ω	: Pulsation statorique
Ψ	: Flux initiale (Web)

Publications et Conférences Internationaux

Publications :

- MPPT control design for variable speed wind turbine. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)(e-ISSN 2088-8708), Éditeur: Institute of Advanced Engineering and Science (IAES), *Vol. 10, No. 5, October 2020, pp. 4604~4614.*
- *Robust control design of an induction motor.* International Journal of Electrical energy (IJEE)(e-ISSN 2301-3656), Éditeur: Engenering and technology publishing (ETP) *Vol. 1, No. 4, December 2013, pp. 201-205*

Conférences:

- 'Modeling and control of variable speed wind turbine'. 2nd International Conference on Electrical Engineering, "ICEEB'2018", Biskra, Algeria, December 2-3, 2018.
- 'Fuzzy control of PMSG'. 8th Algerian Thematic School on Signal Processing & its Applications, 23-27 Juin, 2019 | Badji Mokhtar Annaba University.

Table des matières

Introduction Générale	1
I. Chapitre I : Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne	6
I.1 Introduction	7
I.2 L'origine de la production d'énergie éolienne	10
I.3 Classifications des systèmes de conversion d'énergie éolienne:	11
I.3.1 Selon l'orientation des turbines	11
a. Éoliennes à axe horizontale (HAWT).....	11
b. Éoliennes à axe vertical (VAWT).....	13
I.3.2 Selon la taille de la puissance électrique [8]	14
I.3.3 Selon le type de puissance électrique (type de générateur) :	14
a. Générateurs asynchrones à induction.....	14
b. Générateurs synchrones.....	17
I.3.4 Selon la vitesse de rotation des turbines	18
a. Système de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe	18
b. System de conversion d'énergie éolienne a vitesse variable	20
c. Systèmes à vitesse variable limitée.....	22
I.4 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	25
I.4.1 Le rotor.....	25
I.4.2 Les pales.....	26
I.4.3 La nacelle	26
I.4.4 Le multiplicateur de vitesse	27
I.4.5 L'arbre secondaire.....	27
I.4.6 L'anémomètre	27
I.4.7 La girouette	27
I.4.8 Le système d'orientation.....	27
I.4.9 La génératrice.....	27
I.5 Régulation de la puissance fournie par le system éolien	28
I.5.1 Système de contrôle mécanique	28
a. Contrôle à calage variable de pale	28
b. Décrochage aérodynamique.....	28
c. Régulation active par décrochage aérodynamique.....	29
I.5.2 Système de contrôle électrique	29
I.6 Conclusion	30
I.7 Références bibliographiques	31
II. Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne	33
II.1 Introduction	34
II.2 Modèle dynamique du système éolien	34
II.2.1 Modèle de profil du vent.....	35
II.2.2 Modèle de Turbine	36
II.2.3 Modèle d'arbre et de boîte de vitesses.....	41

II.2.4	Modélisation de La génératrice	43
a.	Modélisation de la MSAP dans le repère (abc).....	44
b.	Modélisation du PMSG dans le référentiel à rotation synchrone des axes dq.....	46
c.	Analyse de la puissance et du couple de la PMSG	48
II.2.5	Modélisation de convertisseur de puissance	49
a.	Modélisation d'un redresseur MLI	49
b.	Modélisation du bus continu	52
II.3	Les objectifs de la commande des éoliennes	53
II.4	Conclusion	55
II.5	Référence bibliographiques	56
III.	Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne.....	58
III.1	Introduction	59
III.2	Problématique	60
III.3	MPPT par la commande TSR	63
III.4	MPPT par la commande de logique floue (FLC).....	64
III.5	MPPT par la commande PI et PI d'ordre fractionnaire	71
III.6	La commande vectorielle de la PMSG.....	76
III.7	Conclusion	81
III.8	Références bibliographiques.....	82
IV.	Chapitre IV : Simulation et interprétation	85
IV.1	Introduction	86
IV.2	Simulation par la stratégie TSR.....	88
IV.3	Simulation par régulateur PI.....	89
IV.4	Simulation par un régulateur FOPI.....	91
IV.5	Simulation avec un régulateur FFOPI.....	92
IV.6	Interpretation.....	95
IV.7	Conclusion	97
	Conclusion générale et perspectives	99

Listes des Figures

Figure 1.1	Moulin à vent perse ancien	8
Figure 1.2	Capacité mondiale installée d'énergie éolienne de 1980 à 2019 (En mégawatts)	9
Figure 1.3	Progression de la taille des turbines éoliennes et leurs puissances	10
Figure 1.4	Éoliennes à axe Horizontal	12
Figure 1.5	Éoliennes à axe vertical	13
Figure 1.6	Éolienne à vitesse fixe basée sur un générateur à induction à cage	20
Figure 1.7.	Système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable (WECS). (A) Générateur à induction à rotor bobiné à résistance variable, (B) Générateur à induction à double alimentation WECS, (C) convertisseur pleine échelle	22
Figure 1.8.	Disposition générale d'un système à vitesse variable limitée avec configuration à double alimentation	24
Figure 1.9	Différents composants d'une éolienne à axe horizontal	25
Figure 1.10	Diagramme de contrôle d'une chaîne de conversion de type éolien	30
Figure 2.1	Diagramme schématique du système de conversion	34
Figure 2.2.	Le flux d'air autour de la turbine	36
Figure.2.3.	Vitesse spécifique du rotor	38
Figure 2.4	La courbe typique du rapport C_p en fonction de la vitesse réduite	39
Figure 2.5	Les coefficients de puissance C_p normaux en fonction de la vitesse réduite λ	40
Figure 2.6	Caractéristiques de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation	41
Figure 2.5	Schéma fonctionnel du modèle d'éolienne aérodynamique	41
Figure.2.6.	Modèle du multiplicateur	42
Figure 2.7	Modèle d'arbre et de boîte de vitesses	43
Figure 2.8	Vue en coupe du PMSM	45
Figure 2.9	Les circuits équivalents des axes dq d'un PMSG	47
Figure 2.10	Topologies de base du redresseur PWM	50
Figure 2.11	Le modèle simplifié d'un bus continu	52

Figure 2.12	Commande vectorielle côté générateur	54
Figure 3.1	Zones de fonctionnement d'une éolienne	61
Figure 3.2	Le schéma fonctionnel du contrôleur PI d'ordre fractionnaire flou	63
Figure 3.3	Schéma bloc de contrôle du rapport de vitesse réduite (TSR)	64
Figure 3.4	Schéma de principe du contrôleur FLC	65
Figure 3.5	MPPT basé sur la commande floue	66
Figure 3.6	Fonction d'appartenance des entrées (1) Ω_t , (2) P_m et la sortie (3) $\Delta\Omega_{\text{tref}}$	67
Figure 3.7	schéma de la structure du régulateur de vitesse	72
Figure 3.8	Plan des contrôleurs $PI^\lambda D^\mu$	73
Figure 3.9	Diagramme de phase de la commande vectorielle	77
Figure 3.10	Structure de la boucle de contrôle des axes d, q	78
Figure 3.11	schéma structurel de contrôle du courant des axes d, q	79
Figure 4.1	Profil du vent	87
Figure 4.2	(1) Coefficient de puissance C_p , (2) l'erreur de la vitesse (3) courbe des puissances par la commande TSR	89
Figure 4.3	(4) Coefficient de puissance C_p , (5) l'erreur de la vitesse (6) courbe des puissances par la commande PI	90
Figure 4.4	(7) Coefficient de puissance C_p , (8) l'erreur de la vitesse (9) courbe des puissances par la commande FOPI	92
Figure 4.5	(10) Coefficient de puissance C_p , (11) l'erreur de la vitesse (12) courbe des puissances par la commande FFOPI	93
Figure 4.6	Courant direct et quadrature de la génératrice	94
Figure 4.7	Les trois courant de phase à l'entrée de redresseur MLI	94
Figure 4.8	Les tensions dans les Axes d, q de la génératrice	94

Liste des Tableaux

Tableau 1.1	Caractéristiques des différentes structures des génératrices éoliennes	24
Tableau 2.1	coefficient de performance.	39
Tableau 3.1	Règles du contrôleur flou.	69
Tableau 4.1	Les paramètres de l'éolienne	86
Tableau 4.2	Les paramètres du PMSG	86
Tableau 4.3	Les paramètres des gains du contrôleur.....	88
Tableau 4.3	Les performances des techniques MPPT	95

Introduction Générale

Cette thèse porte sur la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne.

La croissance exponentielle de l'industrialisation et du développement économique augmente la demande d'énergie électrique. Les ressources énergétiques sont classées en trois catégories:

- Les combustibles fossiles, qui sont limités, leur prix est variable, et ils génèrent des émissions qui causent le réchauffement et le changement climatique.
- Les ressources nucléaires, qui produisent des substances toxiques qui menacent la santé humaine et l'environnement et nécessitent l'utilisation d'une énorme quantité d'eau.
- Les ressources d'énergies renouvelables, qui peuvent être définies comme des sources d'énergie propres qui minimisent les impacts environnementaux et qui produisent des déchets secondaires minimums ou nuls et qui sont durables en fonction des besoins énergétiques, économiques et sociaux.

Cependant, deux problèmes majeurs découlent de l'utilisation de combustibles fossiles, premièrement les ressources naturelles qui sont limitées et non renouvelables. Par conséquent, la production de combustibles fossiles aura du mal à répondre aux besoins énergétiques mondiaux au cours des prochaines décennies. Deuxièmement, le monde est confronté aux grands défis qui sont le réchauffement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette situation est le principal moteur de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables (SER). Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les SER représentent une part croissante de l'approvisionnement mondial en électricité, et ils constituent la source de production d'électricité qui connaît la croissance la plus rapide.

En effet, la production totale d'électricité à partir de ces ressources augmente de 2,9 % par an, les systèmes d'énergie éolienne pourraient répondre à 20 % de la demande mondiale d'électricité d'ici 2030.

Au cours des dernières décennies, la demande croissante en énergie électrique, notamment à partir de SER (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse...etc.) a poussé la communauté scientifique à développer de nouvelles technologies permettant de produire de l'électricité de façon plus efficace, plus fiable et économique.

Les sources d'énergie solaire et éolienne sont les meilleurs exemples de cette tendance. Dans ce contexte, certains aspects qui font de l'énergie éolienne ont un rôle dominant peuvent être soulignés, parmi lesquels :

- ✓ L'énorme disponibilité de la capacité éolienne dans la nature dans son ensemble, plusieurs fois supérieure à la demande mondiale en énergie primaire.
- ✓ La maturité technologique des systèmes éoliens, ce qui lui a permis de se répandre dans le monde entier ces dernières années et de réduire considérablement les coûts de production compte tenu de cette source.

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

- ✓ L'impact visuel,
- ✓ Le bruit,
- ✓ L'impact sur les oiseaux,
- ✓ La qualité de la puissance électrique
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

Néanmoins, il reste encore des questions à poser concernant la production d'énergie éolienne, notamment : quelle est la topologie de système de génération optimale à appliquer ?

Pour répondre à cette question générale, il est nécessaire d'évaluer des sujets multidisciplinaires tels que :

- La technologie et la conception des générateurs électriques
- Les processus de fabrication
- La disponibilité des matières premières
- Les technologies de l'électronique de puissance

- Les problèmes de maintenance
- L'efficacité

La liste n'est pas exhaustive et pour tous ces éléments, un facteur majeur joue un rôle dominant : le coût global du système. Seule une étude systématique, analysant le système de production dans son ensemble dans le même cadre serait capable de répondre correctement à cette question.

Les systèmes de conversion d'énergie éoliennes ont suivi de nombreuses évolutions, ils peuvent fonctionner à vitesse fixe ou le générateur est directement connecté au réseau électrique, ces éoliennes possèdent néanmoins de nombreux inconvénients : un faible rendement énergétique dans la mesure où elles ne sont optimisées que pour un point de fonctionnement et une courte durée de vie à cause des efforts importants subis par leur structure. En outre, ces turbines génèrent des fluctuations considérables de la tension et de la puissance du réseau lors des rafales de vent ou à vitesse variable où le générateur est contrôlé par l'équipement électronique de puissance. Il y a plusieurs raisons d'utiliser le fonctionnement des éoliennes à vitesse variable, parmi ceux-ci sont :

- L'avantage de pouvoir fonctionner sur une plus large plage de vitesses de vent et de pouvoir régler la puissance générée,
- Les possibilités de réduire les contraintes de la structure mécanique,
- Augmenter le rendement énergétique,
- Améliorer la qualité de l'énergie électrique produite.

Traditionnellement, trois principaux types de générateurs pour les différents systèmes d'éoliennes peuvent être envisagés, à savoir les générateurs à courant continu (DC) et à courant alternatif (AC) synchrones et asynchrones. En principe, chacun peut fonctionner à vitesse fixe ou variable. En raison de la nature fluctuante de l'énergie éolienne, il est avantageux de faire fonctionner la génératrice à vitesse variable, ce qui réduit la contrainte physique sur les pales de l'éolienne et l'arbre d'entraînement et améliore l'efficacité aérodynamique du système et les comportements transitoires du couple.

Pour les applications des systèmes éoliens à vitesse variable deux technologies de générateur appliquées à des topologies de système distinctes sont actuellement en concurrence :

- Les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG),
- Les générateurs à induction à double alimentation (DFIG).

Les deux présentent des avantages et des inconvénients et il n'existe pas de meilleure technologie ultime que l'on puisse déduire pour tout type d'application. L'employabilité future de ces technologies distinctes est liée à leur capacité à satisfaire à la fois aux attentes du marché et aux exigences des entreprises.

Les PMSG's sont une technologie de machine éprouvée puisque leur structure est relativement simple et leurs performances pour la production d'électricité ont été étudiées et largement acceptées depuis longtemps. La majorité des défauts dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à base d'une PMSG sont d'origine électrique, ceux-ci sont dus aux convertisseurs de puissance ou à la génératrice. Pour cette raison il faut répondre avec des techniques de commandes avancées associées à des structures électriques particulières pour rééquilibrer le système et en conséquence réduire le taux d'oscillations de la puissance électromagnétique.

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes est basé principalement sur la technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Donc, l'algorithme MPPT est appliqué pour augmenter l'efficacité globale du système de conversion d'énergie éolienne. Il existe de nombreux algorithmes MPPT et chacun a ses propres avantages et inconvénients.

L'objectif principal de cette thèse est de développer un algorithme MPPT plus efficace et plus robuste, basé sur l'intégration entre la robustesse du régulateur flou et la précision d'un régulateur d'ordre fractionné pour améliorer les performances de suivi (attaque) globales par rapport aux techniques de commande conventionnelles, et atteindre la génération de la puissance maximale en dessous de la puissance nominale, en d'autres termes à vents faibles (Maximisation, optimisation et gestion de la production d'énergie du vent).

Une telle intégration garantit une dynamique rapide et une précision de suivi élevée pour le point de puissance maximale (MPP) dans des conditions climatiques extrêmes.

La thèse est divisée en quatre chapitres de la manière suivante :

En effet nous présentons dans le premier chapitre une revue de la littérature sur l'énergie éolienne, ses applications et ses aspects technologiques et économiques.

La raison pour laquelle on a choisi le système de conversion à vitesse variable est exposée et la proposition de la thèse est définie.

Le deuxième chapitre présente la modélisation mathématique du modèle de la turbine éolienne, ainsi que le modèle PMSG. Un modèle mathématique rigoureux de l'éolienne et de la génératrice est la condition préalable à la conception des algorithmes de commande des machines et à l'analyse des caractéristiques en régime permanent des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

Dans le troisième chapitre, une commande de convertisseur côté générateur a été appliquée. En premier lieu nous illustrons en détails les différentes étapes de commande appliquée au convertisseur côté GSAP pour extraire la puissance maximale. Ensuite, des techniques MPPT ont été étudiées et comparées exhaustivement. Pour chaque méthode MPPT nous donnons une comparaison de la performance basée sur la simulation en termes : d'exigences de capteurs, de robustesse, de vitesse de réponse et d'efficacité. Dans la deuxième partie, une commande vectorielle à flux orienté a été expliquée pour une application au GSAP pour générer le fonctionnement optimal à chaque instant.

Le dernier chapitre est consacré à l'interprétation et la discussion des résultats obtenus lors des différentes simulations réalisées et la comparaison de toutes les méthodes proposées pour validation.

Finalement, nous achèverons ce travail de thèse par une conclusion générale où nous présenterons par la suite, les perspectives possibles qui permettraient d'ouvrir la porte à des solutions plus pertinentes.

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

Ce chapitre donne un examen complet de l'état de l'art des systèmes et technologies de conversion de l'énergie éolienne, nous avons énoncé quelques chiffres concernant la production d'électricité dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne est devenue incontournable. Les différents types de WECS courants sont classés en fonction d'orientation de la turbine, la taille de la puissance électrique et selon la vitesse de rotation des turbines. Ensuite, Nous avons parlé des différents types d'éolienne, les éoliennes à vitesse fixe, à vitesse variable, les éoliennes à axe vertical, à axe horizontal.

I.1 Introduction

Les combustibles fossiles sont la principale ressource énergétique de l'économie mondiale, mais le fait de les considérer comme une cause majeure des problèmes environnementaux pousse l'humanité à chercher des ressources énergétiques alternatives.

Quelques formes d'énergie renouvelables sont présentées ci-dessous avec une brève description de l'élément sur lequel chacune est basée, en commençant par l'énergie éolienne qui est en fait le sujet principal de notre travail de thèse.

➤ **L'énergie éolienne**

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique puis en énergie électrique. Historiquement, il était utilisé pour alimenter en eau différents endroits à partir de différents points d'intérêt.

➤ **L'énergie solaire**

L'exploitation des rayons du soleil se fait par le biais de technologies appropriées telles que les cellules photovoltaïques, qui sont le principal moyen d'exploiter le spectre solaire.

➤ **L'énergie hydroélectrique**

Il s'agit d'exploiter le flux d'eau à grande vitesse.

➤ **Masse géothermique**

Les roches de la terre, lorsqu'elles changent d'état, produisent de la chaleur. Il s'agit essentiellement de la chaleur naturelle qui arrive à la surface de la terre et qui peut également être utilisée pour produire de l'électricité.

➤ **Biomasse**

La biomasse indique l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

L'énergie éolienne ou énergie cinétique du vent est due à un mouvement de masse de l'air qui est lui-même le résultat d'une différence de température entre deux régions voisines. Cette

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

différence de température est causée par le chauffage différentiel du soleil (réchauffement climatique). L'énergie éolienne est utilisée depuis des centaines d'années dans les voiliers et les bateaux à voile. Elle a été également utilisée pour moulin les céréales et pomper l'eau dans le monde entier. Les plus anciens documents historiques prouvés montrent que les Perses ont été parmi les premiers à utiliser l'énergie éolienne pour moulin les céréales.

La figure 1.1 montre une illustration de d'un ancien moulin persan à axe vertical. Ce type de moulin à vent utilise la force de traînée pour extraire l'énergie du vent.

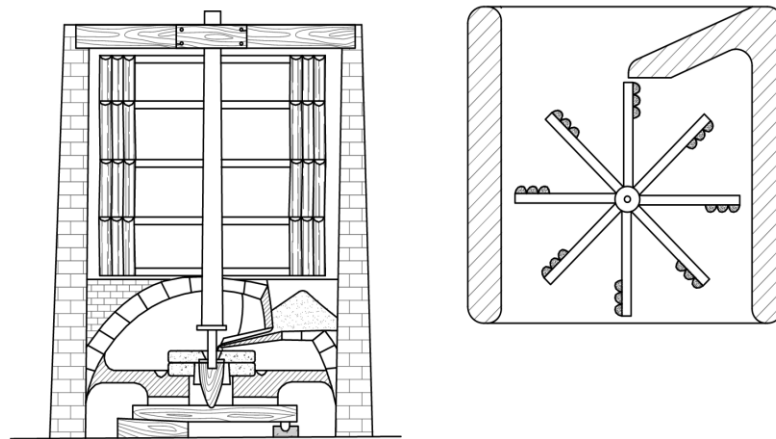


Figure 1.1 : Moulin à vent perse ancien

L'énergie éolienne devient alors l'énergie renouvelable à la croissance la plus rapide au monde, avec une croissance moyenne de 21% au cours des dernières décennies (Figure 1.2). La référence [1.1] a constaté que la puissance éolienne installée cumulée a atteint 599 GW en 2018, et cette puissance a été augmentée de 7 % en 2019 pour atteindre 645 GW [1.2], du fait qu'elle peut être facilement captée par des éoliennes de plus grande capacité par rapport aux autres sources d'énergie renouvelables [1.2], [1.3]. Il ne fait aucun doute que l'énergie éolienne est devenue un pilier des systèmes énergétiques dans de nombreux pays et est reconnue comme une source d'électricité fiable et abordable [1.4].

Le développement de la technologie de conversion de l'énergie éolienne se poursuit depuis les années 1970 et le développement rapide a été observé à partir des années 1990 [1.6], en particulier au cours de la dernière décennie, stimulé par le taux de croissance élevé du marché de l'énergie éolienne. Par conséquent, diverses nouvelles technologies de conversion de l'énergie éolienne ont vu le jour, visant à réduire les coûts, à améliorer l'efficacité et la fiabilité. la figure 1.2 montre la puissance éolienne installée cumulée dans le monde (MW).

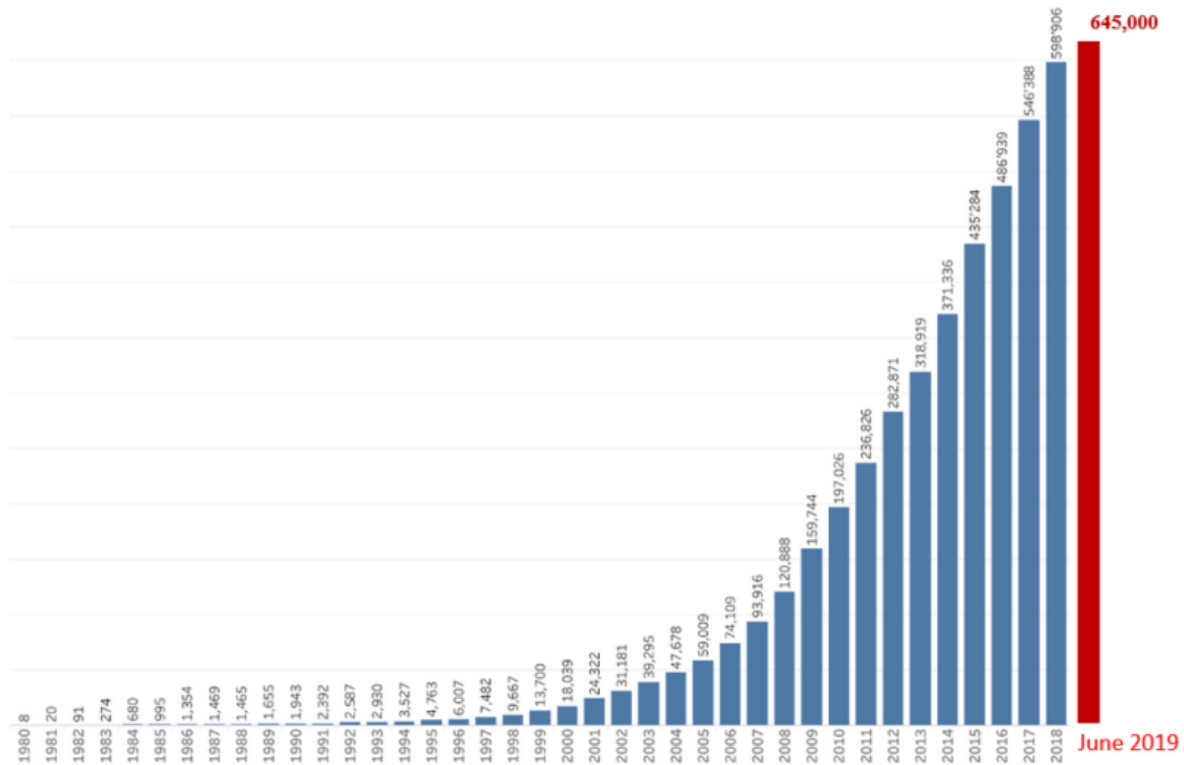


Figure 1.2 Capacité mondiale installée d'énergie éolienne de 1980 à 2019

(En mégawatts)

Le développement technologique des systèmes associés à l'énergie éolienne doit être durable afin de contribuer à l'atténuation du changement climatique aux avantages économiques et à la sécurité énergétique. Le potentiel technique mondial de l'énergie éolienne est cinq fois supérieur à la production énergétique mondiale actuelle (soit quarante fois la demande mondiale d'électricité dans le scénario le plus optimiste) [1.7]. Le Conseil mondial de l'énergie éolienne a présenté différents scénarios selon lesquels les systèmes d'énergie éolienne pourraient répondre à 20 % de la demande mondiale d'électricité d'ici 2030 [1.8]

Le premier type de système éolienne (SE) est le SE à vitesse constante avec une boîte de vitesse à plusieurs étages et un générateur à induction à cage d'écurieuil (GICE) qui est directement connecté au réseau.

En raison du développement des techniques de l'électronique de puissance, le SE à vitesse variable avec une boîte de vitesses à plusieurs niveaux, un générateur asynchrone à double alimentation (DFIG) et un convertisseur d'échelle partielle a été proposé pour étendre le fonctionnement du système à des différentes vitesses du vent et augmenter l'efficacité du système. [1.9][1.10]. Puisque la boîte de vitesse à plusieurs niveaux est vulnérable, les SE à entraînement direct sans engrenage avec un générateur synchrone (GS) et un convertisseur

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

pleine échelle a été développé. Ensuite, le générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) est adopté pour remplacer le générateur synchrone à excitation électrique (GSEE) pour améliorer l'efficacité et la fiabilité [1.4]. Actuellement, Le SE à vitesse variable avec un DFIG et le SE à entraînement direct avec un PMSG sont les systèmes les plus répandues sur le marché.

L'énergie produite par une éolienne dépend essentiellement de la vitesse du vent et est directement liée à la longueur et à la forme des pales. Plus la taille des pales de l'éolienne est augmentée plus sa puissance augmente. L'évolution de la taille et la puissance des éoliennes avec le temps n'a pas cessé d'évoluer au cours des années comme la montre la Figure 1-3 [1.9].

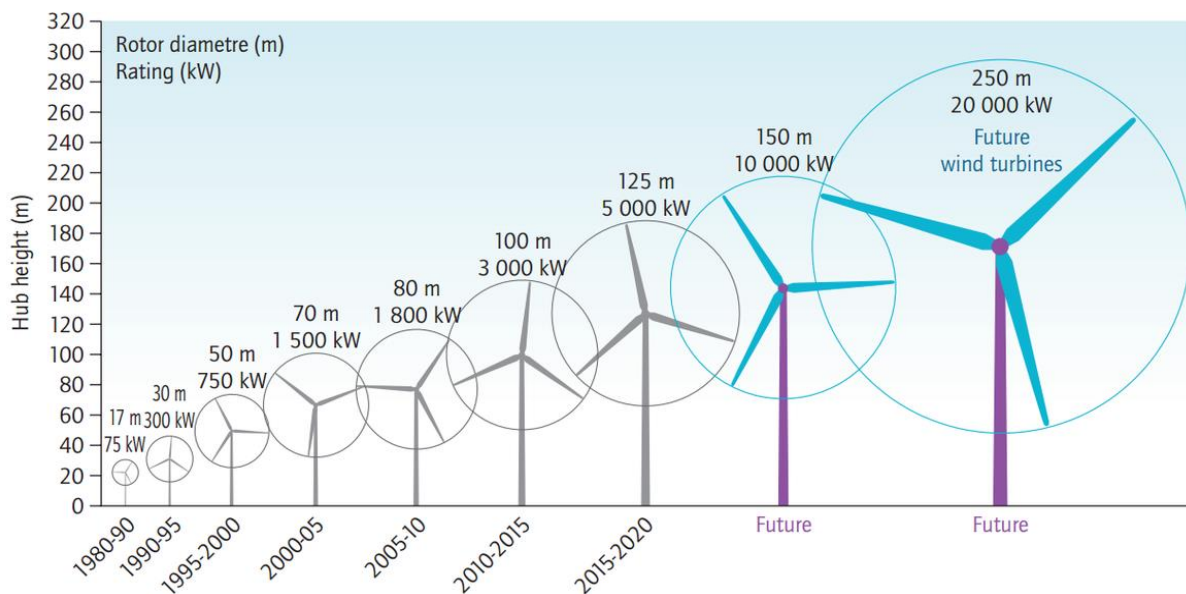


Figure 1.3 Progression de la taille des turbines éoliennes et leurs puissances

I.2 L'origine de la production d'énergie éolienne

L'utilisation de l'énergie éolienne dans l'histoire humaine remonte à au moins 3000 ans. Son application principale était de convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique utilisée presque jusqu'au début des 20^{ème} siècles pour pomper de l'eau ou pour moudre des grains [1.3], [1.10].

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

À cette époque, au début de l'industrialisation moderne le développement de la machine à vapeur et d'autres technologies de conversion des combustibles fossiles en énergie utile ont réduit considérablement l'intérêt pour l'énergie éolienne [1.11] [1.12].

[1.11] Soulignent au moins cinq facteurs qui ont contribué au grand regain d'intérêt pour cette forme d'énergie à partir de la fin des années 1960. Le premier se réfère à la nécessité d'une source d'énergie alternative, car à cette époque il y avait déjà une prise de conscience émergente des inconvénients de la combustion de combustibles fossiles. La deuxième raison était le grand potentiel de l'énergie éolienne : elle est disponible partout et particulièrement dans certaines régions à densité énergétique élevée.

Le développement des nouvelles technologies notamment liées à l'électronique de puissance, a révolutionné la façon dont l'énergie éolienne pouvait être extraite et il est mentionné comme le troisième facteur principal. Les deux autres facteurs font référence à la nouvelle vision sur la manière d'explorer l'énergie éolienne techniquement et commercialement et à la volonté politique d'y parvenir. Des subventions gouvernementales étaient nécessaires pour financer la recherche, le développement et les essais des éoliennes, ainsi que pour réformer la réglementation afin de leur permettre d'être interconnectés au réseau électrique.

I.3 Classifications des systèmes de conversion d'énergie éolienne :

I.3.1 Selon l'orientation des turbines

Une éolienne est une machine tournante qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Si l'énergie mécanique est utilisée directement par des machines, comme une pompe ou des meules, la machine est généralement appelée moulin à vent. Bien qu'il existe plusieurs types d'éoliennes, la catégorisation principale est basée sur l'orientation de leur axe par rapport au flux du vent. Ainsi il existe deux grandes classes : Les éoliennes à axe horizontal et Les éoliennes à axe vertical [1.12] [1.13]

a. Éoliennes à axe horizontale (HAWT)

Actuellement, le marché est donc dominé par les éoliennes à axe horizontal (deux pales ou trois pales) (Figure 1.4), dans ce type le rotor est situé au sommet d'une tour où le vent a plus d'énergie et moins de turbulence. Le générateur et le dispositif de transmission sont regroupés

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

à l'intérieur de la nacelle. Cette dernière comprend également un mécanisme qui permet d'orienter la nacelle et le rotor afin de suivre la direction du vent.

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont :

- Ils n'ont pas besoin d'une vitesse de vent élevée pour commencer à tourner. Pour cette raison, l'exploitation du vent est importante, même à faible vitesse,
- Rendement plus élevé par rapport à l'éolienne à axe vertical,
- Coût assez important,
- Moins exposées aux contraintes mécaniques,
- Plus solides,
- Ils sont faciles à assembler.

Cependant, elles possèdent également quelques inconvénients :

- Confrontées à des vents forts, les éoliennes horizontales sont moins résistantes que les éoliennes verticales
- Nécessitent des pales de rotor non flexible,
- Emettent beaucoup de bruit



Figure 1.4 Éoliennes à axe Horizontal.

b. Éoliennes à axe vertical (VAWT)

Dans les éoliennes à axe vertical, l'axe de rotation est perpendiculaire à la direction du vent. Ces machines sont également appelées machines à axe de vent transversal. Les principaux modèles de machines à axe vertical sont le rotor Savonius et le rotor Darrieus (figure 1.5). Les principaux avantages de VAWT par rapport aux HAWT conventionnels sont que les VAWT sont omnidirectionnels, c'est-à-dire qu'ils acceptent le vent de n'importe quelle direction. Cela simplifie leur conception et élimine le problème imposé par les forces gyroscopiques sur le rotor des machines conventionnelles lorsque les turbines tournent dans le vent.

Mais la plupart des VAWT produisent seulement 50% de l'énergie par rapport à les turbines à axe horizontal, en raison de la traînée supplémentaire qu'ils ont lorsque leurs pales tournent dans le vent.



Figure 1.5 Éoliennes à axe vertical

I.3.2 Selon la taille de la puissance électrique [8]

i) Petite taille (jusqu'à 2 kW) : ceux-ci peuvent être utilisés pour des applications à distance, ou à des endroits qui tentent d'avoir une puissance relativement faible.

ii) Taille moyenne (2-100 kW) : Ces turbines peuvent être utilisées pour fournir une capacité nominale inférieure à 100 kW, à plusieurs résidences ou à une utilisation locale.

iii) Grande taille (100 kW et plus) : ils sont utilisés pour produire de l'électricité pour la distribution dans les réseaux électriques centraux.

I.3.3 Selon le type de puissance électrique (type de générateur) :

Une éolienne peut utiliser des générateurs triphasés de différents types. Aujourd'hui, selon [1.14] le passage des générateurs à induction aux générateurs modernes, dotés d'un aimant permanent, est en constante augmentation.

Les types de générateurs qui peuvent être utilisés dans les éoliennes sont les générateurs à induction asynchrones et les générateurs synchrones.

a. Générateurs asynchrones à induction

Dans un système d'éolienne, le type de générateur le plus couramment utilisé est le générateur asynchrone. Le générateur asynchrone est simple dans la partie mécanique avec une bonne robustesse et un faible coût en raison de la génération accrue [1.15]. Un circuit électronique est nécessaire à son fonctionnement en raison de sa forte consommation de puissance réactive. Pour l'excitation d'un générateur à induction asynchrone, on utilise un courant alternatif, le nombre de pôles détermine donc la vitesse de rotation en fonction du champ magnétique généré ainsi que de la fréquence du courant [1.14].

Cela détermine la vitesse de rotation synchrone. Si le rotor tourne à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisation, un champ magnétique est créé entre le rotor et le champ tournant du stator, également appelé glissement, ce qui entraîne un courant dans l'enroulement du rotor [1.15]. Le couple dans le rotor est généré par l'effet des champs magnétiques du rotor et du stator [1.14].

Les générateurs à induction asynchrones sont répartis dans les catégories suivantes :

- Générateurs à induction à double alimentation (DFIG)

- Générateurs à induction à cage d'écureuil (SCIG)
- Générateurs à induction à résistance électronique variable (OSIG)

1. Générateur à induction à double alimentation (DFIG)

Le générateur à induction à double alimentation (DFIG) ajuste les vitesses à des valeurs comprises entre $\pm 30\%$ de la vitesse nominale. Son utilisation a remplacé le générateur à induction avec une résistance de rotor électriquement variable, car la résistance de rotor variable consiste en un convertisseur de source de tension dos à dos avec des éléments IGBT connectés au réseau [1.14]

Le fonctionnement du générateur est entièrement déterminé par l'onduleur et ses contrôleurs dans n'importe quelle condition d'état.

Enfin, l'onduleur du côté de la machine rotorique se concentre sur le contrôle de la puissance active et réactive du générateur, tandis que le contrôle du côté du réseau se concentre sur le maintien de la tension d'interface continue constante, garantissant un facteur de puissance unitaire [1.14].

Le générateur à induction à double alimentation a deux plages de fonctionnement en fonction du glissement, qui peut être positif ou négatif, ce qui détermine également le flux de puissance du rotor, qui prend différentes directions. Pour le champ de glissement positif, équivalent au mode super-synchrone la puissance est transférée du rotor au réseau, tandis que dans le champ de glissement négatif, équivalent au mode sous-synchrone, on observe que la puissance est transférée du réseau au rotor. Quel que soit le champ, le stator fournit de l'énergie au réseau.

Contrairement au générateur à induction à résistance rotorique électriquement variable, où la puissance excédentaire est perdue sous forme de chaleur dans la résistance, l'avantage du générateur à induction à double alimentation est que, dans le champ de glissement positif, la puissance accrue du rotor est transmise au réseau [1.14]. Le rôle de l'onduleur dans le contrôle qu'il fournit du côté du réseau est également important, car la puissance réactive est compensée soit en fournissant la puissance réactive nécessaire au stator, soit en absorbant la puissance réactive supplémentaire du réseau. Enfin, la régulation du facteur de puissance est obtenue [1.15].

Le résultat du contrôle de la puissance réactive est une meilleure stabilité du réseau, car la machine s'adapte aux conditions de défaut du réseau. Dans un générateur à induction à double alimentation, la puissance réactive peut être contrôlée par le courant du rotor car, dans ce type

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

de machine, la puissance active a une influence beaucoup plus faible sur la puissance réactive. L'existence du rotor annulaire dans le générateur à induction à double alimentation entraîne des coûts de construction et d'entretien élevés, l'entretien consistant à changer le rotor. Aux coûts s'ajoutent les régulateurs et le convertisseur de puissance [1.14].

2. Générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG)

Le générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG) a été appliqué à un système d'éolienne à vitesse fixe, car le glissement modifie la vitesse d'un très faible pourcentage. En ce qui concerne la partie mécanique, elle est simple, la machine ayant un rendement élevé, mais aussi de faibles coûts de maintenance.

L'un des principaux inconvénients du SCIG est la variabilité du vent, qui apparaît comme une perturbation du réseau et provoque des changements soudains du couple.

L'un des principaux inconvénients est la nécessité d'alimenter l'enroulement du stator en courant magnétisant provenant du réseau, ce qui se traduit par un facteur de puissance assez faible à forte charge sans pour autant supporter les spécifications du réseau. De plus, à des vitesses de vent élevées, ce générateur SCIG fournit une plus grande quantité de puissance active uniquement en consommant de la puissance réactive du réseau, ce qui entraîne un changement du facteur de puissance à une charge élevée, rendant le réseau connecté instable [1.14].

Ainsi, l'alimentation en puissance réactive est nécessairement créée par des réseaux de condensateurs en parallèle avec le générateur. En mettant en œuvre le convertisseur dos-à-dos avec des éléments IGBT, il est possible de contrôler à la fois la puissance active et réactive avec n'importe quelles conditions de vent et également les spécifications du réseau. Enfin, il donne la possibilité d'utiliser ce type de générateur dans des systèmes d'éoliennes à vitesse variable [1.16].

3. Générateur à induction à impédance rotorique variable (OSIG)

Le générateur d'induction à impédance rotorique variable (OSIG) a l'avantage de voir son glissement varier positivement et de manière fiable pour trouver sa valeur optimale, en obtenant moins de perturbation dans le couple et la production d'énergie. La conséquence de ce qui précède est que de manière simple la charge sur l'éolienne est réduite en raison de la variation de la vitesse du vent. Le générateur de ce type (OSIG) présente l'avantage de pouvoir disposer d'une large gamme de vitesses dans une topologie de rotor simple [1.14].

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

Dans les générateurs de ce type, il est nécessaire d'avoir un circuit pour compenser la puissance réactive. De plus, avec ce type de générateur, les charges mécaniques et donc les perturbations de l'énergie dues aux rafales de vent sont réduites. La plage de valeurs de la variation de la vitesse est d'environ 10% et dépend principalement de la valeur de la résistance [1.16]. Un inconvénient est la chaleur de la résistance variable qui entraîne une perte d'énergie, ainsi que le manque de contrôle de la puissance active et réactive [1.14].

b. Générateurs synchrones

Un générateur synchrone, comparé à un générateur à induction à un coût de construction élevé, mais il est également plus complexe sur le plan mécanique. Un avantage important d'un générateur synchrone est qu'il ne nécessite pas de courant de magnétisation du circuit du stator. Le champ magnétique est créé par les aimants permanents à travers les enroulements conventionnels du rotor. En outre, un avantage important du générateur synchrone est la simplification qu'il offre dans l'existence de la boîte de vitesse, puisqu'avec un grand nombre de pôles, une boîte de vitesse n'est pas nécessaire.

Le générateur synchrone peut être appliqué aux systèmes d'éoliennes à vitesse variable car il offre un contrôle de puissance approprié. Le convertisseur électronique de puissance à pleine échelle auquel le générateur est connecté vise à absorber la variabilité du vent du côté de la machine et à contrôler la puissance avec le réseau connecté [1.14].

Il y a deux catégories de générateur synchrone :

- Générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG).
- Générateurs synchrone à aimant permanent (PMSG).

1. Générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG)

Le générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG) est directement connecté au réseau par les enroulements du stator et sa vitesse de rotation est régulée par la fréquence du réseau. Le rotor est excité par un courant continu fourni par des bagues collectrices et des capteurs, ou par un redresseur rotatif [1.16]

Leur avantage est qu'ils permettent un contrôle total de la puissance. Dans ce générateur, le champ d'excitation est généré dans les enroulements du rotor et tourne à la vitesse synchrone [1.17].

2. Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG)

Les générateurs synchrones à aimant permanent (PMSG) suscitent de plus en plus d'intérêt, car ils sont excités magnétiquement (auto-excités) et présentent un rendement et un facteur de puissance élevés. Le stator est constitué d'un enroulement triphasé et le rotor d'aimants permanents de forme rectangulaire ou cylindrique. Pour les systèmes d'éoliennes à faible vitesse, on utilise principalement des pôles ectopiques.

Le rendement élevé des générateurs synchrone à aimant permanent est axé sur le fait qu'ils sont auto-excités, de sorte qu'aucun apport d'énergie supplémentaire n'est nécessaire.

Les générateurs synchrones à aimant permanent permettent un contrôle précis de la vitesse, car le contrôle se fait d'un côté dans la machine et de l'autre côté dans le réseau avec un facteur de puissance élevé. Un autre avantage important est l'absence de boîte de vitesses ainsi que le mode d'excitation sans facteur externe, ce qui se traduit par un facteur d'efficacité élevé. Les inconvénients incluent le coût accru des aimants permanents et de leurs matériaux. De même, à haute température, les aimants permanents peuvent se démagnétiser [1.14].

Les inconvénients des générateurs PMSG incluent l'onduleur à pleine échelle car il augmente le coût de fabrication [1.16]. Le convertisseur de puissance, comme cela a été mentionné ailleurs, est utilisé pour connecter la machine à la tension et à la fréquence du réseau [1.17].

I.3.4 Selon la vitesse de rotation des turbines

Plusieurs types de technologies de générateur ont été développés et sont en cours d'utilisation aujourd'hui. Dans cette section, une courte vue d'ensemble de ces différentes topologies de générateur est présentée. Chacun d'eux est discuté avec ses avantages et inconvénients

a. Système de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe

Les systèmes à vitesse fixe sont l'arrangement les plus simple et les plus largement utilisé. Ils fonctionnent à vitesse constante (ou presque constante). Cela implique qu'indépendamment de la vitesse du moteur principal, la vitesse angulaire du rotor est fixe et déterminée par la fréquence de la grille d'alimentation et le rapport de transmission. Cette configuration correspond au concept dit danois [1.18] qui était très populaire dans les années 80. Cette éolienne est une machine à vitesse fixe contrôlée, avec un générateur asynchrone à induction à cage d'écureuil (SCIG) directement connecté au réseau via un transformateur comme le montre la figure 1.6.

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

La puissance est limitée aérodynamiquement soit par le décrochage actif ou par le contrôle de pas. Les trois systèmes utilisent un démarreur progressif afin de réduire le courant d'excitation et ainsi limiter les problèmes de scintillement sur le réseau. Ils ont également besoin d'un réactif compensateur de puissance pour réduire (presque éliminer) la demande de puissance réactive des systèmes éoliennes vers le réseau. Cela se fait généralement en commutant en continu les batteries de condensateurs suivant la variation de production (5-25 étapes).

Ces solutions sont intéressantes en raison de leur coût et de leur fiabilité, mais elles ne sont pas capables de contrôler très rapidement (en quelques ms) la puissance active. De plus, les rafales de vent peuvent provoquer des pulsations de couple dans le drain d'entraînement et charger considérablement la boîte de vitesses. Les avantages des éoliennes avec générateurs à induction sont la construction simple et bon marché, en plus qu'aucun dispositif de synchronisation n'est nécessaire.

Ces solutions sont attractives en raison de leur coût et de leur fiabilité. Certains inconvénients sont :

- L'éolienne doit fonctionner à vitesse constante.
- Il nécessite un réseau électrique rigide pour permettre un fonctionnement stable.
- Il peut nécessiter une construction mécanique plus coûteuse afin d'absorber des contraintes mécaniques élevées, car les rafales de vent peuvent provoquer des pulsations de couple sur la chaîne cinématique.
- La vitesse du GICE pour la vitesse constante n'est pas contrôlable et ne varie que dans une plage étroite autour de la vitesse synchrone. Ensuite, l'énergie maximale ne peut pas être captée sur une large gamme de vitesses de vent.
- Les fluctuations de la vitesse du vent sont directement transmises dans le couple électromécanique, puis dans la puissance électrique, dégradant la qualité de l'énergie électrique. En outre, les fluctuations peuvent entraîner des contraintes mécaniques et de fatigue élevée sur l'ensemble du système et peuvent entraîner des oscillations de balancement entre l'éolienne et l'arbre du générateur.

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

- La boîte de vitesses à plusieurs étages utilisée dans le système présente inévitablement certains inconvénients, tels que la dissipation thermique due au frottement, un entretien régulier et un bruit audible.

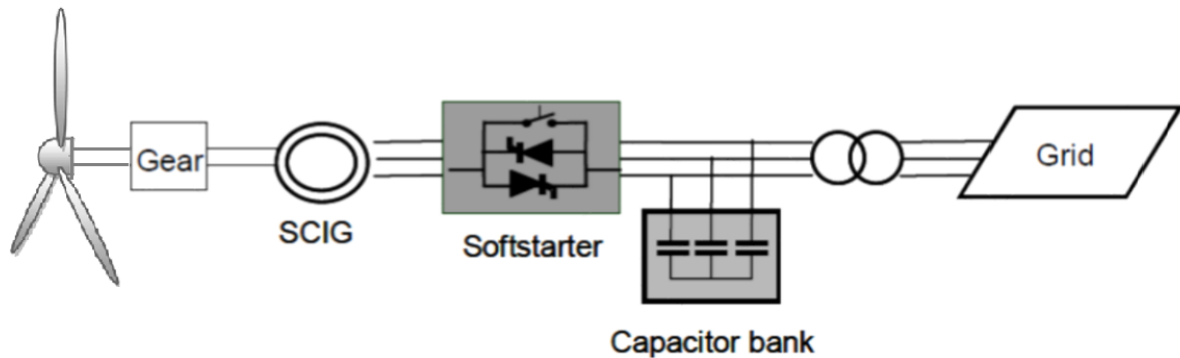


Figure 1.6 Éolienne à vitesse fixe basée sur un générateur à induction à cage

b. System de conversion d'énergie éolienne a vitesse variable

Avec l'augmentation de la taille de la turbine, les problèmes inhérents aux systèmes à vitesse constante deviennent de plus en plus prononcés, en particulier dans les zones à réseaux relativement faibles. Pour surmonter ces problèmes, la tendance de la technologie moderne des générateurs est vers des concepts à vitesse variable. Un système à vitesse variable maintient le couple du générateur constant et c'est la vitesse du générateur qui change. Les variations de la puissance entrante sont absorbées par les changements de vitesse du rotor. L'agencement peut avoir un générateur à induction ou un générateur synchrone en tant que machine électrique. La configuration correspond à l'éolienne à vitesse variable et à vitesse variable complète, avec le générateur connecté au réseau via un convertisseur de puissance à pleine puissance, comme illustré à la figure 1.7. Le convertisseur côté machine fournit l'excitation retardée à la machine tandis que le convertisseur côté ligne maintient facteur de puissance unitaire à l'interface du réseau et régule également la constante de tension de la liaison CC.

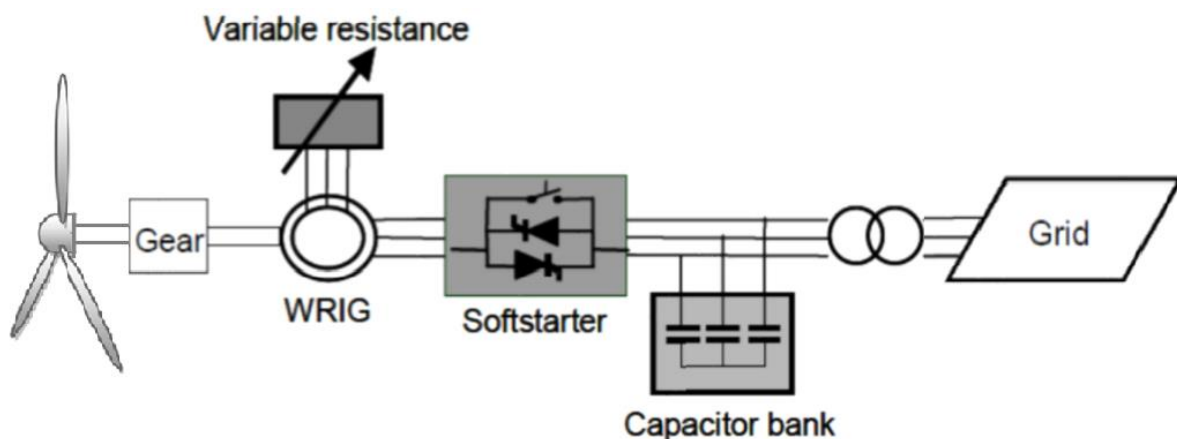
Le générateur peut être excité électriquement (générateur synchrone à rotor bobiné WRSG) ou du type excité par aimant permanent (générateur synchrone à aimant permanent PMSG).

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

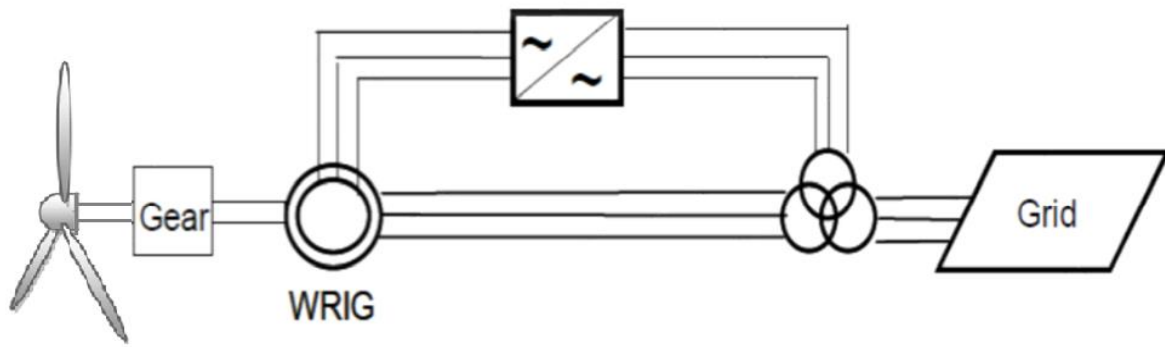
Récemment, en raison des progrès de l'électronique de puissance, le générateur à induction à cage d'écureuil a également commencé à être utilisé pour ce concept. Certains systèmes d'éoliennes à vitesse variable sont sans engrenage. La machine synchrone offre la moindre configuration possible pour un système à vitesse variable.

Il peut fonctionner sans boîte de vitesses, avec une bonne conception multipolaire. C'est un objectif important car la boîte de vitesses est un composant qui a tendance à tomber en panne. Les éoliennes à vitesse variable sont conçues pour atteindre une efficacité aérodynamique maximale sur une large opération, il est possible d'adapter en continu (accélérer ou décélérer) la plage de vitesse de rotation de la vitesse du vent. Les avantages des turbines à vitesse variable sont que leur captage d'énergie annuel est d'environ 5% supérieur à la technologie à vitesse fixe, et que les puissances active et réactive générées peuvent être facilement contrôlées.

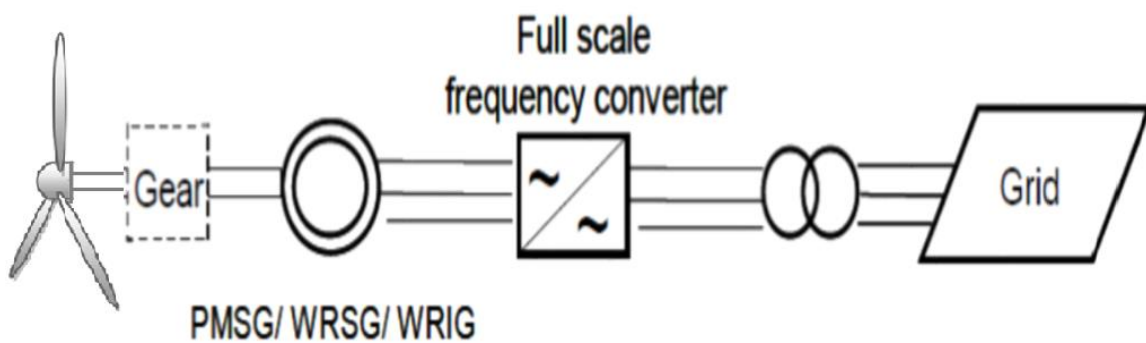
Il y a également moins de contraintes mécaniques et les fluctuations rapides de puissance sont rares car le rotor agit comme un volant (stockant l'énergie sous forme cinétique). En général, aucun problème de scintillement ne se produit avec les turbines à vitesse variable. Les turbines à vitesse variable permettent également de contrôler la tension du réseau, car la production de puissance réactive peut être variée. Comme inconvénients, les éoliennes à vitesse variable ont besoin d'un convertisseur de puissance qui augmente le nombre de composants et rend le contrôle plus complexe. Le coût global de l'électronique de puissance est d'environ 7% de l'ensemble de l'éolienne.



(A)



(B)



(C)

Figure 1.7. Système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable (WECS). (A) Générateur à induction à rotor bobiné à résistance variable, (B) Générateur à induction à double alimentation WECS, (C) convertisseur pleine échelle.

c. Systèmes à vitesse variable limitée

Par rapport au générateur à induction à cage d'écureuil, la principale différence fournie par la configuration du générateur à induction à double alimentation est l'accès aux enroulements du rotor, donnant ainsi la possibilité d'imprimer la tension du rotor. Avec cet agencement, la puissance peut être extraite du circuit de rotor ou fournie à celui-ci et le générateur peut être magnétisé à partir du circuit de stator ou du circuit de rotor.

Différentes technologies peuvent être utilisées pour ce convertisseur de puissance telles que : convertisseur de source de tension dos à dos (VSC), convertisseur multi niveau (trois niveaux)

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

ou convertisseur matriciel [1.19]. Cependant, les éoliennes existantes sur le marché sont basées sur la topologie VSC dos à dos.

La figure 1.8 montre cette topologie, le stator est directement connecté au réseau, tandis que le rotor est connecté via des bagues collectrices au convertisseur. Un transformateur élévateur est nécessaire entre le convertisseur côté ligne et le réseau électrique, pour faire correspondre le rapport de tension entre le stator et le rotor de la machine. Cette configuration [1.20] à deux convertisseurs offre de nombreux avantages. Les principales caractéristiques de cette configuration sont répertoriées ci-dessous :

1. Coût du convertisseur réduit, car ils doivent être évalués pour la puissance de glissement uniquement (généralement environ 0,25 pu).
2. Le convertisseur côté rotor permet un contrôle de la puissance de glissement positif et négatif grâce au contrôle du courant du rotor en magnitude de phase et en fréquence. Cela permet à la fois un fonctionnement sous-synchrone et super-synchrone.
3. Le condensateur de liaison CC agit comme une source de puissance réactive qui, d'une certaine manière, peut contrôler le facteur de puissance du côté du stator.
4. Le convertisseur côté ligne a la capacité de fonctionner comme filtre actif, en plus de maintenir le fonctionnement du facteur de puissance unitaire et de réguler la tension du bus CC.
5. Réduction du coût et du poids du filtre inverseur et des filtres EMI (à environ 0,25pu de la puissance totale du système). Les harmoniques de l'onduleur représentent une fraction des harmoniques totales du système.
6. L'efficacité du système est meilleure, en raison de la réduction des pertes dans les convertisseurs.

Des développements importants dans la technologie du système à double alimentation se sont produits au cours des deux dernières décennies. Avec les progrès des dispositifs électroniques

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

de puissance et des processeurs de signaux numériques, il est désormais possible de mettre en œuvre facilement des algorithmes complexes tels que le contrôle orienté sur le terrain, etc.

Cela avait conduit à de nouvelles technologies ou à des générateurs connectés au réseau utilisant une configuration à double alimentation.

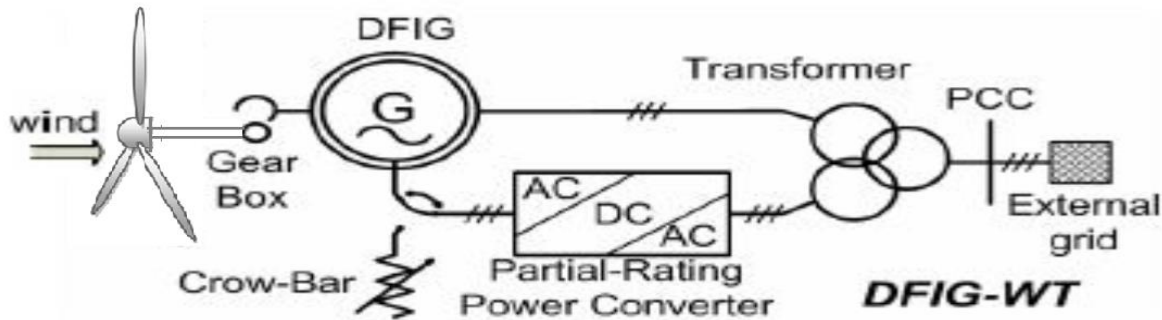


Figure 1.8. Disposition générale d'un système à vitesse variable limitée avec configuration à double alimentation.

Le tableau 1.1 élabore une synthèse sur les différentes topologies des systèmes de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique :

Type	Avantages	Inconvénients
MAS à Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Robustesse ▪ Faible cout ▪ Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Puissance extraite non optimisée ▪ Maintenance de boite de vitesse ▪ Energie réactive non contrôlée
MADA à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à vitesse variable ▪ Puissance extraite optimisée ▪ Machine standard ▪ Electronique de puissance dimensionnée en 30% de la puissance nominale 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prix élevé de l'électronique de puissance ▪ Maintenance de boite de vitesse ▪ Rendement faible ▪ Contrôle complexe ▪ Plage de vitesse limitée ▪ Couple insuffisant
PMSG à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de puissance ▪ Puissance extraite optimisée ▪ Absence de boite de vitesse ▪ Rendement et facteur de puissance élevé ▪ Faible inertie et couple massique amélioré 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prix de la machine et de l'électronique de puissance ▪ Dimensionnement de l'électronique de puissance au moins de 100% de la puissance nominale ▪ Prix des aimants permanents

Tableau 1.1 Caractéristiques des différentes structures des génératrices éoliennes

I.4 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

Les composants d'un aérogénérateur diffèrent d'un type à l'autre selon les besoins. Les parties essentielles sont montrées dans la figure suivante [1.20] :

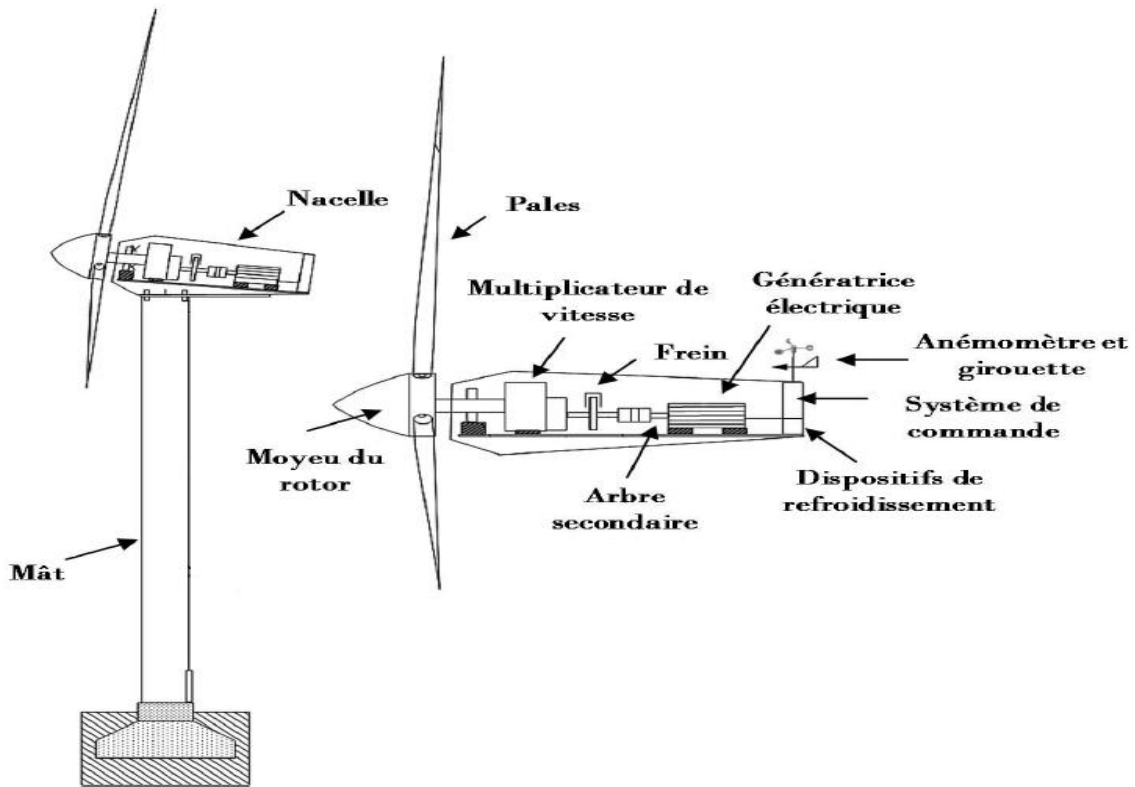


Figure 1.9 Différents composants d'une éolienne à axe horizontal

I.4.1 Le rotor

L'utilisation de rotor à trois pales est prédominante dans l'ensemble des machines de moyenne et grande puissance (> 30 kW), exploitées ou construites dans le monde soit environ 85 % du marché. En termes de poids, un éolien monopole doit être muni d'une masse inerte permettant l'équilibrage de la pale : elle est donc sensiblement équivalente à une machine bipale. Dynamiquement, la configuration tripale est la plus équilibrée. Elle doit cependant accepter un chargement cyclique plus important. Aérodynamiquement, les études montrent un léger avantage à posséder plusieurs pales (réduction des pertes d'extrémités). On augmente ainsi le coefficient de puissance d'environ 10 % en passant d'une pale à deux, de 3 % en passant de deux à trois, de 1 % en passant de trois à quatre, etc. Le choix résulte donc d'un compromis entre l'efficacité aérodynamique du rotor, le poids, la dynamique des structures et le prix associé.

I.4.2 Les pales

La pale d'une éolienne est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. Des performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, la tenue en fatigue. Ainsi le choix des profils, leur répartition en envergure, la forme en plan (évolution de la corde en fonction de l'envergure) et le vrillage de la pale doivent être soigneusement étudiés. Par exemple, selon le type de régulation choisi et selon la taille de l'éolienne, le vrillage pourra différer significativement d'une machine à l'autre.

Pour une machine de grande taille à pas variable, on pourra envisager de démarrer la rotation en s'aidant du générateur utilisé en moteur. Par contre, pour une petite éolienne régulée au décrochage, le vrillage, notamment au pied de la pale, devra permettre un démarrage autonome de la machine.

À ces contraintes s'ajoutent bien évidemment les critères relatifs au vent que la machine devra « utiliser ». Les constructeurs sont ainsi amenés à proposer différents types de pales pour une même puissance en fonction de la vitesse moyenne rencontrée sur les sites d'implantation. Après le choix d'une première configuration aérodynamique, il faut concevoir une structure résistante et légère.

Pareillement, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue). On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est certain que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimiseurs facilite fortement la tâche du concepteur.

I.4.3 La nacelle

Son rôle est d'abriter les composants transformant l'énergie mécanique en énergie électrique notamment le générateur. La nacelle regroupe toutes les parties mécaniques permettant de découpler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lente et rapide, roulement, multiplicateur, le frein à disque, différents freins aérodynamiques, qui permettent d'arrêter le système en cas de surcharge.

I.4.4 Le multiplicateur de vitesse

Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la vitesse de rotation faible de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. La boîte de vitesse permet d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) pouvant se coupler à un générateur de série, donc peu cher, qui tourne 40 à 50 fois plus vite. Dans les pays froids on doit réchauffer ces grosses boîtes d'engrenages.

I.4.5 L'arbre secondaire

L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

I.4.6 L'anémomètre

Il mesure la vitesse du vent. Relier à un système de contrôle, il permet d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir, voire d'arrêter l'éolienne si le vent est très fort.

I.4.7 La girouette

Ce composant indique la direction du vent. L'information est transmise au système d'orientation via un système de contrôle électronique.

I.4.8 Le système d'orientation

Il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.

I.4.9 La génératrice

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Les plus simples et robustes sont des générateurs synchrones à aimant permanent.

I.5 Régulation de la puissance fournie par le system éolien

La régulation joue un rôle essentiel pour diminuer les couts de la production d'énergie électrique, optimiser et assurer la meilleure qualité de la puissance générée, notamment en limitant les fluctuations causées par les variations de vent.

Le système de régulation-commande dans une chaine de conversion d'énergie éolienne est assez complexe car il réagit sur deux parties indépendantes qui sont connectées sur le même arbre à savoir le contrôle sur la partie mécanique du rotor (angle d'attaque) et le contrôle coté électrique sur la génératrice et connexion au réseau.

I.5.1 Système de contrôle mécanique

Ce moyen de contrôle permet essentiellement de limiter la puissance dans le cas des vents forts.

a. Contrôle à calage variable de pale

Le contrôle du pas des pales (Pitch Control) est principalement appliqué aux systèmes à vitesse variable. La différence est que la commande de pas n'est pas appropriée dans les systèmes à vitesse fixe en raison des écarts de puissance. Si le contrôle de l'angle d'inclinaison des pales est appliqué à une éolienne à vitesse fixe, une petite variation de la vitesse du vent se traduira par une variation beaucoup plus importante de la puissance de sortie.

Un facteur important est également le temps de rotation des pales à l'angle souhaité, ce qui fait varier la puissance mécanique et affecte le régime net. En revanche, dans un système à vitesse variable, ces variations seront appliquées sous la forme d'un changement de la vitesse du rotor et la puissance électrique fournie au réseau ne l'affectera pas [1.21].

b. Décrochage aérodynamique

Dans l'application du contrôle du décrochage (contrôle passif du décrochage), les pales sont fixées sur l'axe sans changer leur angle, ce qui entraîne une perte d'appui aérodynamique en cas de vents forts. En conséquence, le couple développé est réduit, donc la puissance générée conduit à des glissements négatifs continus de la vitesse de rotation. Un avantage important de cette tactique est qu'il n'y a pas de pièces rotatives sur le rotor [1.21].

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

Mais la conception de cette stratégie de contrôle est un processus difficile sur le plan aérodynamique et modifie la conception de l'ensemble du système. Les inconvénients sont les suivants : performances à des vitesses de vent faibles, assistance au démarrage incomplète et variations de la puissance maximale produite en régime permanent en raison des changements de la densité de l'air et de la fréquence du réseau.

c. Régulation active par décrochage aérodynamique

Le contrôle actif du décrochage utilise le même processus de contrôle que celui du contrôle du pas des pales combinées à la capacité de perdre le support aérodynamique des pales assurant des charges élevées et un spectre de puissance. Le contrôle passif des pertes de support peut être appliqué aux systèmes à vitesse fixe, tandis que le contrôle actif des pertes de support peut être utilisé dans les systèmes à vitesse variable.

Lorsque le contrôle actif de pas des pales est utilisé dans des systèmes à vitesse fixe, n'entraîne pas les problèmes présentés pour le contrôle du pas des pales. La figure ci-dessous montre que pour le contrôle mécanique, le meilleur contrôle est l'application d'une perte d'appui active et d'un contrôle du pas des pales [1.21].

I.5.2 Système de contrôle électrique

Le contrôle électrique est principalement appliqué aux systèmes à vitesse variable et est basée sur la technologie de l'électronique de puissance coté génératrice.

Le contrôle au niveau de la génératrice permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens. La génératrice peut être liée directement ou indirectement au réseau électrique.

Les algorithmes de contrôle MPPT sont une nécessité dans les systèmes WT pour une extraction maximale de l'énergie éolienne disponible en fonction de la vitesse du vent.

Les algorithmes MPPT aident à stabiliser la puissance de sortie lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, protégeant ainsi l'éolienne contre les surcharges et les surtensions. Il existe plusieurs algorithmes MPPT disponibles pour les éoliennes, mais le choix de l'algorithme dépend de la compétence de l'utilisateur. Chacun de ces algorithmes à ses propres mérites et démérites [1.22].

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

Les progrès réalisés en matière d'interfaces électroniques de puissance ont contribué à diverses améliorations dans le contrôle des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

Le diagramme de contrôle dans la chaîne de conversion de type éolien est présenté dans la figure 1.10

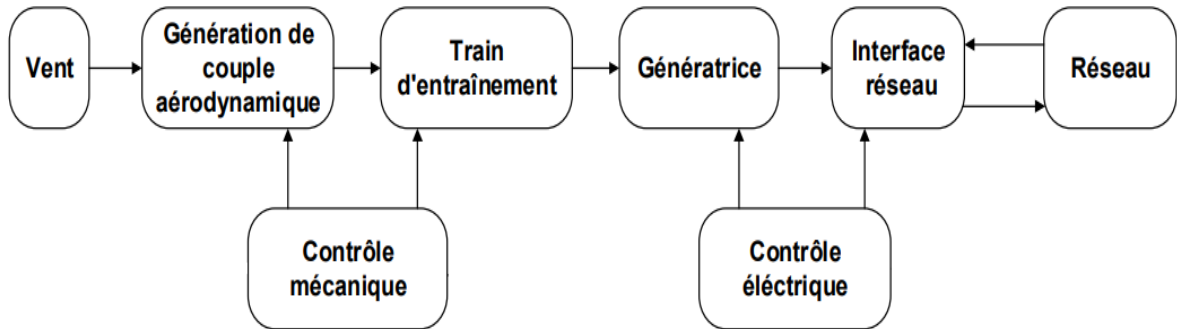


Figure 1.10 Diagramme de contrôle d'une chaîne de conversion de type éolien.

I.6 Conclusion

Ce chapitre était dédié aux notions générales sur l'énergie éolienne. Tout d'abord, nous avons parlé des différents types d'éolienne : à axe vertical, à axe horizontal, à vitesse fixe et à vitesse variable. Ensuite, les différents composants de l'éolienne ont été présentés ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque type de générateur. En fin, nous avons argumenté le choix d'un aérogénérateur à axe horizontal à vitesse variable couplé directement à la turbine donc sans multiplicateur de vitesse.

Dans le chapitre suivant, nous allons procéder à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne.

I.7 Références bibliographiques

- [1.1] W. e.V., Global Statistics. Retrieved from Wind Energy International (2018). Available <https://library.wwindea.org/> [Google Scholar]
- [1.2] Get-invest.eu. (2019). Global Market Outlook 2019–2023. Retrieved from get-invest.eu: <http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/SolarPower-Europe-Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf> [Google Scholar]
- [1.3] Li H, Chen Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons. IET Renew Power Generation 2008;2(2):123–38.
- [1.4] Polinder H, van der Pijl FFA, de Vilder GJ, Tavner PJ. Comparison of direct drive and geared generator concepts for wind turbines. IEEE Trans Energy Convers 2006;21(3):725–32.
- [1.5] Boroumand Jazi G, Rismanchi B, Saidur R. Technical characteristic analysis of wind energy conversion systems for sustainable development. Energy Convers Manage 2013; 69 :87–94.
- [1.6] Chen Z, Guerrero JM, Blaabjerg F. Review of the state of the art of power electronics for wind turbines. IEEE Trans Power Electron 2009;24(8): 1859–75.
- [1.7] Abdul Salam Darwish, Riadh Al-Dabbagh, Wind energy state of the art: present and future technology advancements, Renew. Energy Environ. Sustain. 5, 7 (2020)
- [1.8] L. Fried, Wind Power to dominate power sector growth (2016). Retrieved from Global Wind Energy Council: <https://gwec.net/wind-power-to-dominate-power-sector-growth/>
- [1.9] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M, Timbus AV. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. IEEE Trans Industrial Electron 2006;53(5):1398–409.
- [1.10] E. de Vries, “6 - wind turbine drive systems: a commercial overview,” in Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems, ser. Woodhead Publishing Series in Energy, M. Mueller, and H. Polinder, Eds. Woodhead Publishing, 2013, pp. 139 – 157.
- [1.11] Bansal, R.C., Bhatti, T.S., and Kothari, D.P. (2002) ‘On some of the design aspects of wind energy conversion systems’, Int. Journal of Energy Conversion and Management, Nov. Vol. 43, No. 16, pp. 2175-2187.
- [1.12] H. A. Khazdozian, R. L. Hadimani, and D. C. Jiles, “Size reduction of permanent magnet generators for wind turbines with higher energy density permanent magnets,” in 2014 North American Power Symposium (NAPS), Sept 2014, pp. 1–6.
- [1.13] Singh, B. (1995) ‘Induction generator-a prospective’, Electric Machines and Power Systems, Vol. 23, pp. 163-177.
- [1.14] Ibrahim Guenoune. Commandes non linéaires robustes de systèmes éoliens. Automatique. École centrale de Nantes; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018. Français.
- [1.15] Bensalah, A., Benhamida, M. A., Barakat, G., & Amara, Y. (2018). *Large wind turbine generators: State-of-the-art review. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*.

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

- [1.16] National Electrical Manufacturers Association, ANSI C 84.1- 1995, Electrical Power System and Equipment-Voltage Regulation, 1995.
- [1.17] Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE std. P1547/07.
- [1.18] E. de Vries, "6 - wind turbine drive systems: a commercial overview," in *Electrical Drives for Direct Drive Renewable Energy Systems*, ser. Woodhead Publishing Series in Energy, M. Mueller, and H. Polinder, Eds. Woodhead Publishing, 2013, pp. 139 – 157.
- [1.19] Johnson, G.L. (1978) 'Economic design of wind electric generators', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, March/April, Vol. PAS-97, No. 2, pp. 554-562.
- [1.20] C. C. Pavel, R. Lacal-Arantequi, A. Marmier, D. Sch ¨ ueler, E. Tzimas, M. Buchert, W. Jenseit, and D. Blagoeva, "Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines," *Resources Policy*, vol. 52, pp. 349 – 357, 2017.
- [1.22] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- [1.22] Apata, O., & Oyedokun, D. T. O. (2020). An overview of control techniques for wind turbine systems. *Scientific African*, 10.

II. Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

Les nouveaux défis techniques qui apparaissent en raison de la pénétration accrue de l'énergie éolienne, de la stabilité dynamique et de la qualité de l'énergie impliquent la recherche de modèles plus réalistes et plus précis pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne, donc La modélisation mathématique est fondamentale pour bien comprendre, anticiper le comportement et la maîtrise des systèmes.

Après avoir présenté l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne nous nous attachons dans ce chapitre à la modélisation de différents éléments qui constituent le système de conversion d'énergie éolienne. Cela comprend les modèles aérodynamiques, mécaniques, électriques (la génératrice synchrone à aimants permanents, le redresseur) et de vitesse du vent.

II.1 Introduction

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne sont des systèmes complexes qui convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique et en énergie électrique. La puissance de sortie est définie avec des facteurs de base tels que la vitesse du vent, la forme et la dimension de l'éolienne. Le modèle dynamique d'une éolienne doit contenir des paramètres définissant son comportement, avec son fonctionnement ainsi établie, il est possible de contrôler les performances de l'éolienne pour obtenir les caractéristiques souhaitées. En ce qui concerne la production d'énergie éolienne, les turbines ayant des caractéristiques différentes jouent un rôle important dans la production d'électricité [2.1].

II.2 Modèle dynamique du système éolien

La figure (2.1) illustre le diagramme schématique du système d'éolienne proposé. Le système se compose d'une turbine et une génératrice à aimant permanent couplée à un bus continu à travers un redresseur de puissance MLI.

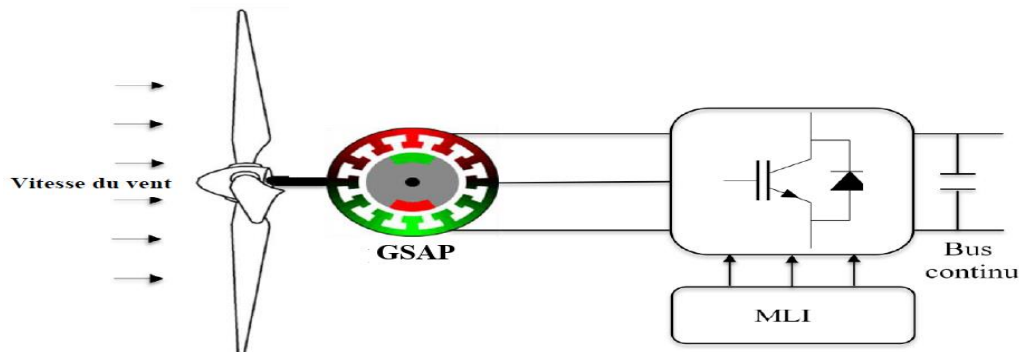


Figure 2.1 Diagramme schématique du système de conversion.

Un système éolien complet peut être subdivisé en composants suivants :

1. Modèle du vent,
2. Modèle de la turbine,
3. Modèle d'arbre et de boîte de vitesse,
4. Modèle de générateur,
5. Modèle de convertisseur,
6. Modèle du système de contrôle.

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

Les trois premiers composants forment la partie mécanique de l'éolienne. Le générateur forme la liaison électromécanique entre la turbine et le système d'alimentation et le système de commande qui contrôle la sortie du générateur.

Le modèle du système de commande comprend la dynamique de l'actionneur impliqué, qui sont dans notre cas les convertisseurs qui contrôlent le générateur à aimant permanent.

II.2.1 Modèle de profil du vent

La vitesse du vent est caractérisée par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par : l'emplacement, les conditions climatiques, la hauteur au-dessus du sol et la typographie de la surface. Les éoliennes interagissent avec le vent, elles captent une partie de l'énergie cinétique et la convertissent en énergie utilisable. Une modélisation précise de la vitesse du vent est difficile en raison de la variation imprévue de la vitesse du vent qui dépend de l'emplacement géographique et des conditions atmosphériques [2.2].

Dans le cas de l'énergie éolienne le vent est la cause de la production d'énergie, donc il faut le modéliser, les équations mathématiques du vent peuvent être simples, comme ils peuvent être très compliquées à cause des turbulences ;

La méthode de génération du profil de la vitesse du vent est celle qui décrit les variations du vent à l'aide de la densité spectrale, établie par le météorologue *I. Van der Hoven*. Dans ce modèle, la composante de turbulence est considérée comme un processus aléatoire stationnaire et donc elle ne dépend pas de la variation de la moyenne de la vitesse du vent, [2.3] [2.4] [2.5] [2.6]. La variation de la vitesse du vent $v(t)$ est donc écrite sous forme de la somme des harmoniques correspondant à chaque pulsation w_n avec une phase ϕ_i déterminée de façon aléatoire [2.7] :

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i a_n \sin(w_n t) \quad 1.1$$

Avec :

A : Vitesse moyenne du vent (m/s),

a_n : Amplitude de l'harmonique d'ordre n

w_n : Pulsation de l'harmonique de d'ordre n

i : Dernière itération des harmoniques.

II.2.2 Modèle de Turbine

Le flux d'air autour de la turbine est illustré à la figure (2.2).

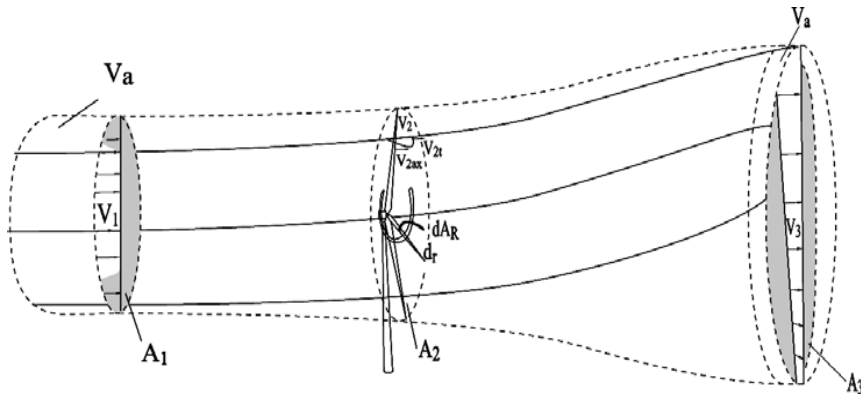


Figure 2.2. Le flux d'air autour de la turbine.

Où :

V_a = élément de volume du flux d'air

V_1 = vitesse du vent loin en amont non distribuée

V_2 = vitesse du vent à la turbine

V_3 = turbine éolienne décélérée loin en aval

A_1 = section transversale de l'écoulement loin en amont

A_2 = Section transversale du débit à la turbine

A_3 = section transversale aval de l'écoulement

AR = zone de décalage du rotor.

La puissance du vent est :

$$P_w = \frac{dW_w}{dt} \quad 1.2$$

L'énergie tirée par l'éolienne est :

$$W_w = V_a \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_3^2) \quad 1.3$$

Où :

W_w = énergie tirée par l'éolienne et

ρ = densité de l'air.

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

L'équation (1.2) devient :

$$P_w = \frac{d(V_a \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_3^2))}{dt} \quad 1.4$$

Un débit d'air dans la zone du rotor :

$$\frac{dV_a}{dt} = A_R V_2, (A_2 = A_R) \quad 1.5$$

Les rendements à l'état quasi-stationnaire :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_R (V_1^2 - V_3^2) V_2 \quad 1.6$$

Selon la loi de Betz (2006), la puissance maximale des éoliennes [2.8] :

$$P_t = \frac{16}{27} A_R \frac{\rho}{2} V_1^3 \quad 1.7$$

L'équation (1.7) est obtenue quand :

$$V_2 = \frac{2}{3} V_1 \text{ et } V_3 = \frac{1}{3} V_1$$

Le modèle de la turbine représente la capture de puissance par la turbine. La puissance du vent (P_w) dans une zone est donnée par :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_R V_w^3 \quad 1.8$$

Avec :

$$A_R = \pi R^2.$$

R : rayon des pales.

V_w : la vitesse du vent.

Cependant, la turbine ne capte qu'une fraction de cette puissance. La puissance captée par la turbine (P_t) peut être exprimée comme suite [2.9] :

$$P_t = P_w \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad 1.9$$

Où : C_p est une fraction appelée coefficient de puissance et β est l'angle de calage.

Le coefficient de vitesse réduite λ (tip speed ratio) est un facteur spécifique des aérogénérateurs. λ est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales comme est montré dans la Figure (2.3).

λ Est défini comme :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v_{wind}} \quad 1.10$$

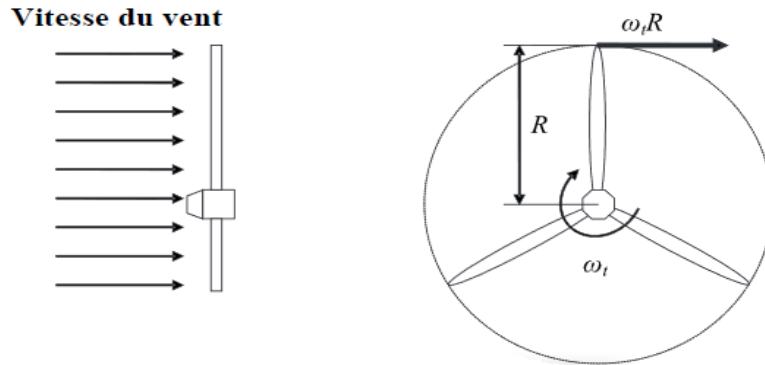


Figure.2.3. Vitesse spécifique du rotor

Le coefficient de puissance représente une fraction de la puissance du vent captée par la turbine, la figure 2.3 montre une courbe typique du rapport C_p en fonction de la vitesse réduite. C_p change avec différentes valeurs de l'angle de pas, mais la meilleure efficacité est obtenue pour $\beta = 0$ [10].

Dans l'étude rapportée dans cette thèse, on suppose que l'angle de calage du rotor est fixe et égal à zéro.

La courbe du coefficient de puissance a été décrite par différentes équations ajustées dans la littérature [2.8] [2.9] [2.10]. Dans cette étude, la courbe C_p est approximée analytiquement selon [2.8] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \quad 1.11$$

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

C1	C2	C3	C4	C5	C6
0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

Tableau 2.1 : Paramètres du coefficient de performance.

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad 1.12$$

La limite supérieure théorique du coefficient de puissance C_{pmax} est fournie par la loi de Betz:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.5926$$

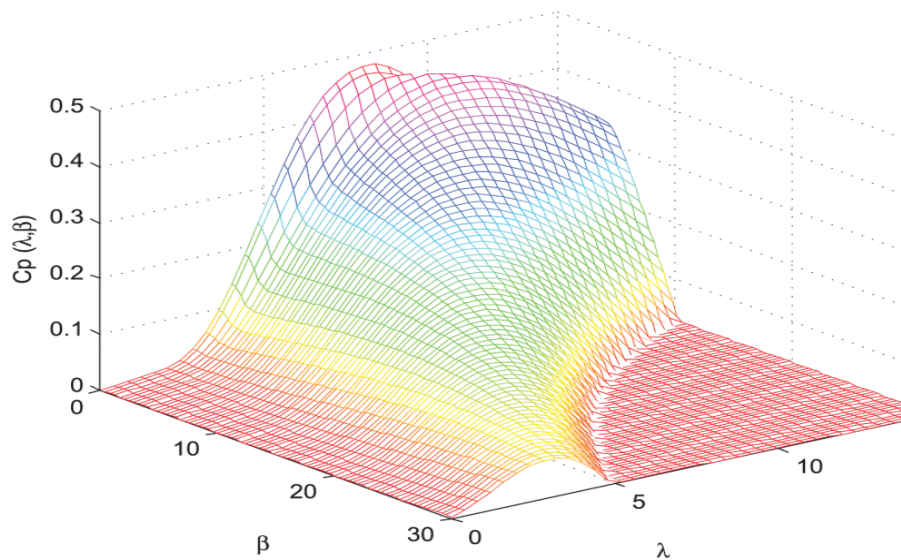


Figure 2.4 La courbe typique du rapport Cp en fonction de la vitesse réduite

Le graphique de la Figure 2.5 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p normaux en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes :

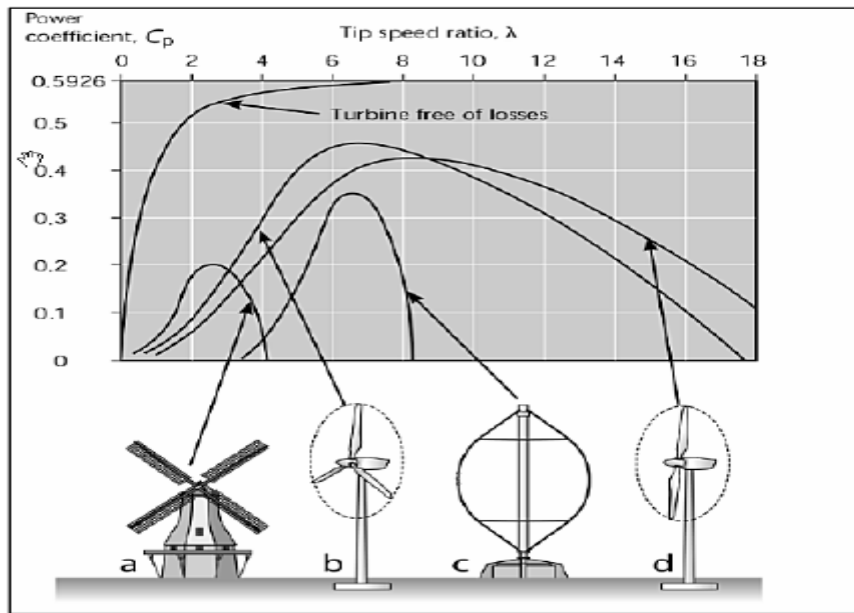


Figure 2.5 les coefficients de puissance C_p normaux en fonction de la vitesse réduite λ

D'après la figure 2.5 on peut remarquer que dans le cas des éoliennes à axe horizontal, les valeurs maximales du C_p ont lieu pour des valeurs de λ plus élevées. En conséquence, pour une vitesse de vent donnée, le rotor doit tourner à une vitesse relativement plus élevée pour atteindre les meilleures valeurs de rendement aérodynamique. Cette propriété est convenable pour l'association à un générateur, car, dans le cas où il est nécessaire, le rapport de transformation de la boîte de vitesses peut être plus faible.

On peut distinguer aussi que le point optimal ($C_{p_{opt}} - \lambda_{opt}$) pour chaque éolienne est un point précis et unique, ce qui est mis à profit par quelques systèmes de commande (commande d'angle de calage et commande du générateur) chargés de suivre ce point au mieux pour optimiser le fonctionnement et maximiser la puissance produite et l'énergie fournie.

A partir d'une courbe $C_p - \lambda$, un graphique montre la puissance P en fonction de la vitesse de rotation ω pour différentes vitesses de vent, peut être représenté comme suit :

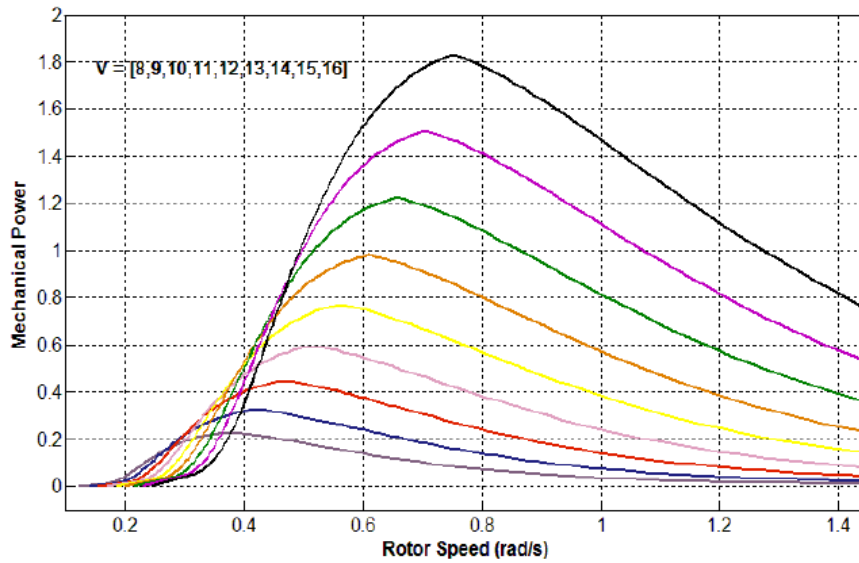


Figure 2.6 Caractéristiques de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation

La figure 2.6 montre que la puissance mécanique convertie par la pale de l'éolienne est en fonction de la vitesse de rotation, et que la puissance convertie est maximale à la vitesse de rotation particulière pour différentes vitesses de vent.

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure 2.7

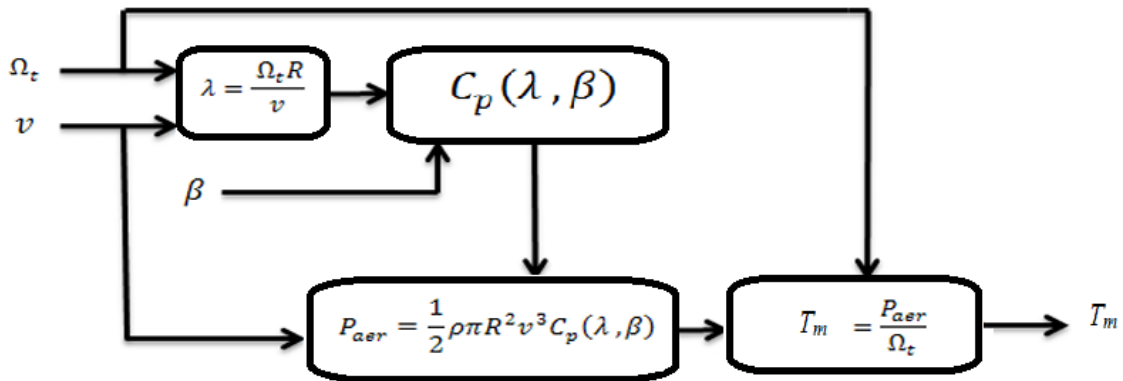


Figure 2.7 Schéma fonctionnel du modèle d'éolienne aérodynamique

II.2.3 Modèle d'arbre et de boîte de vitesses

La turbine est reliée au rotor du générateur par une boîte de vitesses. La boîte de vitesses est utilisée pour augmenter les faibles vitesses angulaires de la turbine (normalement environ 25 à 30 tr / min) aux vitesses de rotation élevées du générateur (normalement autour de 1800

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

tr/min). La figure 2.7 montre le modèle de l'arbre de transmission et de la boîte de vitesses, avec tous les couples agissant sur le système et les vitesses angulaires des différentes masses [2.11]

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suit :

$$\Omega_t = G\Omega \quad 1.13$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplication pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur :

$$\Omega_t = G\Omega T_G = \frac{1}{G} T_m \quad 1.14$$

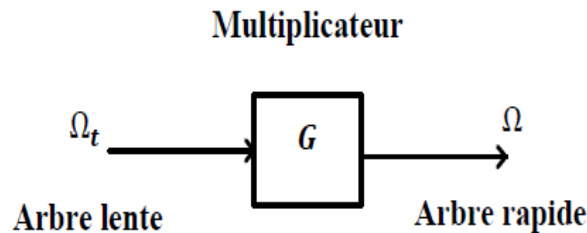


Figure.2.6. Modèle du multiplicateur.

Dans l'étude de cette thèse, nous supposons que le rapport de multiplicateur est égal à 1, donc la turbine est liée directement au générateur

Alors on obtient :

$$\Omega_t = \Omega$$

$$T_G = T_m$$

L'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total T_m appliqué au rotor de turbine éolienne est déterminé par l'équation fondamentale de la dynamique :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J_T} T_e + \frac{D_T}{J_T} \Omega_t - \frac{1}{J_T} T_t \quad 1.15$$

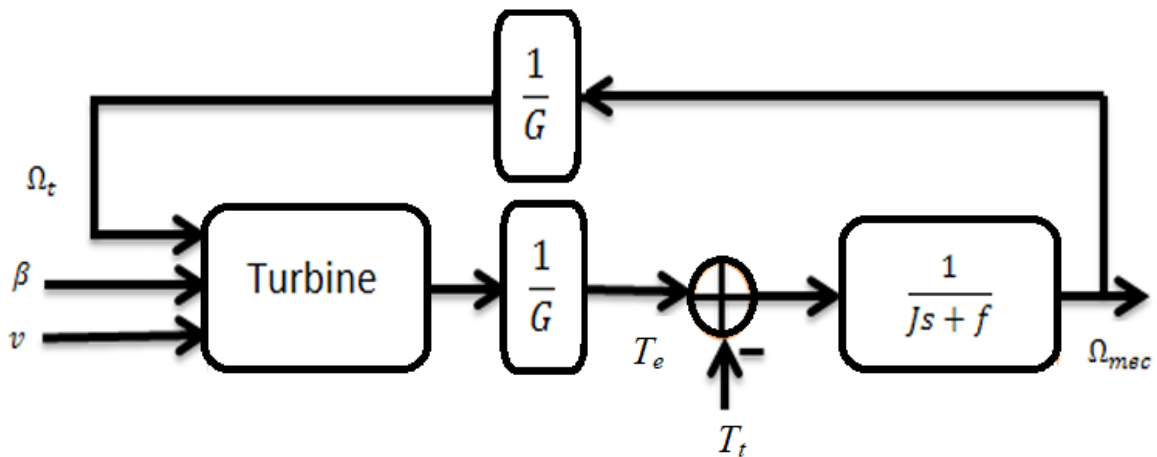


Figure 2.7 Modèle d'arbre et de boîte de vitesses

II.2.4 Modélisation de La génératrice

Le générateur synchrone PMSG est un choix coûteux et une construction complexe, mais avec de nombreuses opportunités pour son application dans les systèmes de conversion d'énergie éoliennes [2.12]. La présence d'un circuit d'excitation pour les machines synchrones à rotor bobiné entraîne l'utilisation de contacts glissants au rotor. Pour cela, on préfère souvent remplacer ce bobinage par des aimants permanents. La plupart des aimants permanents sont fabriqués à partir de terres rares et sont par conséquent très coûteux.

Leur utilisation soit de plus en plus fréquente, la limitation des ressources localisées et les problèmes environnementaux liés à l'exploitation et le traitement des terres rares font augmenter sur le long terme le prix de ces aimants permanents.

De plus, les fortes variations de couple électromagnétique de par les fluctuations et des coups du vent, peuvent engendrer une démagnétisation aimante lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue par ailleurs largement à la diminution de leur durée de vie [2.13]

Les génératrices synchrones à aimants permanents (PMSM / PMSG) jouent un rôle clé dans les systèmes de production d'énergie éolienne à entraînement direct pour transformer la puissance mécanique en énergie électrique. Une modélisation mathématique rigoureuse du PMSG est la condition préalable à la conception des algorithmes de commande de la machine ainsi qu'à l'analyse des caractéristiques en régime permanent et dynamique des systèmes de

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

conversion d'énergie éolienne. Dans cette section, le modèle mathématique d'un PMSG dans le cadre de référence stationnaire triphasé naturel abc et le cadre de référence à rotation synchrone dq sera donnée, et l'analyse de la puissance et du couple des PMSG sera également donnée.

a. Modélisation de la MSAP dans le repère (abc)

La génératrice synchrone à aimants permanents est un système complexe, dont la modélisation obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes [2.14] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et d'encoche négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- La FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La perméabilité magnétique des parties ferromagnétiques est supposée infinie.

Avant de donner le modèle mathématique du PMSG, plusieurs hypothèses importantes doivent être faites :

- L'effet d'amortissement dans les aimants et dans le rotor est négligeable ;
- Les effets de saturation magnétique sont négligés ;
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- La force électromotrice arrière (EMF) induite dans les enroulements du stator est sinusoïdale ;
- Par souci de simplicité, toutes les équations des PMSG sont exprimées en notation moteur (consommateur / charge), c'est-à-dire que le courant négatif prévaudra lorsque le modèle se réfère à un générateur. Un courant négatif signifie qu'à la polarité positive de la borne d'un appareil, le courant est hors de cette borne.

La figure 2.8 présente la structure de la triphasé bipolaire d'un PMSG. Les axes abc fixes désignent la direction des MMF (f_a, f_b et f_c) des enroulements de phase a, b et c, qui sont

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

induits par les courants alternatifs triphasés variant dans le temps dans ces enroulements de phase de stator. Le flux provoqué par l'aimant permanent est dans la direction de l'axe d fixé au rotor. Ici, les axes dq tournent à la même vitesse angulaire des PM et du rotor. En outre, φ_r désigne l'angle entre l'axe d et l'axe à stationnaire

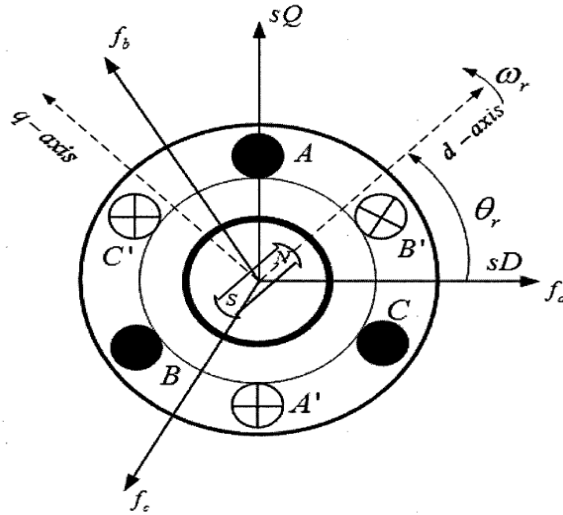


Figure 2.8 Vue en coupe du PMSM.

La relation dans l'espace d'état des tensions aux bornes de la machine à aimant permanent en fonction des courants de phase et des flux de phase dues aux aimant permanent et aux courants de stator peut s'écrire comme suit [2.15] :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} \quad 1.16$$

Où :

v_{as}, v_{bs} et v_{cs} : les tensions statoriques triphasées instantanées

i_{as}, i_{bs} et i_{cs} : les courants statoriques triphasés instantanés

R_s : la résistance de l'enroulement du stator par phase

ψ_{as}, ψ_{bs} et ψ_{cs} : les flux traversant les bobines statoriques, qui peuvent être exprimées sous forme expansée comme suit [2.16] :

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_r \cos(\theta_r) \\ \psi_{bs} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_{cs} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad 1.17$$

Où :

L_{aa}, L_{bb} et L_{cc} : sont les self-inductances des trois phases a, b et c,

L_{ab}, L_{ac} et L_{ba}, L_{bc}, L_{ca} et L_{cb} : sont les inductances mutuelles entre ces phases, tandis que, est la liaison de flux du rotor causée par les bobines statoriques. Les self-inductances et mutuelles inductances sont toutes des fonctions de θ_r . Ainsi, toutes les inductances sont des paramètres variant dans le temps.

b. Modélisation du PMSG dans le référentiel à rotation synchrone des axes dq

Le comportement des machines triphasées est généralement décrit par leurs équations de tension et de courant. Les coefficients des équations différentielles qui décrivent leur comportement varient dans le temps (sauf lorsque le rotor est immobile). La modélisation mathématique d'un tel système tend à être complexe puisque les liaisons de flux, les tensions induites et les courants changent continuellement lorsque le circuit électrique est en mouvement relatif. Pour l'analyse d'une machine électrique aussi complexe, des transformations mathématiques sont souvent utilisées pour découpler les variables et résoudre les équations impliquant des quantités variant dans le temps en ramenant toutes les variables à un cadre de référence commun.

La transformation de Park c'est une transformation mathématique qui vise à simplifier l'analyse des modèles de machines synchrones et a été introduite pour la première fois par R. H. Park en 1929. Dans les systèmes triphasés comme les PMSG, les quantités de phase qui comprennent les tensions statoriques, les courants statoriques et les liaisons de flux, sont des quantités variables dans le temps.

En appliquant la transformation de Park, qui est essentiellement la projection des grandeurs de phase sur un référentiel rotatif à deux axes, les grandeurs AC sont transformées en quantités DC indépendantes du temps. La transformation abc en $dq0$ peut être exprimée sous forme matricielle comme suit :

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad 1.18$$

Considérant que dans des conditions équilibrées, $u_0=0$, la fonction de tension du PMSM dans le cadre de référence des axes dq peut être exprimée comme suit [2.15]:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega L_q i_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} - \omega L_d i_{ds} + \omega \Psi_r \end{cases} \quad 1.19$$

Où v_{ds} , et v_{qs} sont les tensions instantanées du stator dans le cadre de référence des axes d, q , et i_{ds}, i_{qs} sont les courants instantanés du stator dans le cadre de référence des axes d, q . Ici L_d et L_q sont les inductances des axes dq , et ω est la vitesse angulaire électrique du rotor, Ψ_r est la liaison de flux de phase pic / maximum due aux PM montés sur le rotor. Selon les expressions (2.14) et (2.15), les circuits équivalents du PMSG dans le cadre de référence des axes dq peuvent être dessinés comme le montre la figure 2.9 :

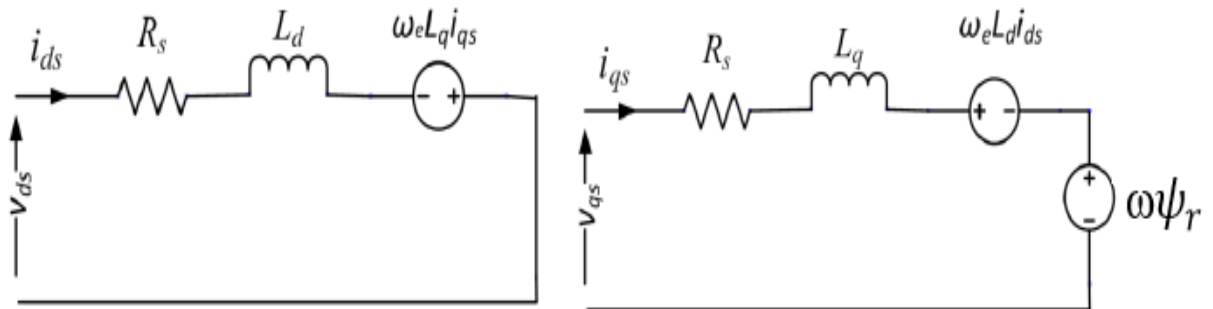


Figure 2.9 Les circuits équivalents des axes dq d'un PMSG

Les flux magnétiques du stator sur les axes d et q respectivement sont donnés par [2.17]:

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \Psi_{dm} \\ \Psi_{qs} = L_{qs} i_{qs} + \Psi_{dm} \end{cases} \quad 1.20$$

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

Où :

- L_{ds}, L_{qs} : les inductances du stator sur les axes d et q respectivement.

- Ψ_{dm}, Ψ_{qm} : les composantes du flux magnétique généré aux pôles de la machine.

Lorsque, le référentiel tournant synchrone est orienté avec le champ magnétique généré par les pôles magnétiques de la machine, alors la composante du flux magnétique dans l'axe q est nulle ($\Psi_{qm} = 0$), tandis que dans l'axe d , il est égal au flux magnétique produit par les aimants permanents ($\lambda\Psi_m = 0$) dont la valeur est constante ($d\Psi_m/dt = 0$) et peut être obtenue à partir des paramètres et des données indiquées sur la plaque signalétique de la machine [2.18].

c. Analyse de la puissance et du couple de la PMSG

Pour toute machine asynchrone à aimant permanent, la puissance électrique d'entrée peut être exprimée dans le référentiel abc par la relation suivante :

$$P_s = v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} \quad 1.21$$

Ou dans le cadre de référence des axes dq comme suit :

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \quad 1.22$$

En tant que partie de la puissance d'entrée, en mode moteur, la puissance active est la puissance qui est transformée en puissance mécanique par la machine, qui peut être exprimée comme suit :

$$P_{em} = \frac{3}{2}(e_d i_{ds} + e_q i_{qs}) \quad 1.23$$

Où :

$$\begin{cases} e_d = -\omega_e L_q i_{qs} = \omega_e \psi_q \\ e_q = -\omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \psi_r = \omega_e \psi_d \end{cases} \quad 1.24$$

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

Ici e_d et e_q sont les composantes de F.E.M. dans le cadre de référence des axes dq , et ψ_d, ψ_q sont les liaisons de flux des axes dq .

En remplaçant les expressions (1.22) dans (2.21), la puissance active peut être ré-exprimée comme suit :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_e (\psi_q i_{qs} + \psi_d i_{ds}) \quad 1.25$$

Ainsi, le couple électromagnétique développé par un PMSM peut être déduit comme suit :

$$T_e = p(\psi_d I_q - \psi_q I_d) \quad 1.26$$

Où p est le nombre de pôles dans la machine.

L'équation mécanique de dynamique de la machine est donnée par l'équation de mouvement suivante :

Afin de compléter le modèle mathématique du PMSG, l'équation mécanique est nécessaire, elle est basée sur l'équation fondamentale de la mécanique :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J_T} T_e + \frac{D_r}{J_T} \Omega_r - \frac{1}{J_T} T_r \quad 1.27$$

II.2.5 Modélisation de convertisseur de puissance

a. Modélisation d'un redresseur MLI

La structure du convertisseur fait appel à un onduleur à MLI fonctionnant en redresseur, désigné sous le nom de redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) également appelé redresseur à PWM (Pulse Width Modulation). Ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs MLI [2.19] :

-Redresseur MLI de courant

-Redresseur MLI de tension

Les applications des convertisseurs AC-DC sont de plus en plus nombreuses dans l'industrie, le commerce et les services domestiques. Traditionnellement, les principales parties des

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

convertisseurs sont les diodes et les ponts de thyristors pour redresser le courant alternatif. Ces redresseurs ont l'avantage d'être simples, robustes et peu coûteux. Cependant, ils génèrent des harmoniques et de la puissance réactive dans le côté AC, ce qui entraîne une distorsion de la tension, un mauvais facteur de puissance du côté de l'alimentation et une sortie DC ondulée variant lentement du côté DC. Par conséquent, un redresseur PWM triphasé (Figure 2.10) est une solution plus intéressante pour les applications industrielles, car il présente plus d'avantages tels que l'ajustement et la stabilisation de la tension de bus continu (DC link), le courant de ligne sinusoïdal, le contrôle du facteur de puissance et le flux de puissance bidirectionnel

La technique PWM fait référence au schéma de commutation spécial à six transistors de puissance d'un convertisseur de puissance triphasé. Elle génère une distorsion harmonique minimale de la forme d'onde des courants [2.20]. Le plus important avantage de cette disposition est le transfert de puissance et la possibilité de contrôler la puissance réactive et la puissance au repos, ce qui est fait séparément pour chaque côté.

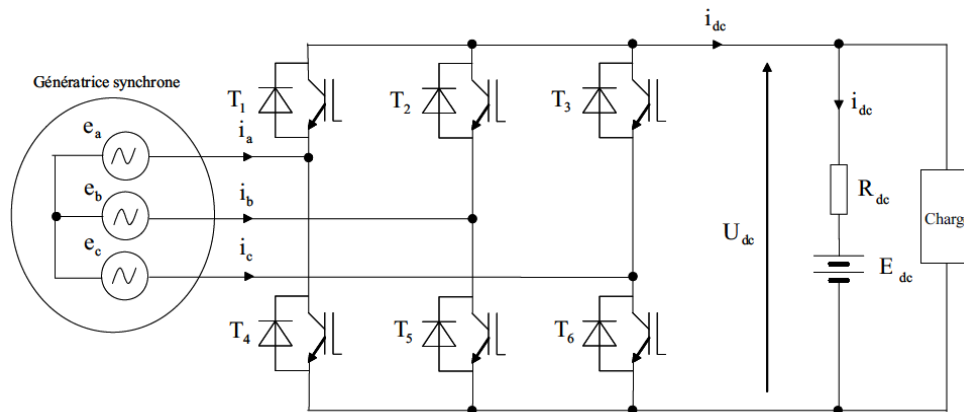


Figure 2.10 Topologies de base du redresseur PWM

Les tensions d'entrée ligne à ligne du redresseur PWM peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ V_{bc} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ V_{ca} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad 1.28$$

Où :

S_a, S_b, S_c sont les états de commutation du convertisseur.

Les tensions de phase sont données par :

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

$$\begin{cases} V_a = f_a V_{dc} \\ V_b = f_b V_{dc} \\ V_c = f_c V_{dc} \end{cases} \quad 1.29$$

Avec :

$$\begin{cases} f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \\ f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{cases}$$

Les équations de tension pour un système triphasé équilibré peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad 1.30$$

V_{ri} : sont les tensions simples triphasées aux bornes du redresseur.

Et pour les courants :

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad 1.31$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad 1.32$$

Les équations de tension dans le repère stationnaire α, β s'écrivent comme suite :

$$\begin{cases} Ri_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} = V_{rd} - V_{dc} S_\alpha \\ Ri_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} = V_{rd} - V_{dc} S_\beta \end{cases} \quad 1.33$$

Et :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \sum_{k=\alpha}^{\beta} S_n i_n - i_{ch} = \frac{3}{2} (S_\alpha i_\alpha + S_\beta i_\beta) - i_{ch} \quad 1.34$$

Où :

$$\begin{cases} S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \\ S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \end{cases} \quad 1.35$$

Les équations dans les coordonnées synchrones dq sont obtenues en utilisant les transformations suivantes :

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad 1.36$$

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad 1.37$$

$$\begin{cases} e_d = R_{id} + L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q - V_d \\ e_q = R_{iq} + L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d + V_q \end{cases} \quad 1.38$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \sum_{k=d}^q S_n i_n - i_{ch} = (S_d i_d + S_q i_q) - i_{ch} \quad 1.39$$

b. Modélisation du bus continu

Le bus continu est la liaison entre les convertisseurs côté grille et côté rotor. C'est un condensateur utilisé pour minimiser les fluctuations de puissance, sa fonction est de maintenir une tension constante aux bornes du convertisseur côté réseau. (Figure 2.11) montre un modèle simplifié d'un bus continu.

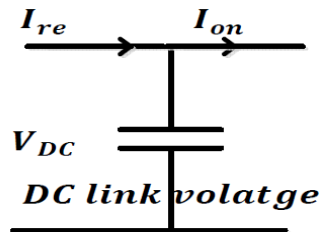


Figure 2.11 Le modèle simplifié d'un bus continu.

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad 1.40$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud ou circulent deux courants modulés par chaque convertisseur ce qui donne :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad 1.41$$

On a également :

$$u_c = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad 1.42$$

Où $u(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant t_0 .

II.3 Les objectifs de la commande des éoliennes

Les éoliennes sont essentiellement des structures flexibles dans un vent stochastique et nous nous attendons à ce qu'elles produisent une puissance maximale tant que la vitesse du vent est inférieure à la valeur nominale, et qu'elles régulent leurs sorties, à savoir la vitesse de rotation du rotor et la puissance générée, lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale. Enfin, elles doivent s'arrêter lorsque la vitesse du vent dépasse une certaine valeur appelée vitesse de coupure. Tous ces objectifs doivent être atteints tout en minimisant les charges dynamiques sur l'ensemble de la structure.

Avant de commencer à définir des stratégies et des méthodes de contrôle pour les éoliennes, nous devons d'abord avoir une compréhension claire des objectifs de contrôle des éoliennes. Par la suite, ces objectifs peuvent être formulés différemment selon les méthodes de contrôle.

L'objectif le plus fondamental de la commande d'une éolienne est de maximiser la puissance produite pendant toute la durée de vie de la machine ou de minimiser le coût par unité de puissance produite. Cela signifie maximiser la puissance capturée (jusqu'à la puissance nominale) et prolonger la durée de vie de l'éolienne. Le premier objectif est obtenu en maintenant le point de fonctionnement proche du point d'efficacité maximale et le second objectif est atteint en minimisant les charges dynamiques sur l'éolienne.

L'utilisation de la commande en régime MPPT : Maximum Power Point Tracking sert à obtenir un fonctionnement idéal et fournir une puissance optimale au bus continu en fonction de la vitesse du vent. Cette stratégie consiste à contrôler la vitesse du rotor pour maintenir la vitesse spécifique λ à sa valeur optimale afin d'obtenir une valeur maximale du coefficient de puissance de la turbine C_p et finalement atteindre la puissance maximale attendue par la turbine éolienne.

Pour la commande de la génératrice à entraînement direct, les informations relatives à la position et à la vitesse du rotor sont nécessaires pour mettre en œuvre des algorithmes de commande avancés tels que la commande vectorielle.

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

La commande vectorielle ou la commande par orientation du flux est la commande standard pour les machines synchrones. Elle consiste à découpler les deux composantes des axes directs d et quadratique q du référentiel tournant, de façon à commander indépendamment le couple et le flux de la machine et d'avoir un couple optimal [2.22].

Dans cette étude la génératrice est pilotée par un convertisseur commandé en MLI, il permet de commander les courants de la génératrice afin d'adapter la vitesse de rotation aux variations du vent.

La commande vectorielle de la machine synchrone comprend deux boucles d'asservissement (Figure 2.12)

- une boucle commandant le courant direct i_d ;
- une boucle pour le courant quadratique i_q .

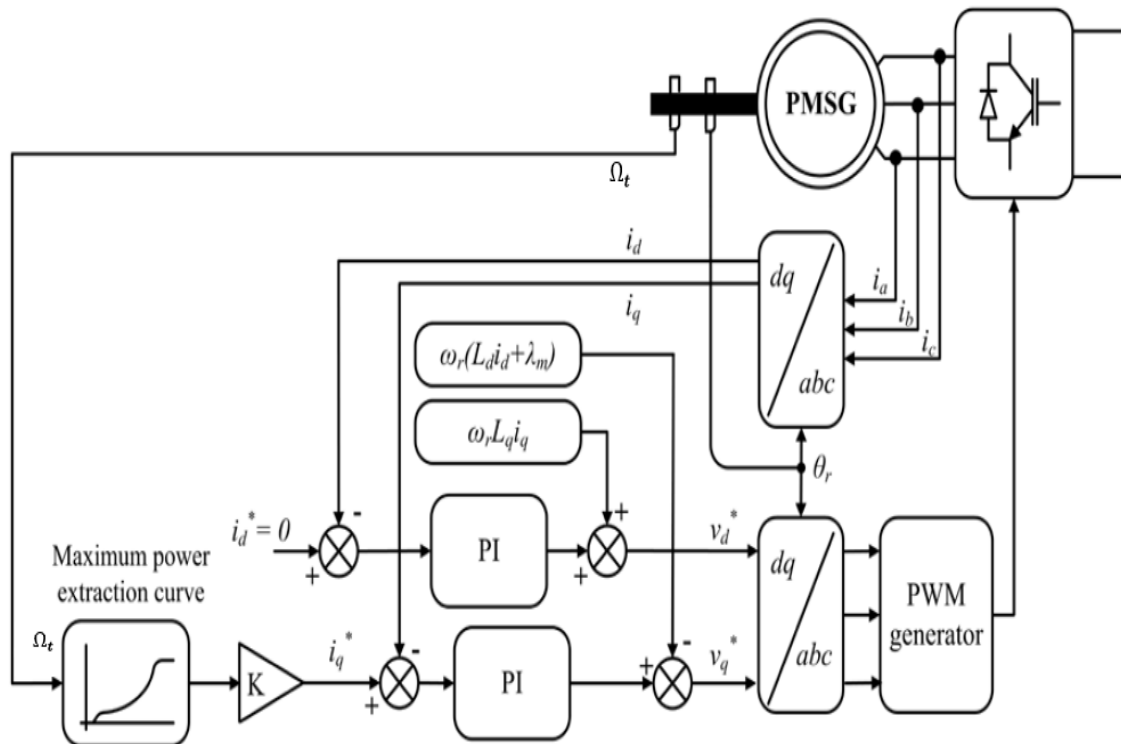


Figure 2.12 Commande vectorielle côté générateur.

II.4 Conclusion

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité devient de plus en plus attractive. La modélisation et la simulation des systèmes de conversion d'énergie éolienne permettent d'étudier les paramètres qui conduisent à des capacités de production d'électricité améliorées. Les différents blocs du système de conversion de l'énergie éolienne ont été étudiés et modélisés. En effet, le modèle de l'éolienne a été présenté, le générateur synchrone à aimant permanent utilisé dans l'éolienne à vitesse variable a été modélisé. On peut conclure que de nombreux facteurs doivent être pris en compte dans la conception des systèmes éoliens.

II.5 Référence bibliographiques

- [2.1] G. L. Johnson, "Wind energy systems", Electronic Edition, December, 2001.
- [2.2] S. R. Bull, "Renewable energy today and tomorrow," *proc. IEEE*, vol. 89, no. 8, pp. 1216-1226, Aug. 2001.
- [2.3] "Technology opportunities to reduce U.S. greenhouse gas emissions," National Laboratory Directors, available: http://www.ornl.gov/climate_change/climate.htm, 1997.
- [2.4] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*. Wiley, 2011.
- [2.5] N.Hodge, "The truth about energy," Available:<http://www.energyandcapital.com/articles/the-truth-about-energy/2535>.
- [2.6] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of WindEnergy Systems*. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [2.7] Mirecki A., Roboam X. and Richardeau F., "Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 660-670, 2007.
- [2.8] F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, "Power electronics converters for wind turbine systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 2, pp708-719, 2012.
- [2.9] Pöschke, Florian, Jens Fortmann, and Horst Schulte (2017), « Nonlinear wind turbine controller for variable power generation in full load region », in: 2017 American Control Conference, Seattle, WA, USA, pp. 1395–1400.
- [2.10] K. Samir, J. Rodriguez, B. Wu, S. Bernet, and M. Perez. "Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies," *Industry ApplicationsMagazine, IEEE*, vol. 18, no. 4 (2012): 26-39.
- [2.11] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro. "Multilevel voltagesource-converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Transactions onIndustrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, 2007.
- [2.12] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PW inverter,"*IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523, 1981.
- [2.13] R. H. Baker, "Bridge converter circuit," U.S. Patent 4 270 163, May 26, 1981.
- [2.14] GHAZEL, A., DE FORNEL, B., et HAPIOT, J. C. Robustesse d'un contrôle vectoriel destructure minimale d'une machine asynchrone. *Journal de Physique III*, 1996, vol. 6, no 7, p. 943-958.
- [2.15] MOBARAKEH, Babak Nahid. Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne des paramètres. Thèse de Doctorat d'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001, vol. 65.
- [2.16] Bharanikumar, R.A., Kumar, N. and Maheswari, K.T (2010) 'Novel MPPT controller for wind turbine driven permanent magnet generator with power converters', *IREE Journal*, August, Vol. 5. No. 4, pp.1555–1562.

Chapitre II : Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

- [2.17] D. Ikni., M. S. Camara., M. B. Camara., B. Dakyo., and H. Gualous, “ Permanent magnet synchronous generators for large scale offshore wind farm connected to grid comparative study between dc and ac configurations,” *Inter. Jour. of Renewable Energy Research, IJRER*, vol. 4, no. 2, pp. pp. 519–527, 2014.
- [2.18] J. Hostettler and X. Wang, “Sliding mode control of a permanent magnet synchronous generator for variable speed wind energy conversion systems,” in *IEEE American Control Conference*, Chicago, IL, USA, July 2015.
- [2.19] M.Sc. Mariusz Cichowlas, « PWM rectifier with active filtering», *Phd Thesis, Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics*. Warsaw; Poland. 2004.
- [2.20] N. Belhaouchet, L. Rahmani, S. Begag and H. Hamla, « Development of digital hysteresis current control with PLL loop gain compensation strategy for PWM inverters with constant switching frequency», *ESRGroups, Journal of Electrical Systems*, Vol. 4, Issue 1, pp. 77-90, 2008.
- [2.21] Malinowski, M. (2001) ‘Sensorless control strategies for three – phase PWM rectifiers’, PhD thesis, Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics.
- [2.22] SEBBA, M., CHAKER, A., MESLEM, Y., et al. Commande en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d’un observateur d’état de Luenberger. In : 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing. 2007.

III. Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Dans ce chapitre les méthodes de commande du convertisseur de puissance côté générateur pour suivre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable à entraînement direct avec la génératrice synchrone à aimant permanent en contrôlant la vitesse de rotation et le couple sont détaillées. L'algorithme de contrôle MPPT (maximum power point tracking) basé sur le rapport optimal de vitesse réduite a été donné. L'asservissement du système par la commande vectorielle est introduit pour contrôler les courants des axes d , q de la génératrice.

III.1 Introduction

En raison des préoccupations environnementales, les sources renouvelables de production d'énergie électrique suscitent un grand intérêt, l'une des plus prometteuses étant l'énergie éolienne. Les éoliennes exploitent cette source d'énergie pour générer directement de l'énergie électrique.

Bien que les éoliennes à générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) atténuent l'impact des boîtes de vitesses, elles nécessitent une grande fiabilité des générateurs et des convertisseurs.

Un système de contrôle est nécessaire pour réguler les éoliennes à vitesse variable. La conception du système de contrôle doit porter à la fois sur la sélection de la stratégie de contrôle et sur la synthèse du contrôleur associé par lequel elle est réalisée. La première concerne les aspects globaux, principalement non linéaires, de la dynamique du système.

L'utilisation appropriée des systèmes de commande des WECS peut permettre une meilleure adéquation en ce qui concerne la diminution des pertes de profit. La capacité des systèmes de contrôle à collecter, analyser et traiter les données de l'éolienne est un problème important pour les WECS.

La stratégie de contrôle d'un système complexe doit prendre compte tenu des objectifs nécessaires à une opération de commande. Dans le système de conversion d'énergie éolienne, l'utilisation d'une commande en régime MPPT est indispensable, vu son rôle important pour extraire le maximum d'énergie produite par le générateur quelle que soit la vitesse du vent, son principe basé sur l'exécution de l'algorithme MPPT qui permet d'atteindre et de suivre le point de puissance maximum MPP.

Plusieurs études et comparaisons se sont attachées à trouver la meilleure stratégie de contrôle de maximisation de la puissance. Par exemple, dans [3.1], deux types de stratégies MPPT ont été identifiés, que les caractéristiques de la turbine soient connues ou non. Pour le premier type, la connaissance des caractéristiques optimales permet de maximiser le transfert d'énergie en contrôlant de manière optimale le couple, la vitesse ou la puissance. Pour le second type, un algorithme MPPT doit être mis en œuvre, qui peut être un algorithme de perturbation et d'observation (P&O), qui contrôle la référence de vitesse du générateur en fonction de l'ampleur et de la direction du changement de puissance active [3.2].

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

En raison des incertitudes et des perturbations, les contrôleurs conventionnels, y compris le contrôleur proportionnel-intégral (PI), ne peuvent pas garantir une performance suffisamment élevée pour le WECS [3.3]. Pour améliorer les performances satisfaisantes du WECS, de nombreuses méthodes de contrôle non linéaires ont été développées, telles que l'intégrale complexe proportionnelle (PCI) [3.4], le contrôleur flou [3.5], le contrôle de la boucle à verrouillage de phase de la trame d-q synchrone [3.6], le contrôle robuste [3.7], le contrôle en mode glissant basé sur le DTC [3.8], etc. Ces approches améliorent les performances de contrôle du WECS sous différents aspects.

Les contrôleurs classiques sont très sensibles aux variations paramétriques. Pour surmonter les problèmes liés aux contrôleurs classiques, un contrôleur logique flou (FLC) a été récemment utilisé pour la production d'énergie éolienne [3.9]. Les approches de systèmes de contrôle basés sur le calcul fractionnaire suscitent un intérêt croissant en raison de leur flexibilité supplémentaire pour la conception et le raffinement des performances. En référence au FO différentiel-intégral, le contrôleur PID classique a été étendu au contrôleur FO-PID [3.10] en instituant deux paramètres supplémentaires (c'est-à-dire l'intégrateur (λ) et le différentiateur (μ)). Le FO-PID est utilisé dans le système d'énergie éolienne en raison de sa plus grande flexibilité et de sa meilleure capacité de réglage [3.11].

III.2 Problématique

Les systèmes d'éoliennes à vitesse variable offrent la possibilité d'extraire la puissance maximale disponible du vent et d'augmenter ainsi la quantité d'énergie captée.

La configuration d'un système de conversion d'énergie éoliennes et les stratégies de contrôle pour le suivi des points de puissance maximale sont les éléments les plus importants pour atteindre l'objectif d'une plus grande efficacité énergétique. Pour capturer le maximum d'énergie du vent disponible, une commande de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est nécessaire pour ajuster la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de la variation de la vitesse du vent, de sorte que le rapport de vitesse en bout de pale puisse être maintenu à sa valeur optimale [3.12].

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Les générateurs à aimant permanent à entraînement direct ont la capacité de fonctionner dans une large plage de vitesse. En fonction de l'intensité du vent, les générateurs d'éoliennes doivent être contrôlés pour fonctionner dans quatre modes différents [3.13], comme le montre la figure 3.1

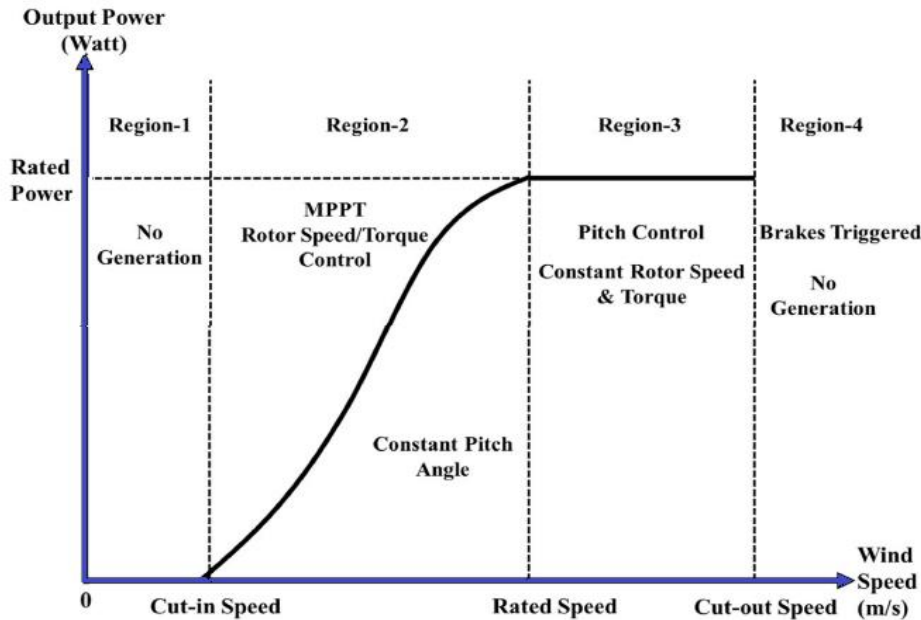


Figure 3.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne

Région 1 : la vitesse du vent est si faible que le démarrage de la turbine n'en vaut pas la peine. Une fois que la vitesse du vent atteint un minimum spécifique à la turbine, qui se situe souvent entre 3 et 5 m / s, la machine démarre.

Région 2 : la vitesse du vent est inférieure à la valeur nominale, qui est la valeur à laquelle l'éolienne atteint pour la première fois sa puissance maximale et se situe généralement aux environs de 12 m / s. Dans cette région, l'éolienne est conçue pour capter autant de puissance que possible en ajustant le couple du générateur pour optimiser le coefficient de puissance.

La puissance du rotor étant donnée par le produit de la puissance disponible (10.1) et du coefficient de puissance (10.2), la puissance générée augmente selon une loi cubique avec la vitesse du vent en supposant aucune perte d'énergie ni dans la boîte de vitesses ni dans le générateur. Dans la région 2, l'angle de pas est souvent contrôlé à la valeur constante qui donne le maximum C_p .

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Région 3 : comme le montre la figure 10.2, la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale. La vitesse du rotor et la puissance du générateur doivent être limitées à leurs valeurs nominales pour éviter d'endommager les composants mécaniques et électriques. Le couple du générateur est souvent maintenu à la valeur nominale, et l'angle d'inclinaison des pales est utilisé pour limiter la puissance aérodynamique en régulant la vitesse de la turbine à la vitesse nominale. L'atténuation de la charge sur les pales et la tour doit être envisagée dans cette région.

Région 4 : Lorsque la vitesse du vent est supérieure à la vitesse de coupure, les freins sont déclenchés pour arrêter l'éolienne et éviter tout dommage structurel ou toute condition dangereuse.

L'expression de la puissance mécanique captée par l'éolienne a été exprimée dans le chapitre 2, Comme le montre l'équation (2.7), pour contrôler la puissance mécanique capturée à une vitesse de vent donnée, le seul terme contrôlable est le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$.

La caractéristique du coefficient de puissance est illustrée à la figure 2.3 comme on peut le voir sur cette figure, les différentes courbes de coefficient de puissance correspondent à des différents angles de pale. Pour chaque cas, il existe un rapport de vitesse de pointe optimal qui contribue à une valeur de coefficient de puissance de pointe qui à son tour, conduit à une capture de puissance maximale. En mode de fonctionnement MPPT, l'angle de calage est généralement maintenu à zéro degré.

Une large revue de la littérature sur le contrôle des éoliennes permet de conclure que la maximisation de la puissance associée à la conversion d'énergie se produit lorsque la vitesse du vent est comprise entre la vitesse du vent d'enclenchement et de la vitesse de coupure.

Le schéma de la technique de commande proposée de l'ensemble du système est représenté sur la figure 3.2 [3.14]

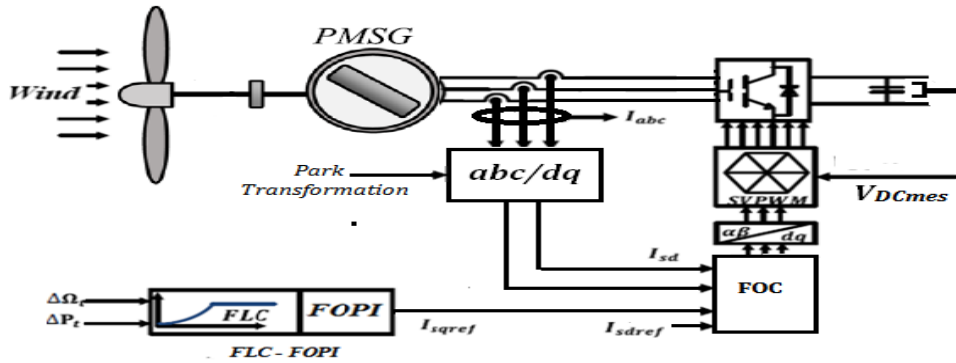


Figure 3.2 Le schéma fonctionnel du contrôleur PI d'ordre fractionnaire fluu.

III.3 MPPT par la commande TSR

Dans cette technique, la vitesse de rotation du rotor du générateur est ajustée de manière à ce que le rapport de vitesse réduite soit constant à sa valeur optimale pour conduit à une capture de puissance maximale. La vitesse du vent est mesurée afin de générer la vitesse de référence Ω_{ref} pour obtenir le rapport optimal de vitesse des pales λ_{opt} . Par la suite, la vitesse de rotation de l'éolienne est contrôlée pour suivre la vitesse de référence.

Bien entendu, chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. Dans cette stratégie particulière, les inconvénients sont l'imprécision de la variation de la vitesse du vent, et le facteur de logiciel approprié pour calculer les variables qui diffèrent pour chaque éolienne, [3.15] ; [3.16].

Afin d'obtenir la valeur de la pointe de coefficient de puissance dans la courbe d'angle de calage à zéro degré de la figure 2.3, le rapport de vitesse de pointe doit être contrôlé à la valeur optimale. D'après l'expression (2.8), le contrôle du rapport de vitesse de pointe est en fait le contrôle de la vitesse du rotor du PMSG.

Un schéma simplifié de contrôle du rapport de vitesse de pointe est illustré à la figure 3.3 A partir de cette figure, les informations de vitesse du vent sont captées par un capteur et envoyées à un microcontrôleur, à partir duquel la vitesse de référence du PMSG peut être calculée en fonction du rapport de vitesse de pointe optimal.

Par conséquent, la vitesse du générateur atteindra sa valeur de référence dans l'état statique, puis la commande MPPT est obtenue.

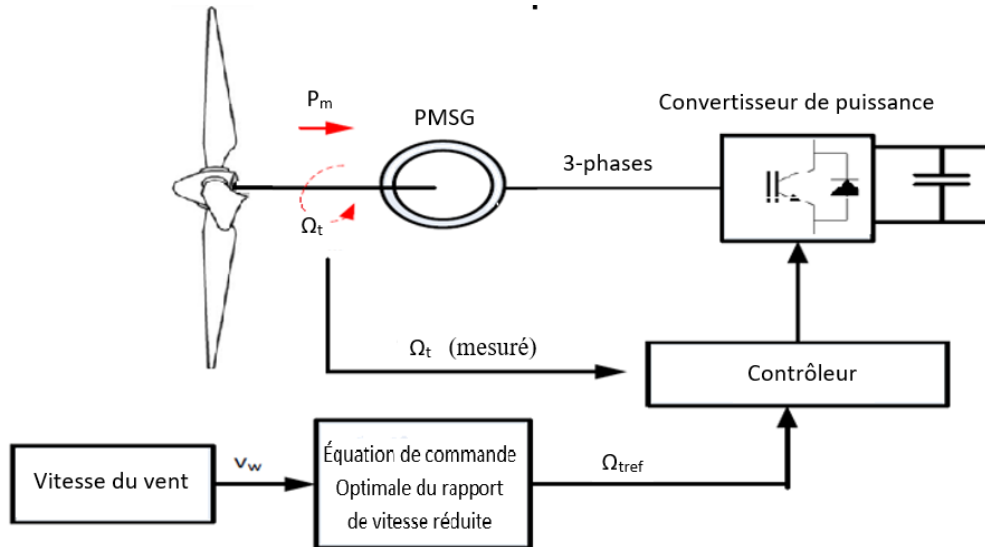


Figure 3.3 Schéma bloc de contrôle du rapport de vitesse réduite (TSR)

La vitesse optimale du rotor ($\Omega_{t,ref}$) peut être facilement calculée pour toute vitesse de vent donnée comme suite :

$$\Omega_{t,ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v_{wind}}{R}$$

La valeur maximale du coefficient de puissance est donnée pour un angle de pas nul et elle est égale à : $C_{p,max} = 0.48$

Correspondance à un rapport de vitesse de pointe optimal spécifique identique à : $\lambda_{opt} = 8.1$

III.4 MPPT par la commande de logique floue (FLC)

La technique MPPT basée sur la logique floue a récemment introduit l'une des méthodes intelligentes utilisées dans les systèmes éoliens pour déterminer et suivre le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale quelle que soit la vitesse du vent.

Par rapport aux techniques de contrôle conventionnelles, ce contrôle est robuste et ne nécessite pas de connaissance exacte du modèle mathématique du système.

Un régulateur flou est constitué de quatre blocs importants : la fuzzification, la base de règles, le mécanisme d'inférence et la défuzzification. [3.17].

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Ainsi, il est caractérisé par des variables d'entrée, des variables de sortie, des fonctions d'appartenance et des règles floues. La figure 3.3 montre le schéma de principe du contrôleur flou :

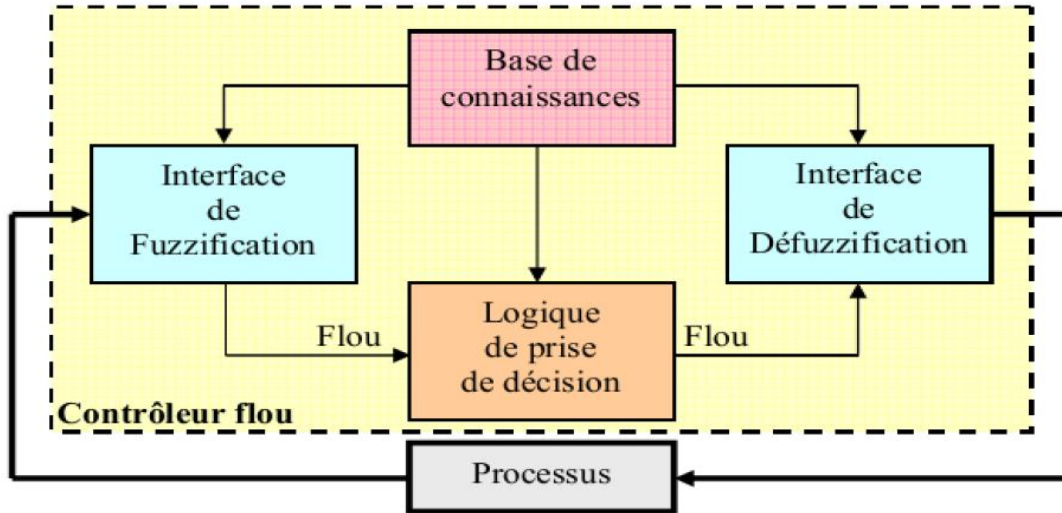


Figure 3.4 Schéma de principe du contrôleur FLC

Le contrôleur FLC proposé a deux entrées (ΔP_t , $\Delta \Omega_t$) et une seule sortie (Ω_{tref}). Ils sont respectivement donnés par :

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_t(k) &= P_t(k) - P_t(k-1) \\ \Delta \Omega_t(k) &= \Omega_t(k) - \Omega_t(k-1) \\ \Omega_{tref}(k) &= \Delta \Omega_{tref}(k) + \Omega_{tref}(k-1) \end{aligned} \right\} \quad 3.1$$

Avec k : instant d'échantillonnage.

Ces variables d'entrée et de sortie sont normalisées respectivement dans les plages $[-1, 1]$, $[-6, 6]$ et $[-0.1, 0.1]$ en fonction du comportement du système.

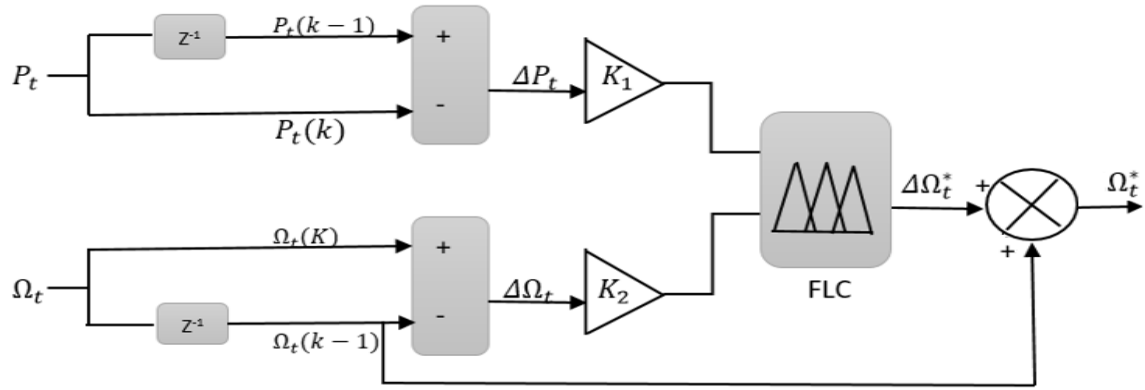


Figure 3.5 MPPT basé sur la commande floue

Avec : K_1 et K_2 sont les facteurs d'échelle normalisés respectifs des deux entrées et de la sortie [3.14].

1) Fuzzification

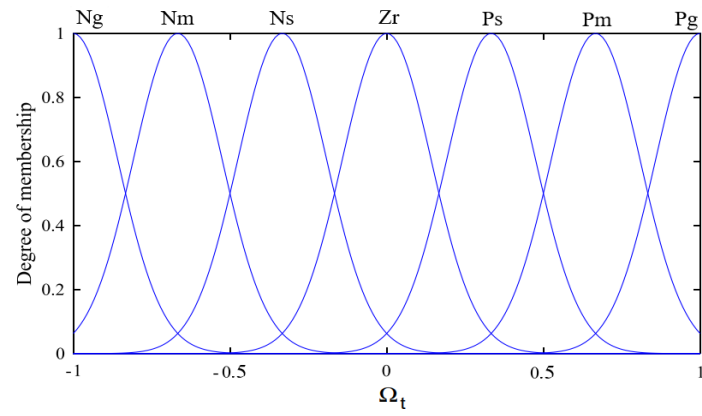
Le premier processus du contrôleur flou est la fuzzification, ce bloc redimensionne les données floues d'entrée dans l'univers normalisé du discours $[-1, 1]$ par le facteur d'échelle. Ensuite, il convertit chaque donnée d'entrée en degrés de fonction d'appartenance. Chaque fonction d'appartenance est identifiée par une valeur linguistique. La fonction d'appartenance est caractérisée par des formes, une position et une largeur ou un chevauchement [3.18], [3.17].

L'opération de fuzzification introduit le mécanisme d'inférence de Mamdani [3.19] pour construire les règles floues. Quarante-neuf règles avec sept ensembles flous ont été utilisées dans ce contrôleur sont :

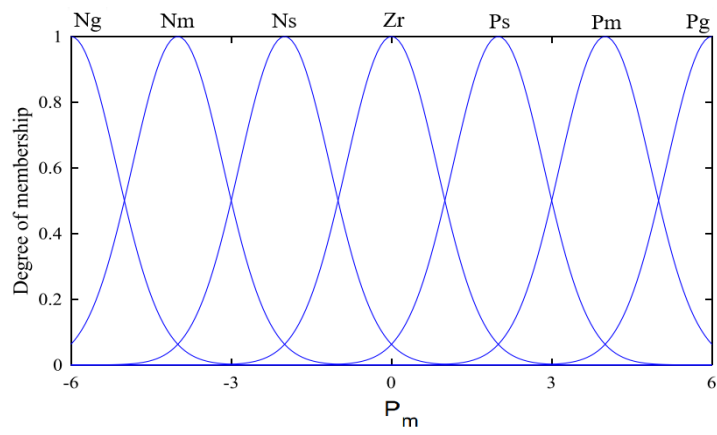
- Ng : (Négative grand) ;
- Nm (milieu négatif) ;
- Ns (petit négatif) ;
- Zr (zéro) ;
- Ps (petit positif) ;
- Pm (milieu positif) ;
- Pg (grand positif).

Les fonctions d'appartenances utilisées dans la conception du FLC sont illustrées dans les figures suivantes :

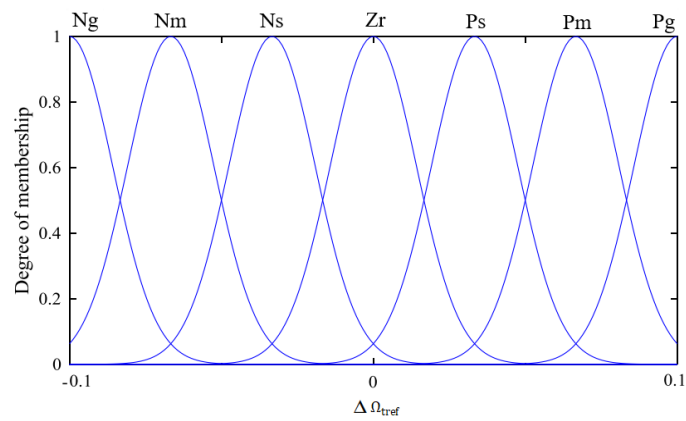
Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne



(1)



(2)



(3)

Figure 3.6 fonction d'appartenance des entrées (1) Ω_t , (2) P_m et la sortie (3) $\Delta\Omega_{tref}$

2) Base de règles floues

La base de règles floues est la connaissance des opérateurs humains qui apportent les changements nécessaires à la sortie du contrôleur pour un système avec une erreur de réponse minimale et plus rapide [3.20].

Les règles de base floues, qui associent la sortie floue à l'entrée floue, sont dérivées du comportement souhaité du système et de la stratégie de contrôle conçue. Les règles sont conçues de telle sorte que le contrôleur recherche toujours un point de puissance maximale, sans s'arrêter.

Après, lors de la phase de fuzzification des entrées, une machine d'inférence floue est définie par l'ensemble des règles SI-ALORS (IF-THEN) pour relier les entrées à la sortie. Basé sur la connaissance exacte et précise du comportement VSWT, 49 règles spécifient les actions requises de régulateur flou [3.14] :

- | | | |
|-------------------|--|----------------------------------|
| R ¹ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Ng, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Pg |
| R ² : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Nm, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Pm |
| R ³ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Ns, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ps |
| R ⁴ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Zr, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Pm |
| R ⁵ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Ps, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Nm |
| R ⁶ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Pm, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Nm |
| R ⁷ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Ng et ΔP_t est Pg, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ng |
| R ⁸ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est Ng, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Pm |
| R ⁹ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est Nm, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ps |
| R ¹⁰ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est Ns, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ps |
| R ¹¹ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est Zr, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ps |
| R ¹² : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est Ps, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ns |
| R ¹³ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est PM, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Nm |
| R ¹⁴ : | Si $\Delta\Omega_t$ est Nm et ΔP_t est Pg, Alors : | la sortie Ω_{tref} est Ng |

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

R^{15} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_s
R^{16} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est N_m , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_m
R^{17} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est N_s , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_s
R^{18} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est Z_r , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_s
R^{19} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est P_s , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_s
R^{20} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_s
R^{21} :	Si $\Delta\Omega_t$ est N_s et ΔP_t est N_m , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_g
R^{22} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est N_s , Alors :	la sortie Ω_{tref} est Z_r
R^{23} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est Z_r , Alors :	la sortie Ω_{tref} est Z_r
R^{24} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est P_s , Alors :	la sortie Ω_{tref} est Z_r
R^{25} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est P_m , Alors :	la sortie Ω_{tref} est Z_r
R^{26} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est P_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est Z_r
R^{27} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_s
R^{28} :	Si $\Delta\Omega_t$ est Z_r et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_m
R^{29} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_s
R^{30} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_s
R^{31} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_s
R^{32} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_s
R^{33} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_g
R^{34} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_g
R^{35} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_s et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est P_g
R^{36} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_m et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_m
R^{37} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_m et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_m
R^{38} :	Si $\Delta\Omega_t$ est P_m et ΔP_t est N_g , Alors :	la sortie Ω_{tref} est N_m

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

- R³⁹ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pm et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Ps
- R⁴⁰ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pm et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pg
- R⁴¹ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pm et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pg
- R⁴² : Si $\Delta\Omega_t$ est Pm et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pg
- R⁴³ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Ng
- R⁴⁴ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Nm
- R⁴⁵ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Ns
- R⁴⁶ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pm
- R⁴⁷ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pg
- R⁴⁸ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pg
- R⁴⁹ : Si $\Delta\Omega_t$ est Pg et ΔP_t est Ng, Alors : la sortie Ω_{tref} est Pg

3)- Mécanisme d'inférence

Le mécanisme d'inférence floue calcule les valeurs de la fonction d'appartenance pour chaque règle des contrôleurs. Dans notre étude, nous avons choisi la méthode de Mamdani "min-max" car elle est la plus utilisée pour les applications de contrôle [3.17].

Le tableau 3.1 montre les 7*7 règles utilisées dans cette étude.

$\Delta\Omega_{tref}$		ΔP_t						
		Ng	Nm	Ns	Zr	Ps	Pm	Pg
$\Delta\Omega_t$	Ng	Pg	Pm	Ps	Pm	Nm	Nm	Ng
	Nm	Pm	Ps	Ps	Ps	Ns	Nm	Ng
	Ns	Ps	Pm	Ps	Ps	Ns	Ns	Ng
	Zr	Zr	Zr	Zr	Zr	Zr	Ps	Pm
	Ps	Ns	Ns	Ns	Ps	Pg		
	Pm	Nm	Nm	Nm	Ps			
	Pg	Ng	Nm	Ns	Pm			

Tableau 3.1 Règles du contrôleur flou.

4)- défuzzification

Il s'agit de l'étape finale du contrôle. La défuzzification est le processus qui consiste à convertir l'ensemble flou résultant en valeurs claires de la sortie réelle qui peuvent être utilisées par le système comme signal de commande [3.18], [3.17]. Dans cette étude, nous allons utiliser la méthode du centre de gravité.

Cette phase consiste à convertir les variables linguistiques de sortie en valeurs croustillantes pour atteindre la vitesse de rotation souhaitée du PMSG.

III.5 MPPT par la commande PI et PI d'ordre fractionnaire

En raison des avantages du faible coût, de la facilité de conception et du schéma de commande simple, les contrôleurs PI conventionnels sont largement utilisés dans divers secteurs et également dans les systèmes d'énergie éolienne. Grands dépassements et sous-dépassements ; des performances d'amortissement lentes, des temps de stabilisation importants et des performances moins robustes dans des conditions de fonctionnement changeantes sont quelques limites des contrôleurs PI en raison des gains de fonctionnement fixes. Cependant, étant donné que les contrôleurs PI sont largement utilisés, il est indispensable de prévoir les modifications adaptatives en ligne des gains du contrôleur PI afin d'améliorer ses performances dans diverses conditions de fonctionnement incertaines.

La technique de commande MPPT basé sur le contrôleur PI a pour objectif de générer une référence de vitesse pour contrôler le couple électromagnétique afin de maintenir la vitesse constante.

L'équation qui nous donne des informations sur la partie mécanique, hors boîte de vitesses, est la suivante :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p (i_{qs} + i_{ds} i_{qs} (L_{ds} - L_{qs})) - T_m - b\Omega_t \right) \quad 3.2$$

En utilisant la commande de courant nul sur l'axe d, l'équation ci-dessus devient :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p (\Psi_m i_{qs}) - T_m - b\Omega_t \right) \quad 3.3$$

Le fait de considérer le couple T_m dans l'équation comme une perturbation externe nous permet de l'omettre, ainsi en utilisant la transformation de Laplace nous obtenons la fonction de transfert suivante :

$$G_{\Omega_t}(s) = \frac{\Omega_t}{I_{qs}} = \frac{3 p \Psi_m}{2 J s + b} \quad 3.4$$

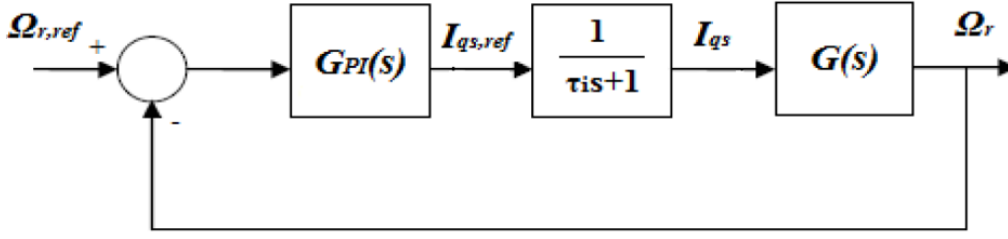


Figure 3.7 schéma de la structure du régulateur de vitesse.

Suivant le schéma de structure du régulateur de vitesse pour la boucle de courant interne, on dit que la boucle de contrôle interne est plus rapide que la boucle externe. Sans s'écarter de la précision, nous supposons que $I_{qs} = I_{qs_ref}$, le courant I_{qs_ref} étant égal à :

$$i_{qs,ref} = k_p(\Omega_{t,ref} - \Omega_t) + k_I \int_0^t (\Omega_{t,ref} - \Omega_t) dt \quad 3.5$$

En mettant en équation et en tenant compte des hypothèses formulées, on obtient la relation suivante :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p \Psi_m (k_p(\Omega_{t,ref} - \Omega_t) + k_I \int_0^t (\Omega_{t,ref} - \Omega_t) dt - b \Omega_t) \right) \quad 3.6$$

Donc en appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$s \Omega_t = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p \Psi_m (k_p(\Omega_{t,ref} - \Omega_t) + \frac{k_I}{s} (\Omega_{t,ref} - \Omega_t) - b \Omega_t) \right) \quad 3.7$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega_t}{\Omega_{t,ref}} = G_{BF}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad 3.8$$

L'équation décrit un système du second ordre, où ω_n est la fréquence brute et ξ est le rapport d'amortissement, [3.16]. Le temps de récupération T_s pour un système comme ci-dessus, c'est-à-dire un système du second ordre avec une réponse pour ξ inférieure à l'unité, est égal à la formule (7.9.8). De plus, un contrôle particulier est effectué pour s'assurer que la courbe ne s'écarte pas de plus de 2% de la valeur finale, [3.16].

$$T_s \approx \frac{4}{\xi \omega_n}$$

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Si on donne à la variable temporelle souhaitée T_s une valeur permettant d'obtenir l'équilibre du système et une valeur au taux d'amortissement ξ , on obtient la fréquence brute. Ainsi, si nous mettons en relation les équations ci-dessus, nous déterminons les gains des contrôleurs K_p et K_I :

$$K_{P,\Omega_t} = \frac{2}{3} \frac{J}{p\psi_m} \left(\frac{8}{T_s} - \frac{b}{J} \right) \quad 3.9$$

$$K_{I,\Omega_t} = \frac{2}{3} \frac{J}{p\psi_m} \left(\frac{4}{\xi T_s} \right)^2 \quad 3.10$$

Le calcul d'ordre fractionnaire est un domaine des mathématiques qui traite de la différenciation et de l'intégration d'ordre réel ou complexe [3.21], [3.22] et [3.23].

IL est déjà révélé utile dans des domaines d'ingénierie tels que la bio-ingénierie, la viscoélasticité, l'électronique, la robotique, la théorie du contrôle et le traitement du signal.

En d'autres termes, c'est une généralisation du calcul traditionnel qui conduit à des concepts et des outils similaires, mais avec une applicabilité beaucoup plus large. Au cours des deux dernières décennies, le calcul fractionnaire a été redécouvert par les scientifiques et les ingénieurs et appliqué dans un nombre croissant de domaines, notamment dans le domaine de la théorie de la commande [3.24].

Cet embellissement de l'algorithme PID offre une sélection beaucoup plus large de paramètres de réglage, comme le montre la Fig. 4 [3.25].

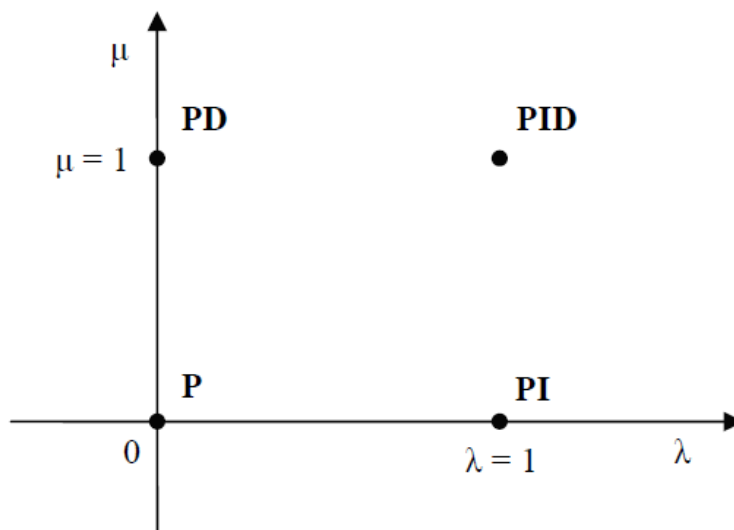


Figure 3.8 Plan des contrôleurs $PI^\lambda D^\mu$

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Évidemment, cette variété de paramètres de contrôle peut par conséquent améliorer les performances du contrôle. Cependant, les techniques d'ajustement rigoureuses pour ce type de contrôleurs.

Les phénomènes mathématiques d'ordre fractionnaire sont très utiles pour définir et modéliser un système en temps réel plus précisément que les méthodes conventionnelles d'entiers.

Le différentiateur d'ordre fractionnaire peut être représenté par un opérateur fondamental global comme une généralisation des opérateurs différentiels et intégraux, qui est défini comme suit [3.18] :

$${}_a D_t^\gamma = \begin{cases} \frac{d^\gamma}{dt^\gamma} & , \Re(\gamma) > 0 \\ 1 & , \Re(\gamma) = 0 \\ \int_0^t (d\tau)^{-\gamma} & , \Re(\gamma) < 0 \end{cases} \quad 3.11$$

L'une des définitions les plus utilisées généralement dans le calcul fractionnaire FOC est la définition de Caputo [3.7] :

$${}_a D_t^{-\gamma} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\gamma)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{f(t-\tau)^{\gamma-n+1}} \quad 3.12$$

Où :

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty e^{-u} u^{\gamma-1} du, \Re(\gamma) > 0 \quad 3.13$$

C'est la fonction Gamma d'Euler, a et t sont les limites de l'opération, et γ est l'ordre fractionnaire intégral qui peut être un nombre complexe. Dans cet thèse, γ est supposé comme un nombre réel satisfaisant $0 < \gamma < 1$. De plus, a est considéré comme une valeur nulle et la résolution suivante est utilisée :

$${}_0 D_t^{-\gamma} = D_t^{-\gamma} \quad 3.14$$

Sur la base de Riemann – Liouville, dans le domaine temporel, la fonction de transfert du contrôleur FOPI d'ordre fractionnaire peut être réécrite comme suit [3.19], [3.25] :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t \frac{(t-\tau)^{\gamma-1}}{\Gamma(\gamma)} e(\tau) d\tau \quad 3.15$$

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Dans le contrôleur d'ordre fractionnaire FOPI, l'erreur pondérée est intégrée à la place de la valeur d'erreur. Dans cette intégration pondérée, au temps t , la fonction : joue le rôle de fonction de pondération pour intégrer l'historique des erreurs $e(\tau)$, $\tau \in [0, t]$ [3.19]

Par conséquent, en utilisant la transformation de Laplace, la fonction de transfert du contrôleur PI d'ordre fractionnaire est donnée par :

$$G(s) = k_p + K_I s^{-\gamma} \quad 3.16$$

Pour mettre en œuvre le terme d'ordre fractionnaire $s^{-\gamma}$ dans la simulation, il doit être approximé par une fonction de transfert entière, alors que plusieurs méthodes ont été développées, Les deux approches les plus connues sont celles proposées par Charef "Méthode de la fonction de singularité" [3.26] et l'approximation d'Oustaloup.

L'approximation continue d'Oustaloup (OCA) est largement utilisée pour approximer l'ordre fractionnaire $s^{-\gamma}$ par une fonction de transfert entière [3.22], [3.18].

Oustaloup a présenté l'algorithme d'approximation utilisé lorsqu'une bande de fréquence d'intérêt est donnée par $[\omega_b, \omega_h]$.

$$\left(\frac{s}{\omega_\mu}\right)^\gamma = H(s) = \left(\frac{\omega_\mu}{\omega_h}\right)^\gamma \prod_{k=-N}^N \left(\frac{1+s/\omega'_k}{1+s/\omega_k}\right) \quad 3.17$$

Où :

$$\omega_\mu = \sqrt{\omega_b \omega_h},$$

$$\omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)$$

$$\omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}+\frac{\gamma}{2}}{2N+1}}$$

où ω'_k sont les zéros, ω_k sont les pôles de rang k et $2N+1$ est le nombre de zéros ou de pôles de la fonction de transfert entière résultante [3.18].

Parallèlement, plusieurs bibliothèques de logiciels ont été créées afin de trouver l'approximation en temps continu ou discret, comme Ninteger [3.26], CRONE [3.25] et FOMCON [3.27], qui peuvent être ajoutées à Matlab et utilisées comme approximates.

III.6 La commande vectorielle de la PMSG

L'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance permet non seulement de faire fonctionner une éolienne à vitesse variable, mais aussi d'améliorer l'extraction de puissance. Dans un aperçu récent de différents systèmes d'éoliennes, il est démontré que les conceptions à vitesse variable équipées de convertisseurs électroniques de puissance continueront à dominer et à être des technologies très prometteuses pour les éoliennes. [3.28]

Dans notre étude le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable avec convertisseur de pleine puissance, l'éolienne est directement connectée au générateur et le générateur est complètement découplé du réseau électrique. Il est essentiel de comprendre le comportement harmonique des éoliennes à vitesse variable.

La technique de commande vectorielle pour le système de conversion d'énergie éolienne est principalement utilisée pour maximiser la puissance extraite de l'éolienne en contrôlant la vitesse de la génératrice (PMSG).

La commande vectorielle ou, comme on l'appelle aussi, la technique de commande orientée champ (FOC) concentre des modèles mathématiques transformés afin de transformer les courants triphasés du stator en deux composantes verticales d et q à représenter par un vecteur [3.29].

Dans l'ordre d'atteindre le couple maximal, le courant de l'axe d est réglé à zéro 0. Dans l'expression du couple dans le deuxième chapitre, est la liaison de flux due aux aimants permanents qui est une constante, il y aura une relation linéaire entre le couple électromagnétique et le courant d'axe q , de sorte que le couple électromagnétique peut être facilement contrôlé en régulant le courant d'axe q .

Pour la rapidité et l'efficacité du contrôle optimal du flux magnétique et du couple généré, la manipulation des composantes d et q du courant nécessite un traitement approprié. La pulsation des composants électroniques, est réalisée par la technique de contrôle du courant dans une boucle tardive et l'orientation est dans le champ du rotor [3.29]

Dans la figure 3.9, la composante d du courant du stator est fixée à zéro, l'effet de cette action est de contrôler le couple électromagnétique généré par la composante q du courant du stator [3.30]. D'autres tactiques de contrôle utilisées dans les générateurs modernes à aimant

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

permanent sont le contrôle du couple maximum par unité de courant et le contrôle du facteur de puissance unitaire [3.31].

Le diagramme de phase pour l'approche de commande vectorielle FOC est illustré à la figure 3.8 :

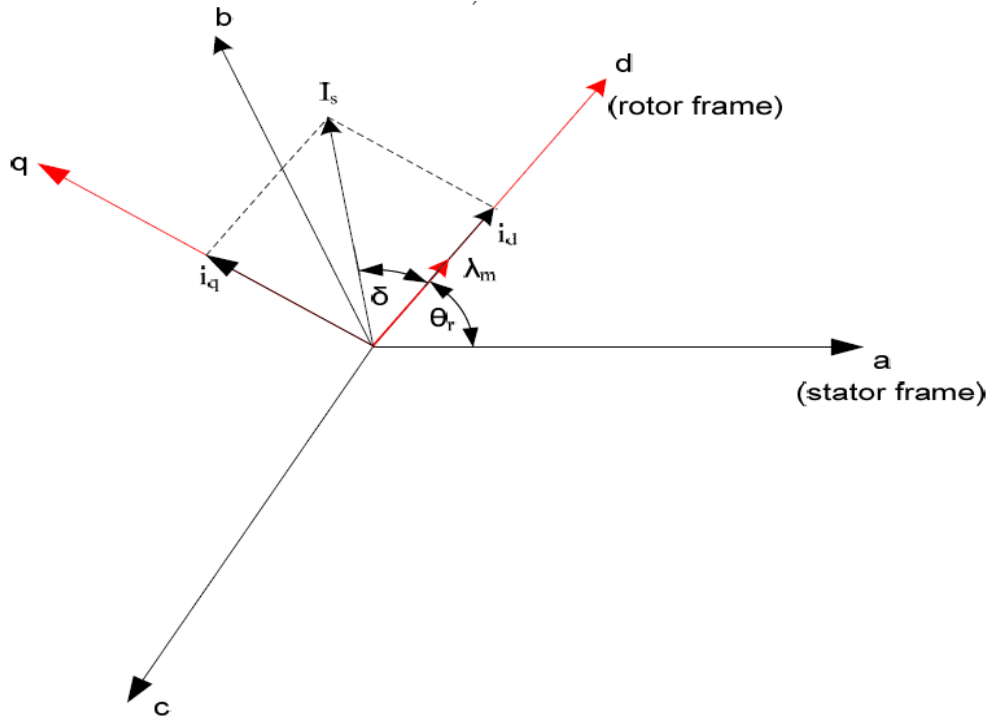


Figure 3.9 Diagramme de phase de la commande vectorielle.

D'après la figure 3.6, la boucle de courant est la boucle interne, où l'entrée de référence de l'axe q est alimentée par la sortie du régulateur de vitesse de la boucle externe. La sortie du régulateur de vitesse FOPI est la différence entre la vitesse de référence Ω_{tref} et la vitesse mesurée Ω_t . Cela produit le courant de référence de l'axe q i_{qref} . Les contrôleurs PI de la boucle de courant traitent l'erreur entre les courants de référence i_{sdref}, i_{sqref} et les courants mesurés i_{sd}, i_{sq} et génèrent une sortie de tension V_{dref}, V_{qref} . Ces signaux de sortie sont ensuite découplés les uns des autres.

Les boucles de courant interne d et q adoptent un régulateur PI dont la fonction de transfert est la suivante :

$$G_{isd,q}(s) = k_{pisd} + \frac{k_{iisd}}{s} \quad 3.18$$

Où k_{pisd} et k_{iisd} sont les gains proportionnels et intégrales.

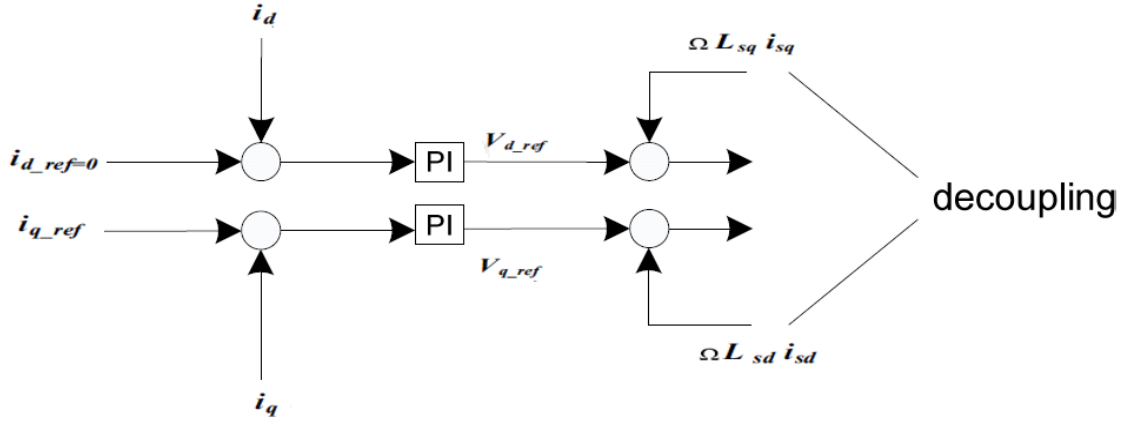


Figure 3.10 Structure de la boucle de contrôle des axes d, q

Comme indiqué précédemment, l'approche FOC couplée à la stratégie de commande MPPT basée sur le rapport de vitesse de pointe optimal est appliquée ici en tant qu'algorithme de commande pour le convertisseur de puissance côté générateur. Sur la figure 3.7, il y a deux boucles de rétroaction dans le système de commande qui sont :

- (1) la boucle de commande de courant de l'axe d ,
- (2) la boucle de commande de courant de l'axe q .

Pour acquérir les signaux de courant de retour, les courants triphasés du stator sont détectés et transformés dans le cadre de référence des axes dq selon la transformation de Park. Les tensions de stator de référence sont alors obtenues par des contrôleurs PI dans les boucles de commande de courant des axes dq .

Selon les équations obtenues à partir de la modélisation de l'éolienne dans le cadre de référence synchrone tournant $d-q$, nous avons les relations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds} = \frac{1}{L_{ds}} (-R_s i_{ds} + p\omega_r L_{qs} i_{qs} + V_{ds}) \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = \frac{1}{L_{qs}} (-R_s i_{qs} - p\omega_r L_{ds} i_{ds} - p\omega_r \Psi_m + V_{ds}) \end{cases} \quad 3.19$$

En concentrant notre attention sur les équations ci-dessus, nous constatons que nous n'avons pas de quantités linéaires, mais que le modèle de générateur est caractérisé par la non-linéarité, où il est facile de contrôler les courants i_{ds} et i_{qs} indépendamment d'une certaine manière. La principale préoccupation est donc d'éliminer les termes non linéaires de l'équation afin de découpler les commandes sur les deux axes. En utilisant l'astuce de transformation de l'entrée, on obtient :

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

$$\begin{cases} u_{ds} = p\omega_r L_{qs} i_{qs} + v_{ds} \\ u_{qs} = -p\omega_r L_{ds} i_{ds} - p\omega_r \Psi_m + v_{ds} \\ \frac{d}{dt} i_{ds} = \frac{1}{L_{ds}} (-R_s i_{ds} + v_{ds}) \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = \frac{1}{L_{qs}} (-R_s i_{qs} + v_{ds}) \end{cases} \quad 3.20$$

Les u_{ds}, u_{qs} sont les entrées de commande. Bien entendu, le contrôle ne s'effectue pas directement sur les composantes d et q du courant statorique, mais sur les tensions de l'onduleur côté générateur sur les axes d et q , et plus particulièrement sur les rapports de segmentation m_{ds} et m_{qs} . Ainsi, en substituant dans les équations calculant les rapports de segmentation de redresseur côté générateur sur les axes d et q , on obtient les relations :

$$\begin{cases} m_{ds} = \frac{1}{V_{ds}} (-p\omega_r L_{qs} i_{qs} + u_{ds}) \\ m_{qs} = \frac{1}{V_{qs}} (p\omega_r L_{ds} i_{ds} + p\omega_r \Psi_m + u_{qs}) \end{cases} \quad 3.21$$

En utilisant la transformée de Laplace sur les équations, nous avons fixé les signaux de commande, nous avons les fonctions de transfert :

$$G_{I_{ds}}(s) = \frac{I_{ds}}{U_{ds}} = \frac{1}{L_{ds}s + R_s} \quad 3.22$$

$$G_{I_{qs}}(s) = \frac{I_{qs}}{U_{qs}} = \frac{1}{L_{qs}s + R_s} \quad 3.23$$

Le schéma structurel des boucles internes de contrôle du courant pour les axes d et q est présentée dans la figure suivante :

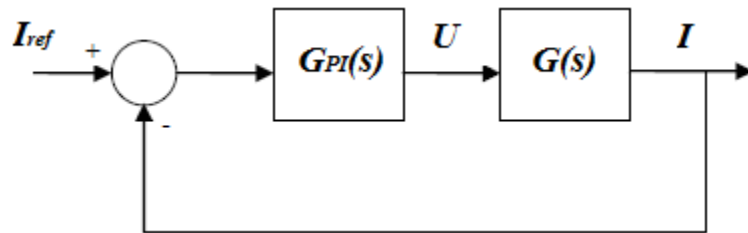


Figure 3.11 schéma structurel de contrôle du courant des axes d, q

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

Le contrôleur PI résultant à une équation [3.31] :

$$u = k_p(i_{ref} - i) + k_I \int_0^t (i_{ref} - i) \quad 3.24$$

La fonction de transfert transformée est la suivante :

$$G_{PI}(s) = k_p + \frac{k_I}{s} = \frac{k_p s + k_I}{s} \quad 3.25$$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est [3.32] :

$$G_{BO}(s) = G_{PI}(s) + G(s) \quad 3.26$$

Alors que la fonction de transfert du système en boucle fermée est [3.32] :

$$G_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)}{G_{BO}(s)+1} \quad 3.27$$

Il nous sert à ce que la fonction de transfert en boucle fermée soit du premier ordre :

$$\frac{I}{I_{ref}} = G_{BF}(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad 3.28$$

Où :

- τ_i : est la constante de temps souhaitée du système.

Pour que l'équation ci-dessus soit valide, nous avons besoin :

$$G_{BO}(s) = \frac{1}{\tau_i s} \quad 3.29$$

A partir de la relation ci-dessus, nous pouvons calculer les valeurs de gain du contrôleur pour obtenir la réponse souhaitée. Ainsi, pour l'axe d , nous avons :

$$K_{p,Ids} = \frac{L_{ds}}{\tau_i}$$

$$K_{I,Ids} = \frac{R_s}{\tau_i}$$

Tandis que pour l'axe q , nous avons :

$$K_{p,Iqs} = \frac{L_{qs}}{\tau_i}$$

$$K_{I,Ids} = \frac{R_s}{\tau_i}$$

III.7 Conclusion

De nos jours, l'utilisation des systèmes de conversion de l'énergie éolienne augmente rapidement dans le monde entier car c'est une source d'énergie renouvelable propre et sûre.

L'utilisation d'un algorithme MPPT est indispensable pour améliorer les performances de capture d'énergie du système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable.

Différentes méthodes de commande du convertisseur côté générateur pour extraire la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent GSAP en contrôlant la vitesse de rotation de la turbine sont illustrées. L'algorithme de contrôle MPPT (maximum power point tracking) basé sur le rapport de vitesse de pointe optimal a été donné. La commande vectorielle est introduite pour contrôler les courants de PMSG.

III.8 Références bibliographiques

- [3.1] A. Mirecki, X. Roboam, F. Richardeau, "Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines", IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 54, no. 1, pp. 660- 670, February 2007.
- [3.2] R. Datta and V. T. Ranganatan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system," IEE Trans. On Energy Conversion, vol. 18, No. 1, pp. 163-168, March 2003.
- [3.3] Ali H. Kasem Alaboudy, Ahmed A. Daoud, Sobhy S. Desouky, Ahmed A. Salem. Converter controls and flicker study of PMSG-based grid connected wind turbines. Ain Shams Engineering Journal 2013; 4: 75–91.
- [3.4] Jianhu Yan, Heyun Lin, Yi Feng, Z.Q. Zhu. Control of a grid-connected direct-drive wind energy conversion system. Renewable Energy 2014; 66: 371-380.
- [3.5] GUO Hong-che, QIU Tian-yu, JIANG Jiu-chun. Design of Fuzzy Controller for Direct Drive Wind Turbines. J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.) 2012; 17(2): 209-214.
- [3.6] S.M. Muyeen, Ahmed Al-Durra, J. Tamura. Variable speed wind turbine generator system with current controlled voltage source inverter. Energy Convers and Manage 2011; 52: 2688–2694
- [3.7] Roberto Cárdenas and Rubén Peña. Sensorless Vector Control of Induction Machines for Variable-Speed Wind Energy Applications. IEEE Trans ON ENERGY CONVERSION 2004; 19(1): 196-205.
- [3.8] Venkata Yaramasu, and BinWu. Predictive Control of a Three-Level Boost Converter and an NPC Inverter for High-Power PMSG-Based Medium Voltage Wind Energy Conversion Systems. IEEE Trans ON POWER ELECTRONICS 2014; 29(10): 5308-5322.
- [3.9] Podlubny I. (1999). Fractional Differential Equations, vol. 198 of Mathematics in Science and Engineering, Academic Press, San Diego, Calif, USA,
- [3.10] Tavazoei MS. (2012), From Traditional to Fractional PI Control. IEEE Industrial electronics magazine; 6(3): 41-51
- [3.11] Melício, R., Mendes, V.M.F., Catalao, J.P.S.: 'Fractional-order control and simulation of wind energy systems with PMSG/full-power converter topology', *Energy Convers. Manage.*, 2010, **51**, (6), pp. 1250–1258
- [3.12] Petrilă, D., Blaabjerg, F., Muntean, N., & Lascu, C. (2012). *Fuzzy logic based MPPT controller for a small wind turbine system. 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*.
- [3.13] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- [3.14] M. Otmane Rachedi, M.L. Saidi, F. Arbaoui, MPPT control design for variable speed wind turbine. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 10, No. 5, October 2020, pp. 4604~4614

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

- [3.15] Belmokhtar, K., Ibrahim, H., & Doumbia, M. L. (2016). A Maximum Power Point Tracking Control Algorithms for a PMSG-based WECS for Isolated Applications: Critical Review. In *Wind Turbines-Design, Control and Applications*. InTech.
- [3.16] Thongam, J. S., & Ouhrouche, M. (2011). MPPT control methods in wind energy conversion systems. In *Fundamental and advanced topics in wind power*.
- [3.17] SALUOS, W.,A., SALUOS,S., “Comparison between PID and fuzzy logic control in the position of stepper motors” in *European journal of scientific research*, 2013 , vol.101 , no.1 ,pp. 69-76, ISSN 1450-216X
- [3.18] A. Oustaloup, F. Levron, F. Nanot, B. Mathieu, *Frequency-band complex non integer differentiator: characterization and synthesis*,IEEE Trans Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, **47**, 1, pp. 25–40 (2000).
- [3.20] Luersen M. A. and le Riche R. (2004).Globalized nelder-mead method for engineering optimization,” *Computers & Structures*, vol. 82, no. 23–26, pp. 2251–2260,
- [3.21] CHACKO,S.,BHENDE,C.,N.,JAIN,S.,NEMA,R.,K.,“A novel rotor resistance estimation technique for vector controller induction motor drive using TS fuzzy” in *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 2015 , vol.6 , no.3 ,pp. 538-553, ISSN 2088-8694.
- [3.22] W.M., Sprott, J.C., (2003). Chaos in fractional-order autonomous nonlinear systems, *Chaos, Solitons & Fractals* Vol. 16, 2003, pp.339–351.
- [3.23] A. Beddar, H. Bouzekri, B. Babes, H. Afghoul, *Fractional order PI controller for grid connected wind energy conversion system*, 4thInternational Conference on Electrical Engineering (ICEE),Boumerdes, pp.1–6 (2015).
- [3.24] Chen Y.Q., Petr’as I., and Xue D. Y. (June 2009.) Fractional order control—a tutorial, in *Proceedings of the American Control Conference (ACC ’09)*, pp. 1397–1411,
- [3.26] Charef A. “Analogue realisation of fractional-order integrator, differentiator and fractional PI λ D μ controller,” *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, Vol. 153, pp. 714-720, 2006.
- [3.27] Valério D, Da Costa JS. NINTEGER: a non-integer control toolbox for MATLAB. *Proceedings of the fractional differentiation and its applications*, Bordeaux. 2004.
- [3.28] Tepljakov A, Petlenkov E, Belikov J. FOMCON: fractional-order modeling and control toolbox for MATLAB. Paper presented at the mixed design of integrated circuits and systems (MIXDES), 2011 proceedings of the 18th international conference. 2011.
- [3.29] Podlubny I. (1999). *Fractional Differential Equations*, vol. 198 of *Mathematics in Science and Engineering*, Academic Press, San Diego, Calif, USA,
- [3.30] Emna, M. E., Adel, K., & Mimouni, M. F. (2013). The wind energy conversion system using PMSG controlled by vector control and SMC strategies. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(1), 41-50.

Chapitre III : Commande du système de conversion d'énergie éolienne

- [3.31] Hasnaoui, O., Mehdi, A., & Belhadj, J. (2014). Direct Drive Wind Turbine Equipped with an Active and Reactive Power supervisory. *International Journal of Renewable Energy Research*, 4(2), 435-444.
- [3.32] Bose, B. K. (2002). Modern power electronics and AC drives.
- [3.33] Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2011). *Modern control systems*. Pearson

IV. Chapitre IV : Simulation et interprétation

Les chapitres précédents ont été consacrés à la modélisation de chaque élément du système de conversion d'énergie éolienne et à la présentation des différentes stratégies de commande. Ce chapitre est focalisé sur la simulation numérique complète du système éolien. Le système de conversion d'énergie éolienne et les méthodes proposées sont étudiés numériquement et validés sur le logiciel MATLAB/SIMULINK.

IV.1 Introduction

Le monde est confronté à une crise énergétique aiguë qui nécessite des sources d'énergie renouvelables. L'augmentation de la demande et les problèmes environnementaux entraînent une augmentation des énergies renouvelables. L'énergie éolienne est en augmentation et adoptée par de nombreux pays, mais la puissance de sortie n'est pas constante en raison des caractéristiques du vent qui sont de nature non linéaire. Donc, l'algorithme MPPT est appliqué pour augmenter l'efficacité globale du système. Il existe de nombreux algorithmes MPPT et chacun a ses propres avantages et inconvénients.

Les chapitres précédents ont traité la modélisation de différents éléments ainsi que les différents types de commande appliquées à la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable. Selon les caractéristiques de l'éolienne, on constate que pour les différentes valeurs de vitesse du vent, il existe un point de fonctionnement où ces caractéristiques P_m , T_m et C_p sont optimales. Cela montre la nécessité d'utiliser un contrôleur MPPT pour atteindre et suivre ce point de puissance maximum quelle que soit la variation de la vitesse du vent.

Dans cette étude, une implémentation et une simulation détaillées d'un système de conversion d'énergie éolienne a été réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, sur la base des équations et des paramètres techniques de l'éolienne et du générateur PMSG décrits dans les tableaux 3,4. Un contrôleur MPPT a également été développé pour optimiser les performances du système proposé dans des conditions de vitesse de vent variables, avec différentes approches MPPT qui ont été simulées, évaluées et comparées.

En conséquence, L'idée fondamentale de méthode de commande vectorielle est de ramener le comportement de la machine synchrone à aimant permanent à celui d'une machine à courant continu est parfaitement adaptée aux traitements à vitesse variable cela permet de contrôler le flux de la machine avec le courant statorique direct. Donc, la composante en quadrature permet de contrôler le couple électromagnétique correspond au courant induit de la machine à courant continu. Alors, cette stratégie revient à réduire le courant statorique à une seule composante i_q .

Afin de tenir compte aux performances des stratégies de commande (MPPT, FOC) appliquées à la partie électrique (turbine et la génératrice), La figure 4.1 montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps jusqu'à $t = 10$ s entre des valeurs aléatoires générées allant de $v = 7,8$ m / s jusqu'à $v = 14,15$ m / s.

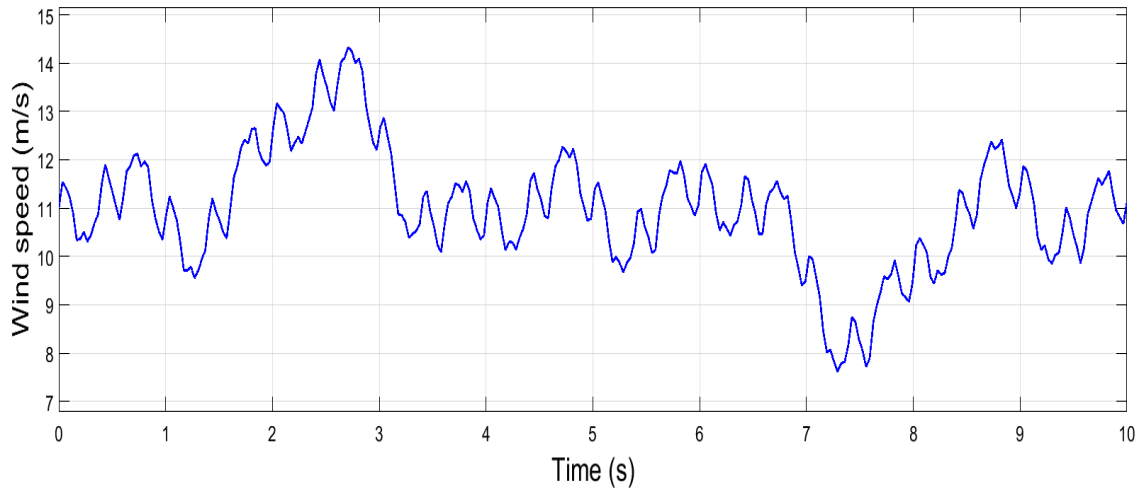


Figure 4.1 Profile du vent.

Les tableaux suivants décrivent les paramètres techniques de l'éolienne et du générateur :

<i>Description du paramètre</i>	<i>Valeur</i>
<i>La densité de l'air</i>	$\rho = 1.225 \text{ kg.m}^3$
<i>Rotor de la turbine</i>	$R = 2 \text{ m}$
<i>L'angle de calage</i>	$\beta = 0^\circ$
<i>La vitesse réduite</i>	$\lambda_{opt} = 8.1$
<i>Coefficient de puissance maximale</i>	$C_{p \text{ max}} = 0.48$

Tableau 4.1 : Les paramètres de l'éolienne

<i>Description du paramètre</i>	<i>Valeur et unité</i>
<i>Puissance nominale</i>	$P_e = 10 \text{ KW}$
<i>Resistance Statorique</i>	$R_s = 0.00829 \Omega$
<i>Inductance direct Statororique</i>	$L_d = 0.174 \text{ mH}$
<i>Inductance quadrature Statororique</i>	$L_q = 0.174 \text{ mH}$
<i>Flux d' aimant permanent</i>	$\Psi_m = 0.071 \text{ wb}$
<i>Nombre de pole</i>	$N_p = 6$
<i>Inertie Totale</i>	$J_t = 0.089 \text{ Kg.m}^2$
<i>Force de frottement</i>	$f = 0.005 \text{ N.m}$

Tableau 4.2 Les paramètres du PMSG

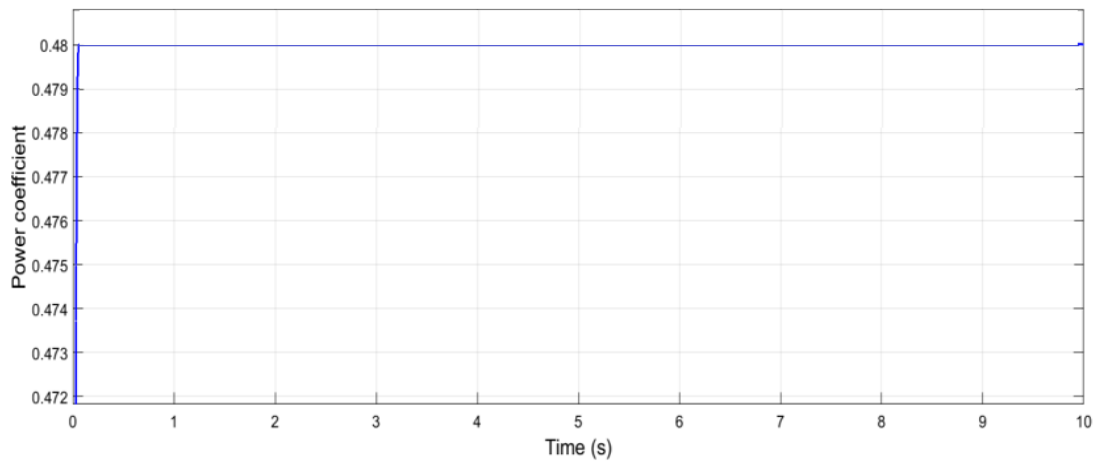
Les paramètres des gains du contrôleur utilisé sont les suivants :

Paramétré du gain	Valeur
K_1	0.0012
K_2	0.0019
K_p	4.86
K_i	3.36
γ	0,429

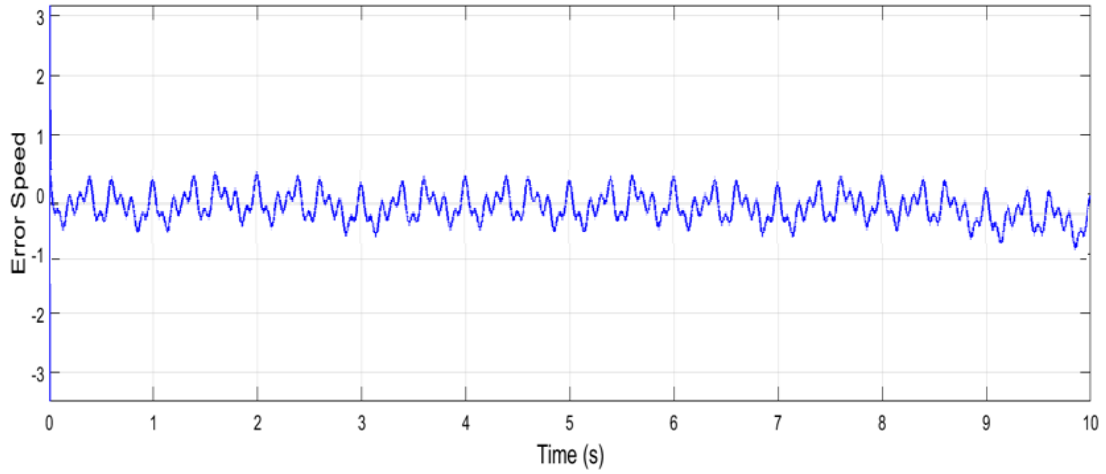
Tableau 4.3 Les paramètres des gains du contrôleur

IV.2 Simulation par la stratégie TSR

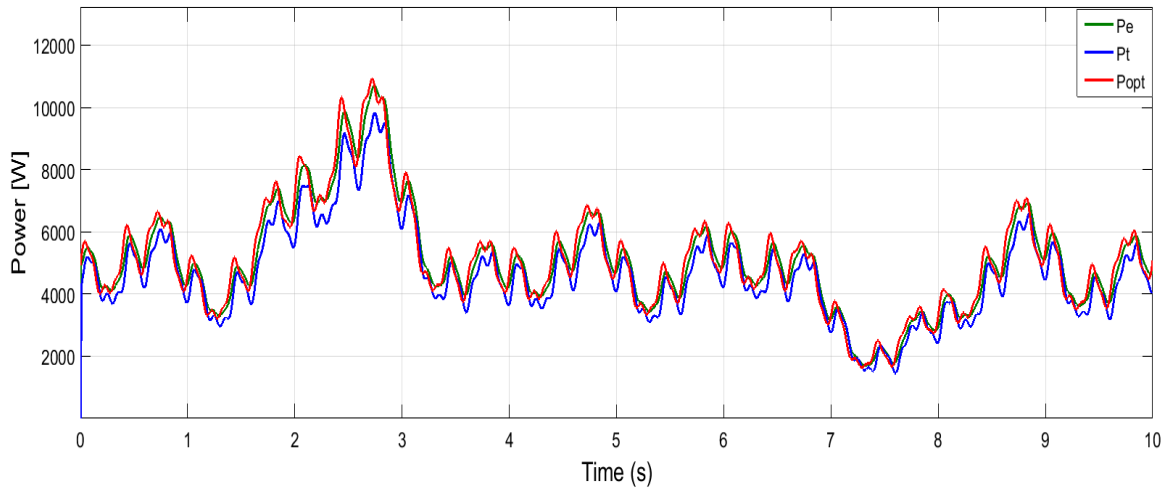
La commande TSR régule directement la vitesse où le couple de la turbine dans le but de garder la valeur du coefficient de puissance C_p à sa valeur optimale par mesure de la vitesse. de la turbine.



(1)



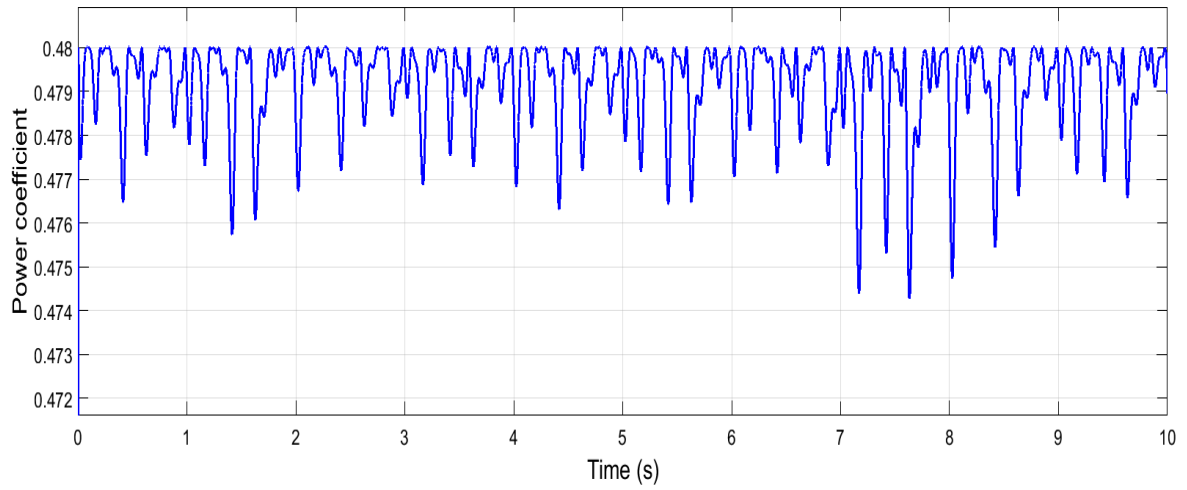
(2)



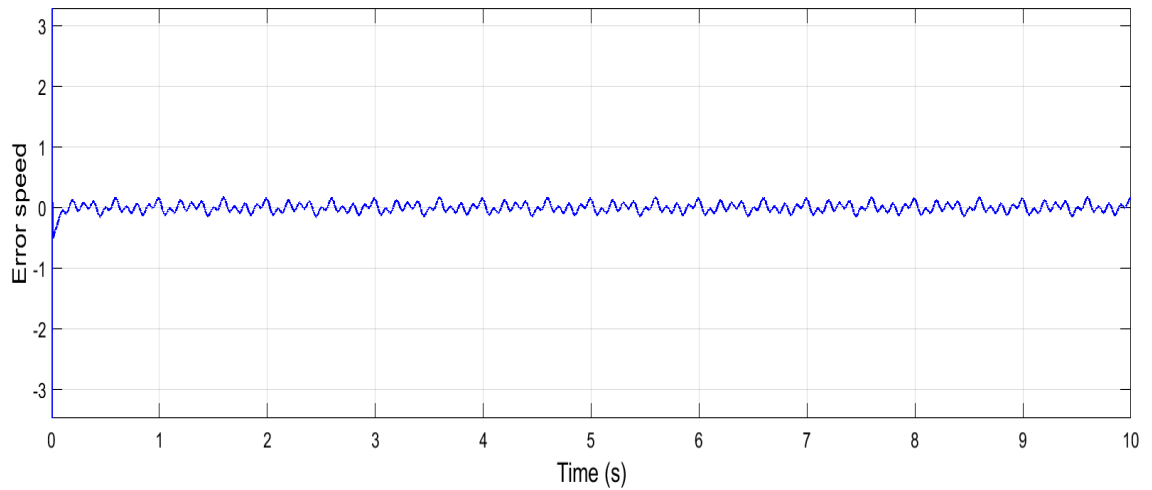
(3)

Figure 4.2 (1) Coefficient de puissance C_p , (2) l'erreur de la vitesse
(3) courbe des puissances par la commande TSR.

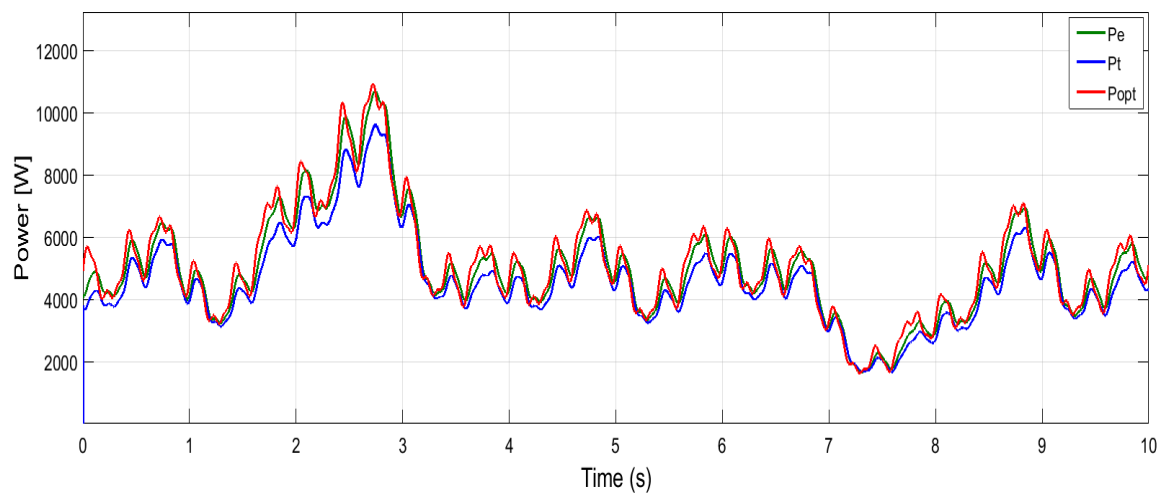
IV.3 Simulation par régulateur PI



(4)



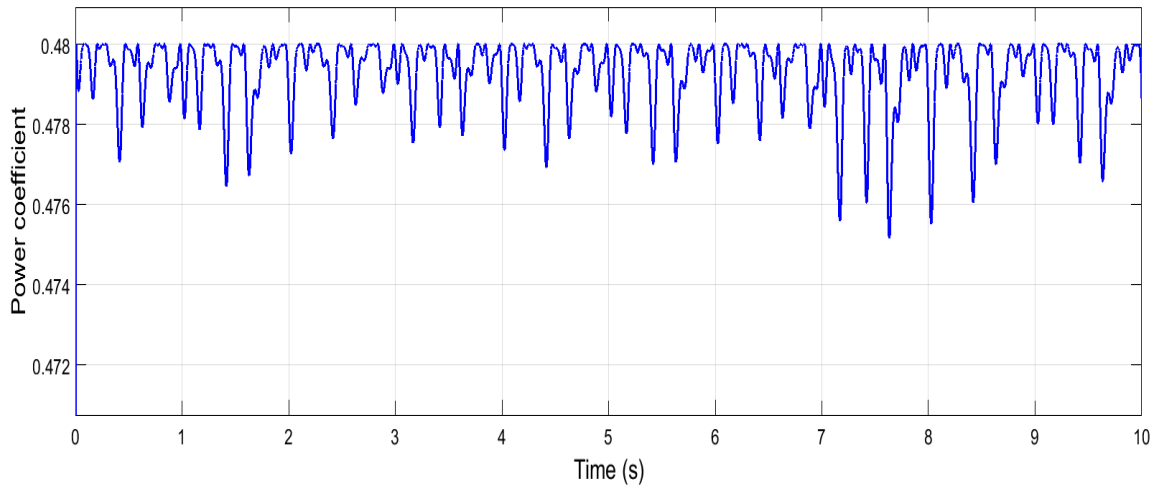
(5)



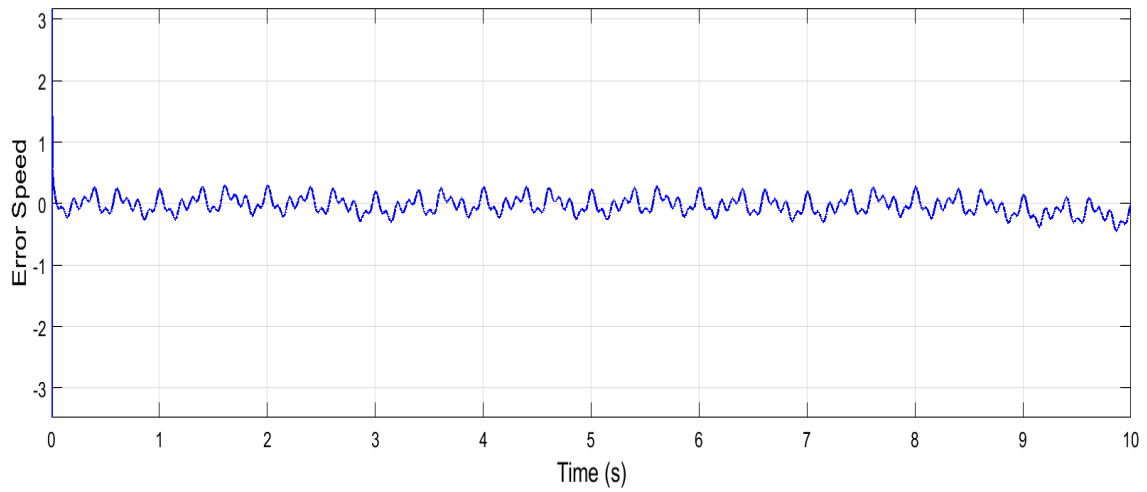
(6)

Figure 4.3. (4) Coefficient de puissance C_p , (5) l'erreur de la vitesse
(6) courbe des puissances par la commande PI.

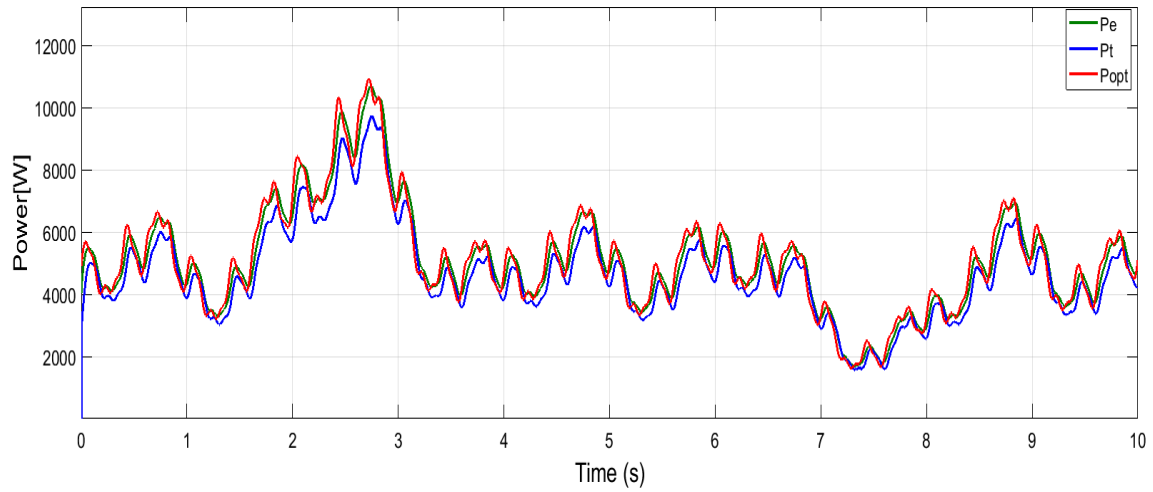
IV.4 Simulation par un régulateur FOPI



(7)



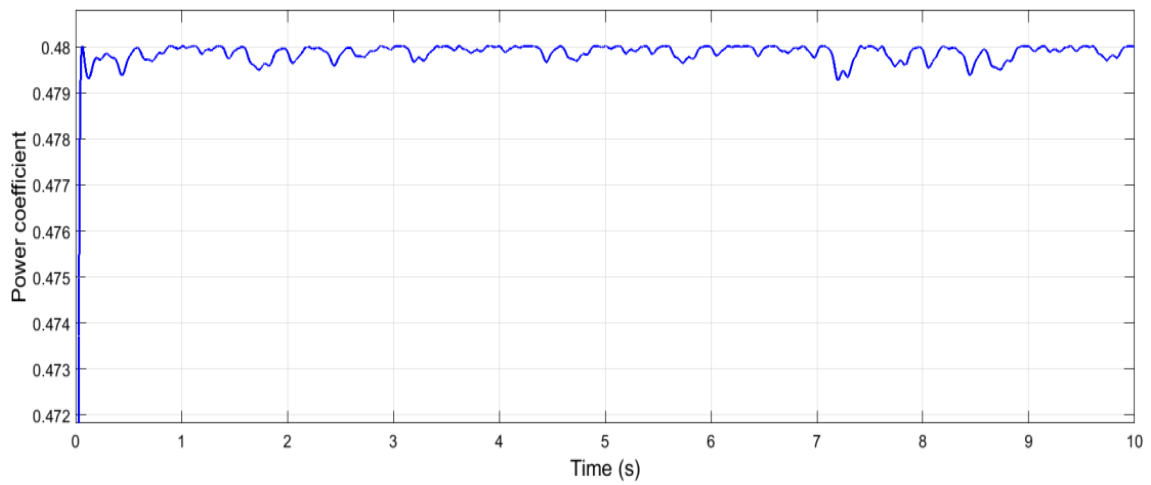
(8)



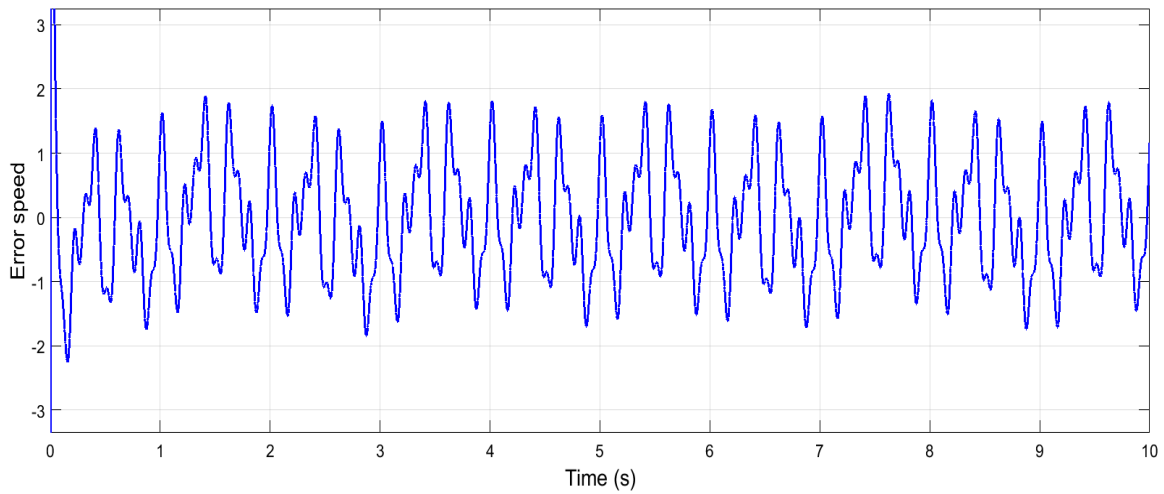
(9)

Figures 4.4 (7) Coefficient de puissance C_p , (8) l'erreur de la vitesse
(9) courbe des puissances par la commande FOPI.

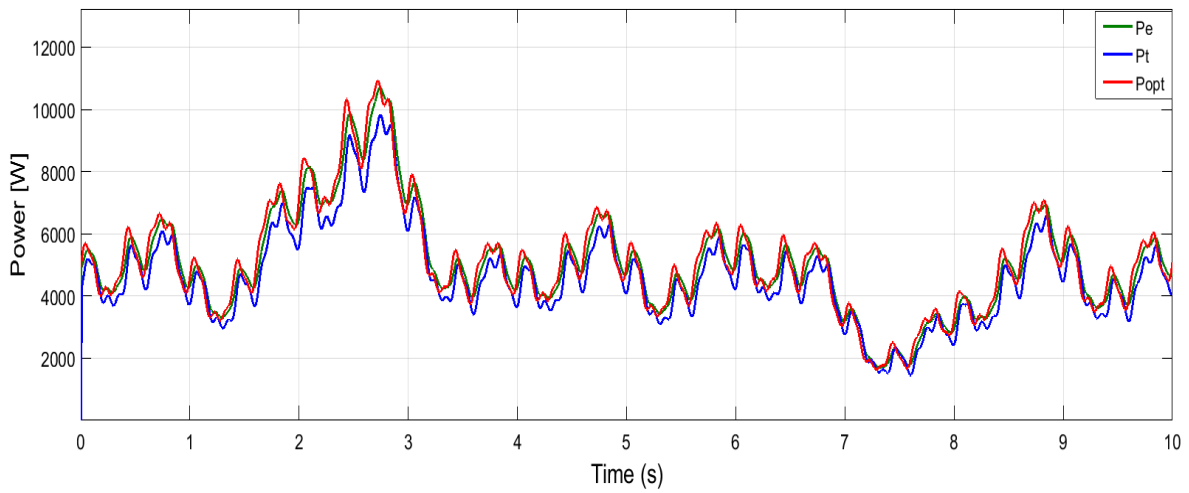
IV.5 Simulation avec un régulateur FFOPI :



(10)



(11)



(12)

Figures 4.5 (10) Coefficient de puissance C_p , (11) l'erreur de la vitesse

(12) courbe des puissances par la commande FFOPI.

Les simulations des performances du redresseur MLI connecté au générateur synchrone à aimant permanent à vitesse a variable sont présentée dans les figures suivants :

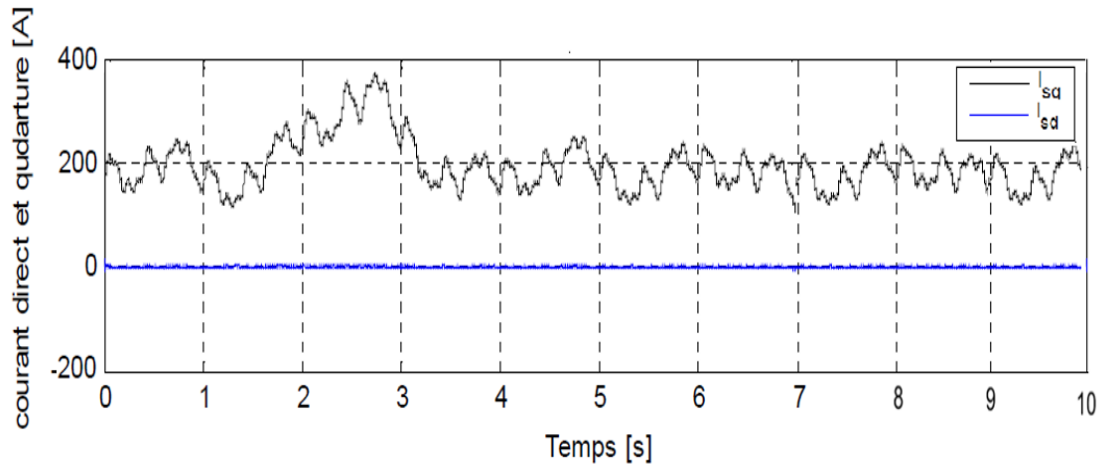


Figure 4.6 courant direct et quadrature de la génératrice.

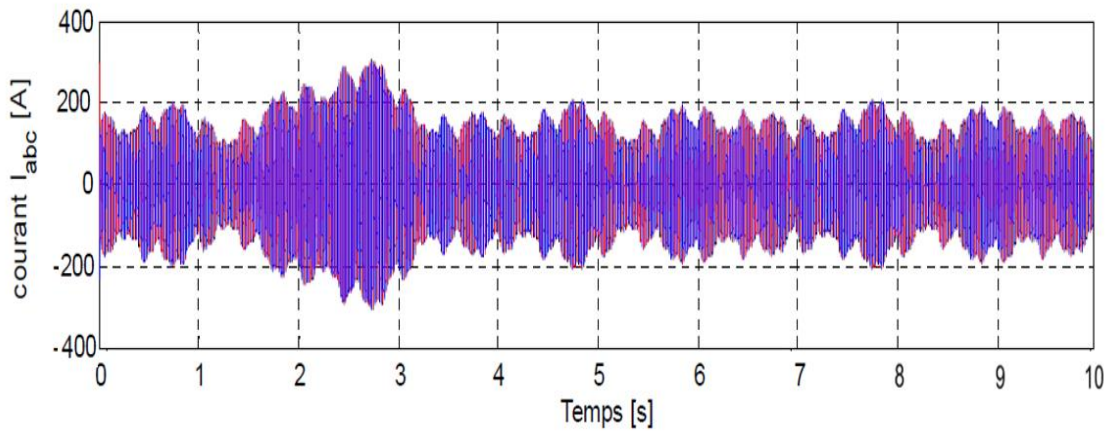


Figure 4.7 les trois courant de phase à l'entrée de redresseur MLI.

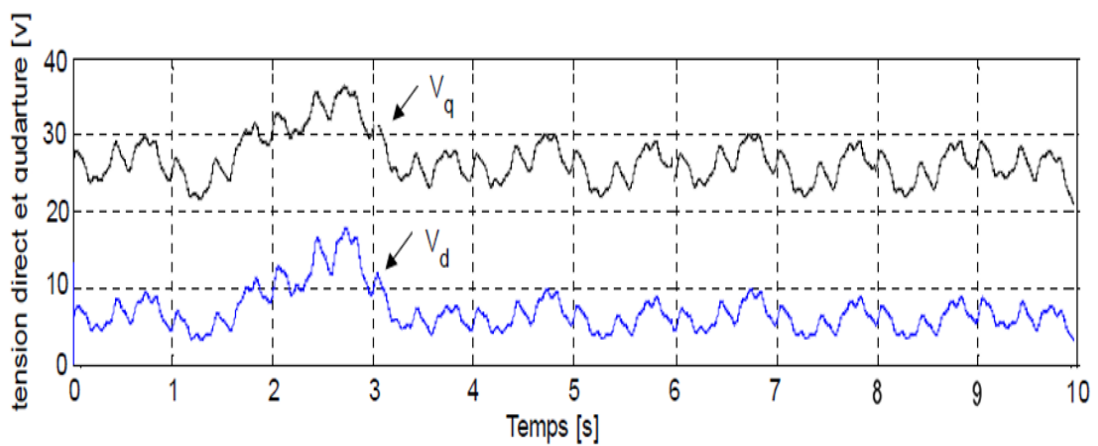


Figure 4.8 Les tensions dans les Axes d , q de la génératrice.

IV.6 Interprétation

Dans un système de conversion d'énergie éolienne, l'utilisation d'un contrôleur MPPT est essentielle pour extraire le maximum d'énergie produite par le générateur PMSG quel que soit la vitesse du vent. Son principe repose sur l'exécution de l'algorithme MPPT qui permet d'atteindre et de suivre le point de puissance maximale MPP, en maintenant le coefficient de puissance à sa valeur optimale $C_{popt} = 0.48$.

La Figure 4 montre les résultats de simulation correspondant respectivement au coefficient de puissance, l'erreur de la vitesse et à la puissance mécanique de sortie pour l'éolienne avec différentes valeurs de la vitesse du vent, en utilisant les méthodes: TSR, le contrôle proportionnel- intégrale (PI), le contrôle proportionnel- intégrale d'ordre fractionnaire(PI^{λ}) et le contrôle par logique floue (FLC).

Les courbes de la Figure 4. (2, 6, 9 et 12), montrent l'efficacité des quatre méthodes TSR, PI, FOPI et FFOPI, à chaque fois que la vitesse du vent change, l'algorithme réussit à remettre le système dans son point de fonctionnement optimal et capture l'énergie maximale possible. Nous pouvons constater d'après les courbes, que la valeur du coefficient de puissance avec les méthodes TSR, FFOPI rattrape leur valeur maximale très rapidement quel que soit l'ampleur de la variation de la vitesse du vent. Par contre, le temps de réponse des autres méthodes de commande (PI et le FOPI) sont plus lentes pour atteindre leurs valeur optimale du coefficient de puissance C_p .

Les figures.4. (3, 7, 10, 13) donnent le signal d'erreur entre la vitesse réelle de la génératrice et la vitesse de référence pour chacune des méthodes de MPPT. A partir de l'analyse des figures, on constate que pour chaque vitesse du vent, les vitesses de rotation réelles sont proportionnelles aux vitesses de rotation de références et elles sont estimées avec la caractéristique de puissance de l'éolienne a vitesse variable. En outre, la vitesse du PMSG atteint parfaitement sa valeur optimale pour toutes la plage de variation de la vitesse du vent de chacun des algorithmes MPPT avec une erreur minime. Cela indique que le système fonctionne toujours à proximité du point de fonctionnement optimal, tout en conservant l'extraction de puissance maximale. Donc le système éolien fonctionne toujours à une vitesse de rotation optimale.

A partir de ces résultats, nous avons remarqué que les contrôles basés sur la logique floue d'ordre fractionnaire et TSR sont les techniques les plus efficaces par rapport aux autres méthodes. Elles permettent d'atteindre la puissance maximale avec plus de stabilité, de précision et un meilleur temps de réponse. Cependant, les autres méthodes PI et FOPI nécessitent un temps de réponse lent pour déterminer le MPP, qui reste inférieur à celui du FFOPI et TSR. Pour cela, on peut affirmer que le contrôle intelligent FFOPI est une approche robuste et efficace, il a de meilleures performances et une bonne réponse dynamique dans des conditions de vitesse de vent variable.

Sur la base des résultats illustrés sur les figures 4.5 on peut dire que le contrôleur flou d'ordre fractionnaire permet une amélioration de la qualité de l'énergie pour le fonctionnement des éoliennes à vitesse variable équipées d'un PMSG par rapport à une stratégie de contrôle classique d'ordre entier. Par comparaison des résultats de simulation (Tableau 5), on peut dire que les techniques TSR et FFOPI sont plus efficaces que les techniques FOPI et PI classique.

Nous concluons que le système fonctionne toujours à proximité du point de fonctionnement optimal, tout en maintenant le point (MPP) pour tout le profil de la vitesse du vent, avec quelque variation de chaque stratégie dans le maintien du point de puissance maximale.

En outre, on remarque que la plage d'erreur de vitesse pour chaque commande varie avec le changement de la vitesse du vent, mais avec une valeur différente. Par exemple, ces variations sont dues à la commande inhérente de chaque MPPT pour suivre le pic maximal.

<i>MPPT technique</i>	<i>Average power Pt [kw]</i>	<i>Power coefficient</i>	<i>Response time (s)</i>	<i>Efficiency (Pt/Popt)</i>	<i>Efficiency (Pe/Popt)</i>
<i>TSR</i>	<i>5.9965</i>	<i>0.48</i>	<i>0.0689</i>	<i>0.9964</i>	<i>0.9527</i>
<i>PI</i>	<i>5.9598</i>	<i>0.4778</i>	<i>0.0964</i>	<i>0.9823</i>	<i>0.9384</i>
<i>FOPI</i>	<i>5.9613</i>	<i>0.4782</i>	<i>0.0764</i>	<i>0.9847</i>	<i>0.9327</i>
<i>FFOPI</i>	<i>5.9659</i>	<i>0.4797</i>	<i>0.0703</i>	<i>0.9865</i>	<i>0.9280</i>

Tableau 4.3. Les performances des techniques MPPT.

Les figures (4.6) et (4.7) présente respectivement le courant direct et quadrature de la génératrice, et les trois courants de phase à l'entrée du redresseur MLI, on observe que l'amplitudes des courants est affectée par la vitesse variable du vent. La figure.4.8 représente les tensions dans les Axes d , q de la génératrice sont aussi affectée par le changement de la vitesse du vent.

Sur la base des informations tirées de ces figures, on peut dire avec certitude que la commande vectorielle applique répond à l'exigence du système.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la simulation de la commande de la génératrice synchrone à aimant permanent a été utilisée pour atteindre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable, un contrôle de la vitesse de rotation de la turbine à l'aide des stratégies (TSR, PI, FOPI, FFOPI) a été réalisé. La PMSG a été contrôlée par la commande vectorielle à flux orienté.

La commande du système de conversion d'énergie éolienne se concentre sur le réglage de la vitesse de rotation Ω_t du rotor du générateur, de manière à obtenir une puissance maximale à chaque vitesse du vent, c'est-à-dire de fonctionner au facteur de puissance optimal C_p .

La commande côté machine se concentre sur la précision de la commande vectorielle comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. La structure du système contrôlé côté machine comporte deux boucles internes de contrôle du courant, le contrôleur relie le courant du stator de l'axe direct i_{dS} , au courant de l'axe quadrature i_{qS} . En utilisant la méthode du courant nul sur l'axe d , la valeur de référence est égale à $i_{dsref}=0$.

Quant à la valeur du courant de référence dans l'axe q , i_{qsref} , sont calculés à partir d'une boucle de commande externe, qui est essentiellement la vitesse de rotation du rotor.

Après la simulation et l'analyse des performances de chaque méthode, nous avons constaté que le contrôleur MPPT basé sur la commande TSR et la commande floue d'ordre

Chapitre IV : Simulation et interprétation

fractionnaire permet de déterminer et de suivre le point de puissance maximale avec plus d'efficacité, une réponse rapide et une grande fiabilité par rapport aux autres contrôleurs basés sur PI et FOPI. Par conséquent, il est conclu que l'approche basée sur FFOPI offre de meilleurs avantages et de bonnes performances pour un système de conversion d'énergie éolienne.

Conclusion générale et perspectives

L'énergie est le secteur le plus fondamental pour la progression d'une nation. La production d'énergie se poursuit depuis de nombreuses années pour les besoins en énergie dans le monde entier, mais le vrai scénario est que le monde entier est actuellement confronté à une terrible crise énergétique malgré de nombreuses sources d'énergie.

La production, la distribution et l'utilisation de l'énergie doivent donc être aussi efficaces que possible sur le plan technologique et des incitations à économiser l'énergie pour les utilisateurs finaux doivent être mises en place.

Avec le développement rapide des technologies d'énergie éolienne et la croissance significative de la capacité mondiale installée d'énergie éolienne, le système de conversion de l'énergie éolienne est devenu un point focal dans la recherche des sources d'énergie renouvelables.

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable sont préférés en raison de leur meilleur rendement, de leur haute qualité de puissance et de leur faible charge aérodynamique. Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la valeur nominale, la turbine éolienne à vitesse variable (VSWT) peut extraire une puissance maximale si la vitesse de son rotor est adaptée de manière optimale en fonction de la vitesse variable du vent.

La puissance de sortie de l'éolienne, les performances de contrôle et l'efficacité dépendent fortement du coefficient de puissance C_p . Il s'agit donc de l'un des paramètres les plus importants des systèmes de production d'énergie éolienne.

L'objectif principal de cette thèse, consiste à identifier des stratégies de commande, qui permettront de répondre à des exigences spécifiques dans la zone où la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice, où la turbine éolienne sollicite des stratégies de commande sophistiquées et robustes pour un fonctionnement optimal à des différentes contraintes.

Ce travail de thèse est basé sur l'utilisation d'une génératrice synchrone à aimant permanent intégrée directement dans une éolienne à vitesse variable. Le choix d'une méthode d'attaque le point maximal de la puissance MPPT optimal moins cher et plus robuste et efficace pour

Conclusions générale et perspectives

extraire le maximum de puissance éolienne présente la problématique majeure. Ensuite, les performances de chaque méthode MPPT ont été étudiées.

Dans le premier chapitre nous avons présentés l'état de l'art des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et leurs technologies. Nous avons énoncé quelques chiffres concernant la production d'électricité dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne est devenue incontournable.

Les différents types de VSWT courants sont classés en fonction de l'orientation de la turbine, la taille de la puissance électrique et selon la vitesse de rotation des turbines. Ensuite, Nous avons parlé des différents types d'éolienne, les éoliennes à vitesse fixe, à vitesse variable, les éoliennes à axe vertical, à axe horizontal.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments qui constituent la chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Cela comprend les modèles aérodynamiques, mécaniques, de la génératrice synchrone à aimants permanents et de vitesse du vent et le modèle redresseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Dans le troisième chapitre, les méthodes de commande du convertisseur côté générateur pour suivre la puissance maximale générée à partir d'une éolienne à vitesse variable à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent en contrôlant la vitesse de rotation de la turbine sont détaillées.

L'algorithme de contrôle MPPT (maximum power point tracking) basé sur le rapport de vitesse de pointe optimal a été donné. La commande vectorielle est introduite pour contrôler les courants de PMSG.

Dans le dernier chapitre, le système de conversion de l'énergie éolienne est simulé et contrôlé à l'aide de l'environnement de simulation MATLAB / SIMULINK.

Perspectives :

Plusieurs points peuvent être envisagés pour la suite des travaux présentés dans cette thèse :

- Commander l'orientation des pales de l'éolienne,
- Compléter la chaîne de conversion d'énergie éolienne en ajoutant l'onduleur de connexion au réseau.
- Commander la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec prise en compte du réseau.
- Commander l'éolienne avec l'utilisation d'une information limitée sur le vent.