

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ -BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

ZITOUNI Mountassir
DJEMAI Abd Elhafid

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : ELECTROMECHANIQUE
Option : ELECTROMECHANIQUE

Thème : Commande non linéaire d'une éolienne à vitesse variable

Devant le jury composé de :

Mm.BEN SMAIL Samia	MCB	UAMOB	Président
M.AMEZIANE SADAK	MAA	UAMOB	Encadreur
Mm.AIT SAADI Zahra	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

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

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

*Avec respect, nous tenons à remercier tout le corps enseignant de l'Université Akli Mohand oulhadj de bouira pour nous avoir suivi tout au long de nos études. Nous remercions également notre encadreur Monsieur **amziane SADEK** pour son aide, ses conseils lors des simulations réalisées.*

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

Dédicace

**A mes parents avec toute ma gratitude pour toutes ces années de
sacrifices et d'encouragement**

A mes frères

A mes sœurs

A toute ma famille.

A tous mes amis

A tous ceux que j'aime

Je dédie ce travail.

ZITOUNI MOUNTASSIR

DÉDICACES

Je dédie ce travail:

A mes chers parents,

Qu'il me donné

Tout le courage la tendresse

A mes sœurs et frères

A toutes la famille DJEMAI

A tous mes amis

A tous ceux qui nous ont nourris de leur savoir

Djemai abdel hafid

RESUME

Ce travail est dédié à la modélisation et à la synthèse des lois de commande d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur un générateur synchrone à aimants permanents. L'étude ne traite que du côté de l'énergie éolienne, qui comprend l'aérodynamique de la turbine et le contrôle MPPT, le générateur synchrone magnétique permanent, le contrôle de modulation de largeur d'impulsion a été étudié. Premièrement, la modélisation des éléments constitutifs du système de conversion, le principe du contrôle vectoriel du générateur par régulation PI. Les simulations réalisées pour des opérations en seconde zone ou en maximisation

Mots clés

Générateur synchrone à aimants permanents, turbine éolienne, commande MPPT, commande vectorielle.

ملخص:

هذا العمل مخصص لنمذجة وتجميع قوانين التحكم في نظام تحويل طاقة الرياح القائم على مولد مغناطيس دائم متزامن. وتتناول الدراسة فقط جانب طاقة الرياح، الذي يتضمن الديناميكا الهوائية للتوربين والتحكم في MPPT، والمولد المغناطيسي المتزامن الدائم، وقد تمت دراسة التحكم في تعديل عرض النبض. أولاً، نمذجة مكونات نظام التحويل، مبدأ التحكم في متجه المولد من خلال تنظيم PI. عمليات المحاكاة التي تتم للعمليات في المنطقة الثانية أو في تعظيم.

الكلمات المفتاحية

مولد مغناطيس دائم متزامن، توربين الرياح، تحكم MPPT، التحكم الشعاعي.

RESUME

This work is dedicated to the modeling and synthesis of the control laws of a wind energy conversion system based on a synchronous permanent magnet generator. The study deals only with the wind energy side, which includes the aerodynamics of the turbine and the MPPT control, the permanent synchronous magnetic generator. The pulse width modulation control was studied. First, the modelling of the components of the conversion system, the principle of vector control of the generator by PI regulation. Simulations carried out for operations in the second zone or in maximization.

Keywords

Synchronous permanent magnet generator, wind turbine, MPPT control, vector control.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicas	II
Dédicas	III
Sommaire.....	V
Liste des figures	VII
Liste des symboles et notations	X
Introduction générale.....	01

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.1 Introduction	3
I.2 Définition du système éolien	3
I.3 Les différents types d'un système éolien	4
I.3.1 Typification selon l'axe de rotation	4
a. Les éoliennes à axe vertical	4
b. Eoliennes à axe horizontal	5
I.3.2 Typification selon la vitesse de rotation	6
a. Les éoliennes à vitesse de rotation fixe	6
b. Les éoliennes à vitesse de rotation variable	7
I.3.3 Typification selon la taille (puissance produite)	8
I.3.4 Typification selon le lieu d'implantation	8
I.4. Loi de BETZ	10
I.6 Les parcs éoliens	12
I.6.1 Contraintes de connexion des systèmes éoliens	13
I.7 Utilisation des systèmes éoliens	15
I.8 Conclusion	16

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART SUR LES GENERATEURS UTILISES DANS LES SYSTEMES EOLIENS A AXE HORIZONTAL

II.1 Introduction	17
-------------------------	----

II.2 Les Systèmes éoliens utilisant la machine synchrone	17
II.2.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)	18
II.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné	19
II.3 Les Systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone	20
II.3.1 Machine asynchrone à rotor bobiné	20
II.3.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	23
II.4 La machine synchrone à aimant permanent	26
II.4.1 Principe de fonctionnement de la MSAP	26
II.4.2 Les Différents types de la machine synchrone à aimants permanents	26
a. La Machine à flux radial	26
b. Machines à flux axial	27
II.4.3 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	29
a) Hypothèses simplificatrices	29
b). Transformation triphasé-déphasé	29
c).Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a.b.c)	29
d) Modèle de la MSAP dans le repère de Park	32
e) Mise en équation de la GSAP en biphasé	33
II.5 Conclusion	34

CHAPITRE III : LA COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A AXE HORIZONTAL A

VITESSE VARIABLE

III.1 Introduction	35
III.2 Modélisation et simulation de la partie mécanique de l'éolienne à vitesse variable adoptée	35
III.3 Modélisation et simulation de la partie électromécanique adoptée pour l'éolienne à vitesse variable	38
III.4 Modélisation de l'MPPT qui varie la vitesse de l'éolienne	40
III.4.1 Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure avec asservissement de la vitesse de rotation	40
III.4.2 Modélisation d'un redresseur commandé	42
III.5 La commande vectorielle d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable	43
III.5.1 Rappel	43
a. Commande vectorielle directe	44
b. Commande vectorielle indirecte.....	44
III.5.2 L'application de la commande vectorielle pour l'éolienne à vitesse variable	45

III.4.3 Synthèse des différents régulateurs	47
III.4.3.1 Régulateur PI.....	47
III.5.3 Résultats de simulation et interprétation	50
III.6 La commande par mode glissant d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable	53
III.6.1 Rappel	53
III.6.2 L'application de la commande par mode glissant pour l'éolienne à vitesse variable	55
III.6.3 Résultats de simulation et interprétation	58
III.8 Conclusion	60
Conclusion generale	57

Liste des Figures

Figure I.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne	4
Figure I.2 Exemple d'un système éolien à axe vertical type Savonius	5
Figure I.3 Exemples d'un système éolien à axe vertical type Darrieus	5
Figure I.4 Exemple d'un système éolien à axe horizontal	6
Figure I.5 Le système pitch contrôle	7
Figure I.6 Exemple d'un cite éolien Onshore	9
Figure I.7 Exemple d'un cite éolien Offshore	10
Figure I.8 Schéma principale de théorie de Betz	10
Figure I.9 L'allure du Coefficient de puissance	11
Figure I.10 Schéma mécanique de principe simplifié de la turbine	12
Figure I.11 Modèle mécanique simplifié de la turbine	14
Figure I.12 Architectures de connexion des éoliennes au réseau électrique	15

Figure II.1 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent..... (Configuration.1).....	20
Figure II.2 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent..... (Configuration 2).....	21
Figure II.3 Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné	21
Figure II.4 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 1).	22
Figure II.5 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 2).	23
Figure II.6 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 3).	24
Figure II.7 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 4).	24
Figure II.8 Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 5)	25
Figure II.9 Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.	25
Figure II.10 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil..... (Configuration 1).....	26
Figure II.11 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil..... (Configuration 2).....	27
Figure II.12 Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil..... (Configuration 3).....	27
Figure II.13 Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents.	28
Figure II.14-a- Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur	29
Figure II.14-b- Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur	29
Figure II.15 Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor.....	29

Figure II.16-a- Descriptif de la machine à flux axial stator externe	30
Figure II.16-b- Descriptif de la machine à flux axial stator interne.....	30
Figure II.17-a- Descriptif de la machine à multi-Flux axial multi Niveaux	31
Figure II.17-b- Machine à flux axial-Niveaux	31
Figure II.18 Schéma représentatif de la MSAP	32
Figure II.19 Modèle de PARK pour la GSAP.	34
Figure III.1 Schéma bloc du modèle de la turbine.....	35
Figure III.2 le coefficient de puissance(C_p).....	36
Figure III.3 L'évolution de puissance de la turbine à axe horizontal, à vitesse fixe et à vitesse variable.....	37
Figure III.4 bloc du modèle de la GSAP dans le repère (d q).....	39
Figure III.5 vitesse de rotation.....	39
Figure III.6 couple électromagnétique.....	39
Figure III.7 courants statoriques i_d et i_q	40
Figure III.8 MPPT avec l'asservissement de la vitesse.....	41
Figure III.9 Modélisation du redresseur commandé dans un repère fixe lié aux axes abc.....	43
Figure III.10 Schéma fonctionnel de la commande vectorielle adoptée pour l'éolienne à vitesse variable	46
Figure III.11 Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement.....	46
Figure III.12 boucle de régulation de courant i_d	48
Figure III.13 boucle de régulation de courant i_q	49
Figure III.13-a- vitesse du vent.....	50
Figure III.13-b- vitesse de rotation.....	50
Figure III.13-c- couple électromagnétique et moteur.....	51
Figure III.13-d- courants statoriques i_q	51
Figure III.13-e- P_{elec} à vitesse variable.....	51
Figure III.13-f- courants statoriques i_d	51
Figure III.13-j- La puissance électrique P_{elec} d'une éolienne à vitesse du vent fixe.....	51
Figure III.14 Boucle de régulation de la vitesse de rotation à base de régulateur PI.....	51
Figure III.14-a- vitesse du vent.....	52
Figure III.14-b- vitesse de rotation.....	52
Figure III.14-c- couple électromagnétique et moteur.....	52
Figure III.14-d- courants statoriques i_q	52
Figure III.14-e- P_{elec} à vitesse variable.....	52

Figure III.14-f -courants statoriques i_d	52
Figure III.14-j -La puissance électrique P_{elec} d'une éolienne à vitesse du vent fixe.....	53
Figure III.15 Schéma de principe du mode glissant dans le plan de phase.....	54
Figure III.16 Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant adoptée pour l'éolienne à vitesse variable	56
Figure III.17-a -vitesse du vent.....	58
Figure III.17-b -vitesse de rotation.....	58
Figure III.17-c -couple électromagnétique et moteur.....	58
Figure III.17-d -courants statoriques i_d	58
Figure III.17-e -courants statoriques i_q	59
Figure III.17-f - P_{elec} à vitesse variable.....	59
Figure III.17-g -La puissance électrique P_{elec} d'une éolienne à deux vitesses.....	59

LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS

V_1, V_2	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
P_{are}	La puissance aérodynamique
P_v	La puissance du vent
ρ	Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C)
F	les fors de l'air
C_p	Le coefficient de puissance
R	longueur de la pale
Ω_{turbin}	vitesse de la turbine
G	gain de multiplicateur
J	Moment d'inertie totale
λ	vitesse relative
β	Angle d'orientation des pales
C_g	Couple du multiplicateur
C_{are}	Couple aérodynamique de l'éolienne
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice
C_{em}	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
Ω_{ref}	Vitesse mécanique de référence de la génératrice
(d, q)	Indice du repère de Park lié au rotor
R_s	Résistance statorique
L_d	Inductance statorique directe
L_q	Inductance statorique quadratique
φ_d	Flux d'excitation des aimants permanents

LISTE DES SYMBOLES ET NOTATIONS

(U_{sd}, U_{sq})	Composantes de la tension au stator dans le repère de Park
(I_{sd}, I_{sq})	Composantes du courant statorique
P	Nombre de pair de pôles
F	Le coefficient de frottement
ω	Pulsation électrique statorique
K_{cp}	Gain proportionnel de la boucle de régulation de courant.
K_{ci}	Gain intégral de la boucle de régulation de courant.
S	Opérateur dérive de Laplace
Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor
e_d, e_q	Termes de découplages.
V_m	Valeur de crête de l'onde de modulation
M.P.P.T	Maximum Power Point tracking
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents

INTRODUCTION GENERALE

Il est clair que la croissance de la consommation mondiale d'énergie sous toutes ses formes, risques de pénurie des matières fossiles, et les effets polluants associés et causés par sa combustion. Face à ces problèmes certains pays, aidés par la déréglementation, se sont tournés vers des nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Dans ce contexte, les nouvelles énergies renouvelables constituent une variante inévitable qui peut contribuer au maintien du taux de développement industriel, et ralentir la cadence du changement climatique actuel, De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un Courant électrique.[1]

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique intègre différents organes électrotechniques, afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de l'électronique de puissance. La plupart des dispositifs utilisent des machines synchrones ou asynchrones, mais des études sont aussi réalisées dans l'objectif de développer des machines spéciales. L'interface électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a généralement pour but de commander le générateur afin d'extraire un maximum de puissance du vent(MPTT). [3]

La problématique qui se trouve dans ces systèmes éoliens c'est la difficulté de gérance à cause de l'instabilité de la vitesse du vent, la plupart des systèmes de conversion d'énergie éolienne sont conçus pour fonctionner à des vitesses allant de 750tr/m jusqu'au 1800tr/m, tandis que les turbines éoliennes sont conçues habituellement pour fonctionner dans une gamme de la vitesse comprise entre 20 tr/m et 250 tr/m. Pour cela l'utilisation des générateurs à attaque directe comme par exemple, le générateur synchrone à aimants permanents peut remédier à ce problème et adapter la vitesse de rotation de la turbine à la tension électrique.[4]

Pour atteindre l'objectif de commander l'éolienne à axe horizontal à vitesse variable d'une façon linéaire, nous avons réparties notre mémoire en 3 chapitres :

- Le premier chapitre expose l'état de l'art ou généralités sur les systèmes éoliens, des définitions, présentations des différents types des éoliens : éoliens axe vertical et horizontal, et les concepts physiques régissant leurs fonctionnements.
- Dans le deuxième chapitre nous intéresserons aux différentes architectures ou générateurs électriques utilisés dans les systèmes de conversion de l'énergie électrique ainsi qu'à la machine synchrone à aimants permanents d'une façon détaillée, la plus utilisée dans les éoliennes à petite puissance tournant à une vitesse variable.
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation de la machine GSAP et à la commande du générateur éolien à axe horizontal (machine à aimants permanents plus redresseur commandé) du point de vue estimation de la production d'énergie électrique à partir de plusieurs profils de vent ; et cela en utilisant une commande linéaire qui est la commande vectorielle (PI). Les différents résultats sont établis via la plateforme Simulink du logiciel Matlab.

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES

EOLIENS

I.1 Introduction :

L'intérêt porté aux systèmes éoliens résulte de deux préoccupations, d'une part, la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte d'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance. [29] Dans ce premier chapitre, on va essayer de donner un aperçu général sur les systèmes éoliens (définition et principe de fonctionnement, classification, les différents constituants avec leurs modélisations...).

I.2 Définition du système éolien :

* Le système éolien peut être défini comme étant un ensemble de constituants apte à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite le plus souvent transformée en énergie électrique. Les systèmes éoliens qui produisent de l'électricité sont généralement nommés aérogénérateurs (le cas de notre étude). Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire. [33] Les termes : centraux éoliens, parc éolien ou ferme éolienne sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à Terre ou en Mer ou encore en Air.

* Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [1]. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [2].

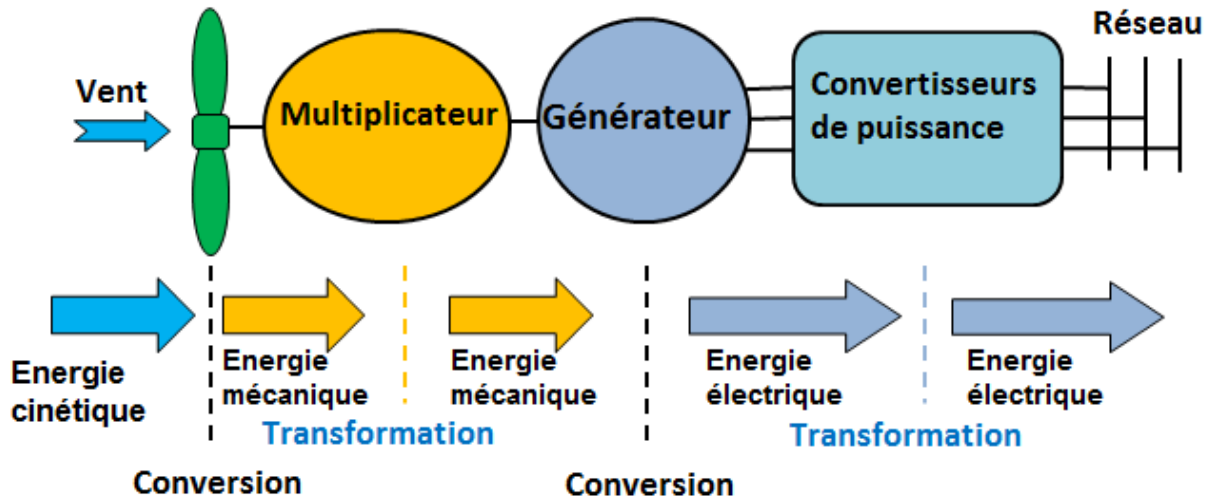


Figure (I.1) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.

I.3 Les différents types d'un système éolien :

Plusieurs types du système éolien peuvent être cités, c'est selon la typification adaptée.

I.3.1 Typification selon l'axe de rotation :

a. Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité car elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [3]. Les structures les plus répandues dans le stade de l'industrialisation sont [1] :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.

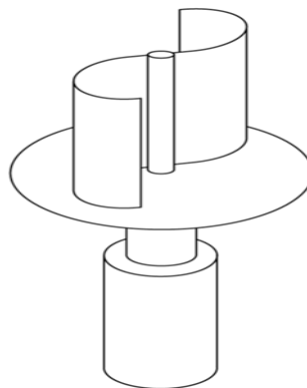


Figure (I.2) : Exemple d'un système éolien à axe vertical type Savonius [4].

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure est la plus répandue sont celles de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

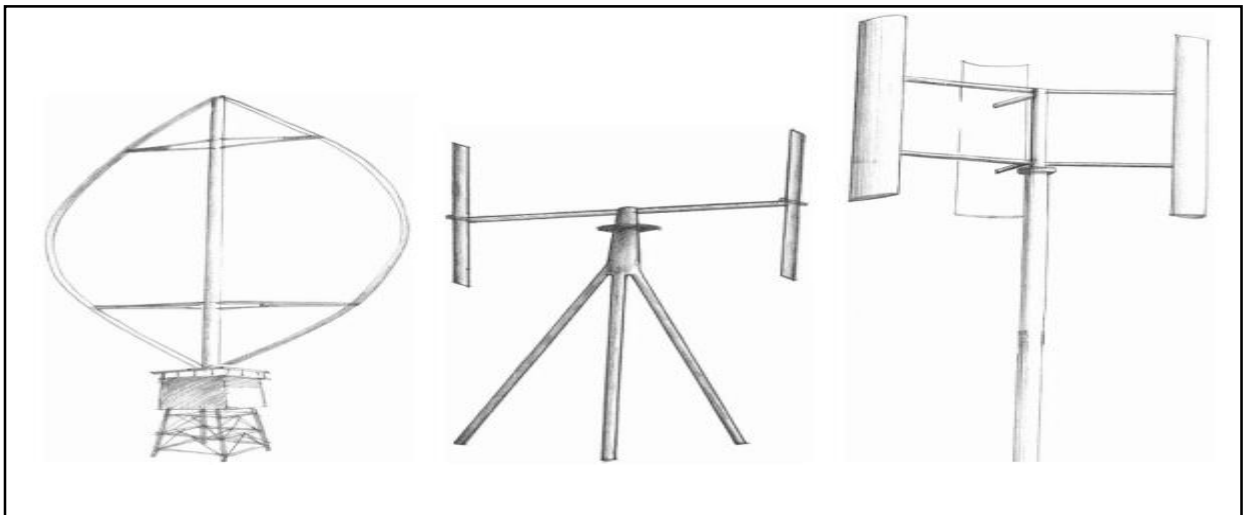


Figure (I.3) : Exemples d'un système éolien à axe vertical type Darrieus [4].

b. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent, elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères.

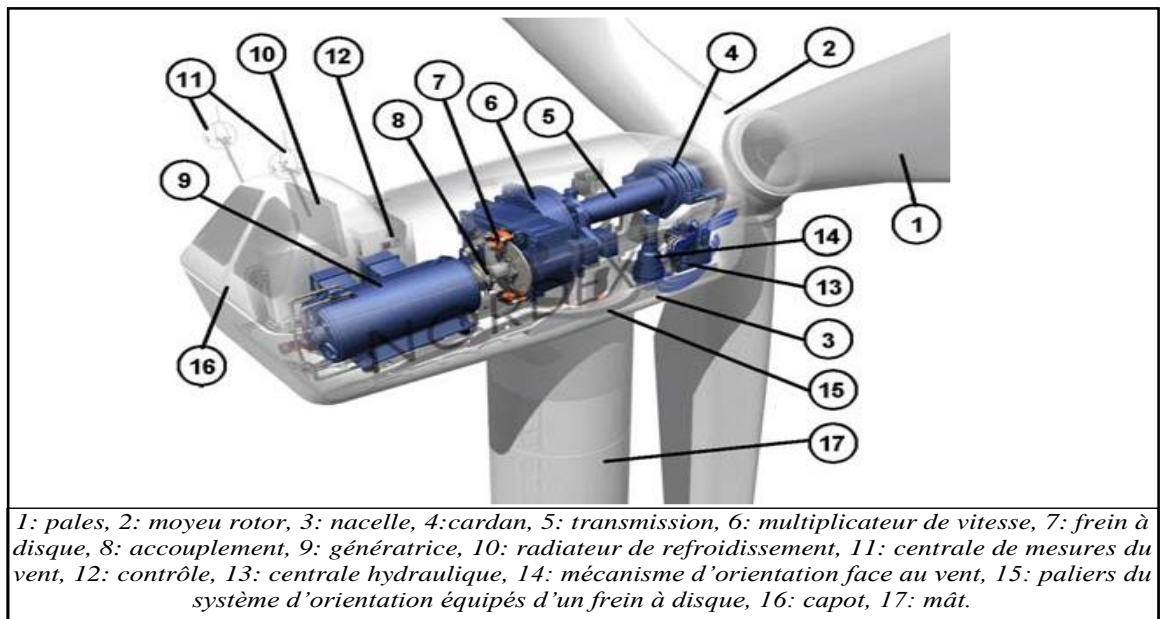


Figure (I.4) : Exemple d'un système éolien à axe horizontal [4].

I.3.2 Typification selon la vitesse de rotation :

a. Les éoliennes à vitesse de rotation fixe :

Dans cette technologie la génératrice est directement couplée au réseau, sa vitesse de rotation est alors imposée par le nombre de paires de pôles de cette dernière et la fréquence du réseau. On distingue deux classes :

❖ Le système « pitch contrôle » :

La régulation active par vérins hydrauliques, consiste à faire varier l'angle de calage des pales β pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort.

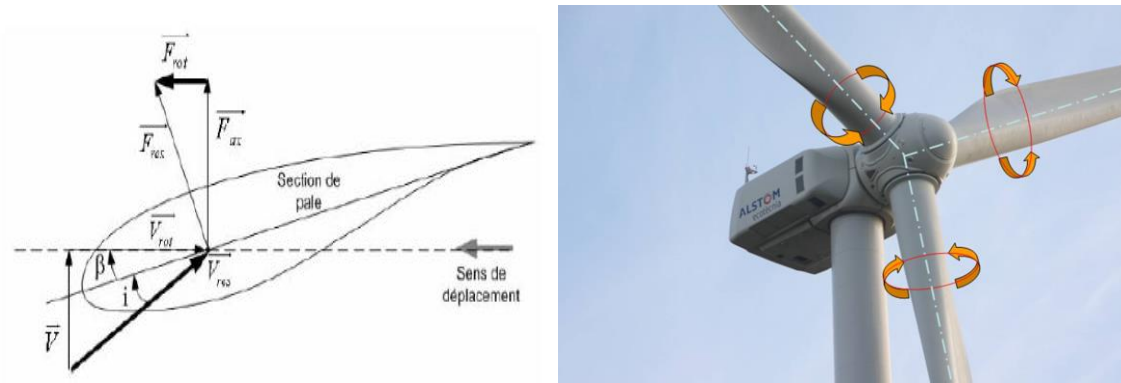


Figure (I.5) : Le système pitch contrôle

❖ **Le système « stall contrôle » :**

C'est un élément essentiel de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor. Ces systèmes peuvent être plus ou moins fins, et plus ou moins automatiques. La plupart des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. On cherche donc à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même.

b. Les éoliennes à vitesse de rotation variable

Dans cette technologie la génératrice est apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale, l'utilisation de convertisseurs statiques est fondamentale. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement :

- **La technique mécanique :** c'est une technique qui utilise les paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens-là on distingue deux modes [5, 6], le « stall control » (basé sur l'accrochage et le décrochage de la génératrice à la turbine), robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite, il s'agit donc d'une solution passive, et le « pitch control » (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.
- **La technique électrique :** c'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse [2].

- **La technique hybride** : c'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du système [2, 1].

I.3.3 Typification selon la taille (puissance produite) :

En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne, en effet cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui est en fonction du diamètre de ce dernier, bien que pour les grandes éoliennes une règle de bonne pratique veut que la hauteur du Mat soit égale au diamètre du Rotor.

a. Les micro-éoliennes ($P_{elec} \approx 0.25kW$) : Utilisé en générale pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple : des sites de pêches, des bateaux, des caravanes...), leurs diamètres est souvent entre 0.5m et 1.25m.

b. Les mini-éoliennes ($P_{elec} \approx 1.5kW$) : Essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maison isolées), diamètre entre 1.25m et 3m.

c. Les éoliennes domestiques ($P_{elec} \approx 15kW$) : C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers, leurs diamètre généralement entre 3m et 10m.

d. Les petites éoliennes : Elles sont conçues pour les petites entreprises, les fermes.... $P_{elec} \approx 100kW$, leurs diamètres est souvent entre 10m et 20m.

e. Les moyennes éoliennes ($P_{elec} \approx 1MW$) : Elles sont utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voir des petits parcs éoliens, diamètre entre 20m et 50m.

f. Les grandes éoliennes ($P_{elec} \approx 3MW$) : Ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces, leurs diamètre est à partir de 50m.

I.3.4 Typification selon le lieu d'implantation :

a. Les éoliennes implantées sur terre : Elles sont nommées aussi « Onshore », type qui a la possibilité de produire de l'électricité au voisinage du prix du marché électrique domestique et cela à partir d'un vent relativement faible et non constant.



Figure (I.6) : Exemple d'un cite éolien Onshore [5].

b. Les éoliennes implantées en mer : Le fonctionnement d'une éolienne implantée en mer ou encore nommée « Offshore » est le même qu'une éolienne terrestre. Elle transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Par contre, elle doit être plus robuste pour résister aux conditions extrêmes rencontrées au large. Le mat doit résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion est renforcée et le raccordement électrique implique des câbles sous-marins. Tous ces critères rendent l'exploitation de ce type de système plus chère que celui de l'Onshore.



Figure (I.7) : Exemple d'un cite éolien Offshore [5].

I.4. Loi de BETZ :

La théorie du éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le turbine éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 [6].

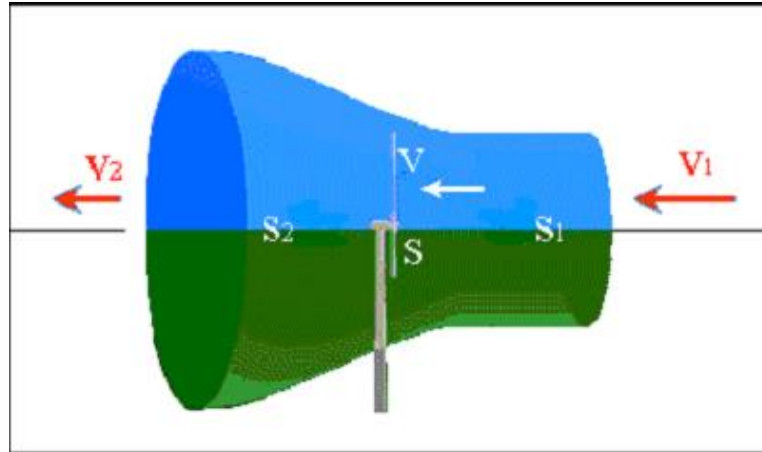


Figure (I.8) : Schéma principale de théorie de Betz.

De la figure on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement:

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{I.1})$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par :

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{I.2})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{I.3})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.4})$$

On en déduit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I.5})$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (1.2) et (1.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.6})$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance correspondante P_{mt} serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.8)$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (I.9)$$

Ce coefficient présente un maximum de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ [7]. C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine, il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β).

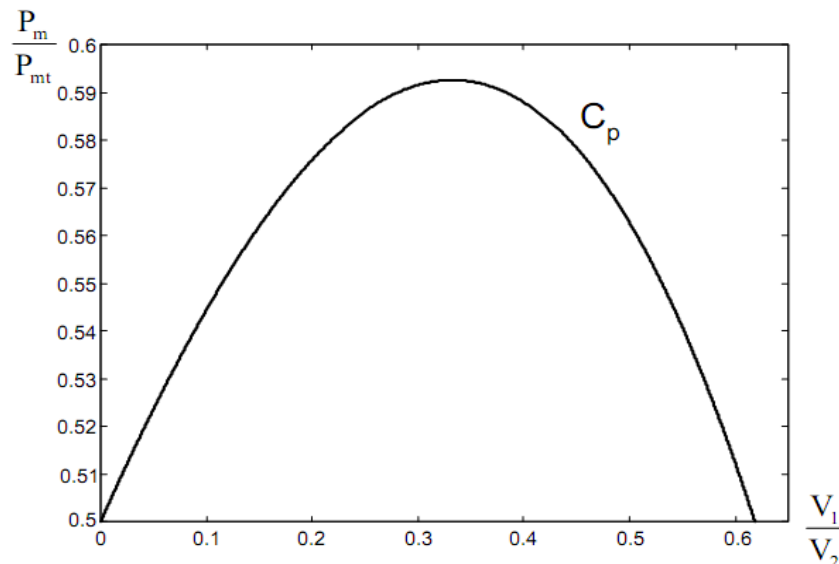


Figure (I.9) : L'allure du Coefficient de puissance.

En combinant les équations (1.8) et (1.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right) P_{mt} = C_p(\lambda) P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.10)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbin} \cdot R}{v_1} \quad (I.11)$$

Avec :

Ω_{turbin} : vitesse de rotation de la turbine.

R : La longueur (rayon) de la pale.

I.6 Les parcs éoliens :

Le regroupement d'un ensemble d'éoliennes à vitesse fixe ou variable constitue une ferme éolienne onshore ou offshore. Deux architectures de connexion des éoliennes au réseau électrique peuvent être distinguées. La première consiste à les connecter au réseau au moyen des liaisons en tensions à travers un transformateur. La seconde architecture repose sur la connexion des éoliennes entre elles via une liaison en tension continu dont le bus continu est dimensionné pour la tension nominale de la génératrice. En suite un seul convertisseur continu-alternatif, permet de relier l'ensemble des éoliennes au réseau électrique cette architecture, envisagée particulièrement pour les fermes éolienne offshore, permet une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de raccordement [8].

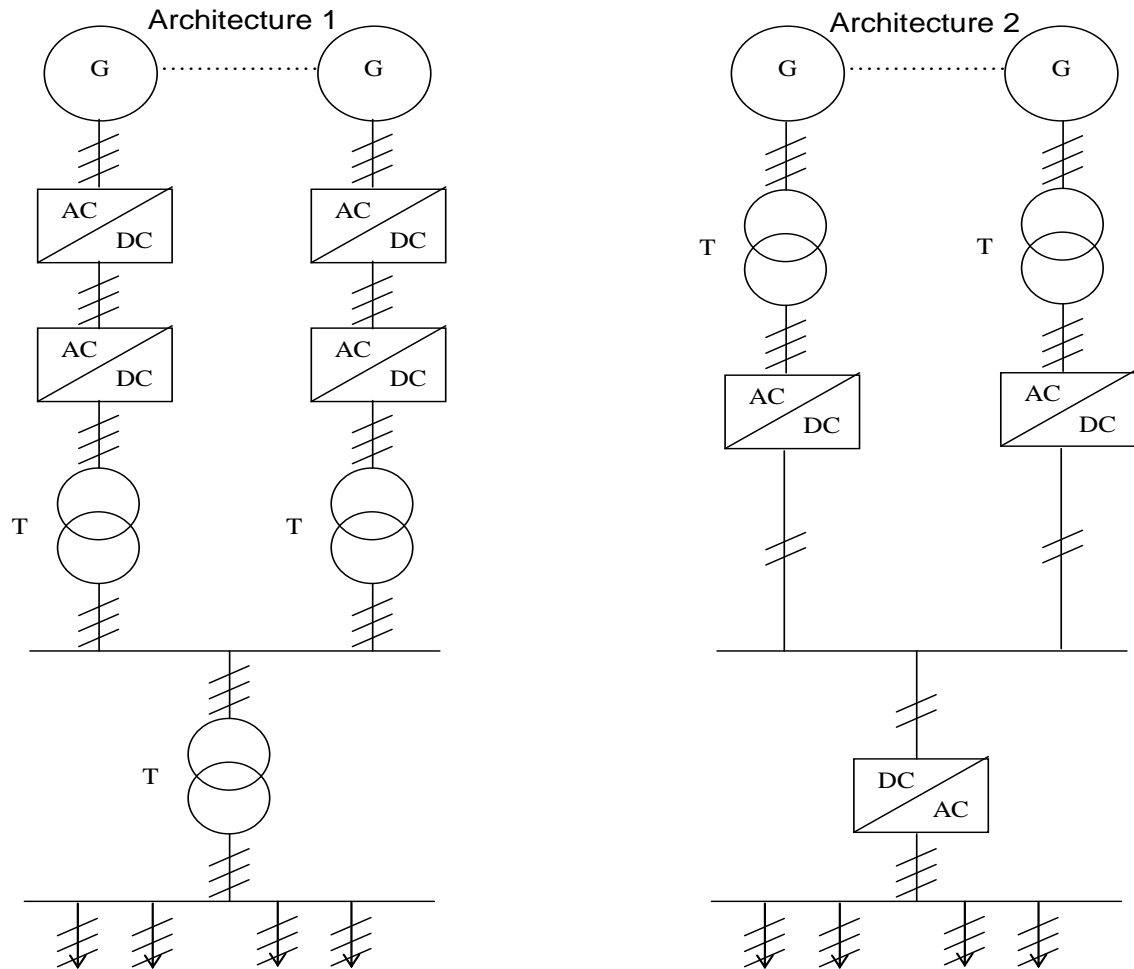


Figure (I.10) Architectures de connexion des éoliennes au réseau électrique.

I.6.1 Contraintes de connexion des systèmes éoliens :

Aujourd'hui le taux de pénétration des systèmes éoliens devient de plus en plus significatif dans les réseaux. La puissance produite par ces systèmes définit le réseau auquel ils vont être connectés. En effet, le raccordement de l'aérogénérateur au réseau public de transport s'effectue selon la quantité de la puissance produite. Dans le cas de la France par exemple, si la puissance produite du système est supérieure à 12MW alors la connexion s'effectue à un niveau de tension supérieur ou égale à 63kV (domaine de la HTB en France) ; dans le cas contraire le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20kV (domaine de la HTA et de la BT).

Les systèmes éoliens se comportent généralement comme des générateurs passifs du point de vue électrique à cause de :

- La difficulté de prévision de la production de puissance à cause de son profil aléatoire ;
- L'absence de réglage des puissances actives et réactives ;
- L'absence de réglage puissance active-tension ;

- L'absence réglage puissance réactive-tension ;
- La sensibilité élevée au creux de tension et aux variations de fréquence pour certaines technologies ;
- La sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent.

C'est pour cela que des réglementations techniques pour le raccordement des installations de production au réseau électrique, entre autres les systèmes éoliens, sont bien prescrites, dans des textes réglementaires tels que décrets et arrêtés. Le décret et l'arrêté présentent quelques réglementations générales pour le raccordement des installations au réseau électrique français :

- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement ;
- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :
 - Les réglages primaire et secondaire de la tension ;
 - Les réglages primaire et secondaire de la fréquence ;
 - Le fonctionnement en réseau séparé ;
 - Le renvoi de tension et la participation à la reconstituions du réseau.
- Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport ;
- Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif. Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation ;
- Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter, dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation, les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gestionnaire du réseau de transport. L'arrêté précise ces contraintes de raccordement en fonction du type d'installation sans prétendre être exhaustifs ;

- Pour les installations de puissance supérieure à 10MW, chaque génératrice électrique doit pouvoir fournir à ses bornes une puissance active minimale égale à '0.6' de sa puissance nominale apparente et absorber une puissance réactive égale à '0.2' de la même puissance pour régler la tension au point de raccordement de ces systèmes éoliens.

I.7 Utilisation des systèmes éoliens :

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

- **Le pompage de l'eau :** Depuis des générations, on utilise le vent comme source d'énergie fiable et économique dans les systèmes de pompage de l'eau. Dans les régions rurales ou éloignées, l'installation d'un système de pompage éolien mécanique ou électrique peut constituer le meilleur moyen d'assurer les besoins en eau du bétail, du ménage ou même de la communauté.
- **Récréation :** Utiliser le vent pour assurer les besoins énergétiques d'un chalet ou d'un bateau peut être plus efficace et plus économique que d'utiliser des générateurs à carburant fossile. Un système éolien écologique peut fournir l'électricité nécessaire à l'éclairage, de même qu'au fonctionnement de la radio et des petits appareils ménagers.
- **Fermes et ranchs :** Les fermiers utilisent le vent pendant des siècles pour pomper eau. Les systèmes éoliens peuvent, de nos jours, rendre encore plus de services dans une exploitation agricole moderne. Comme ils représentent la solution idéale lorsqu'on a besoin d'électricité à basse tension dans des endroits éloignés, les générateurs fonctionnant à l'énergie éolienne sont utilisés, dans les fermes, pour alimenter en électricité les clôtures électriques et les systèmes d'éclairage extérieur.
- **Usage domestique :** Les habitants de la campagne, désireux de réduire l'effet indésirable sur l'environnement de leur consommation d'énergie, peuvent restreindre leur dépendance par rapport au réseau d'électricité en utilisant un système éolien. Même un mini système éolien permet d'économiser de l'électricité produite à partir de carburants fossiles ou de l'énergie nucléaire. [8]

I.8 Conclusion :

Ce chapitre représente un état de l'art des systèmes éoliens, la théorie des aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la partie électrique des systèmes éoliens à axe horizontal.

CHAPITRE II :
ETAT DE L'ART SUR LES GENERATEURS
UTILISES DANS LES SYSTEMES EOLIENS
A AXE HORIZONTAL

II.1 Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). La technologie des aérogénérateurs à axe horizontal a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne [09]. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Dans ce chapitre, on présente les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens à axe horizontal ainsi que la quelques détails sur la machine synchrone à aimant permanent.

II.2 Les Systèmes éoliens utilisant la machine synchrone :

Le générateur synchrone peut générer son champ magnétique à travers des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple est moins coûteux. Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité [10]. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [10].

II.2.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [10].

Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure.II.1). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [10].

Dans la configuration de la GSAP de la Figure (II.1), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance [10].

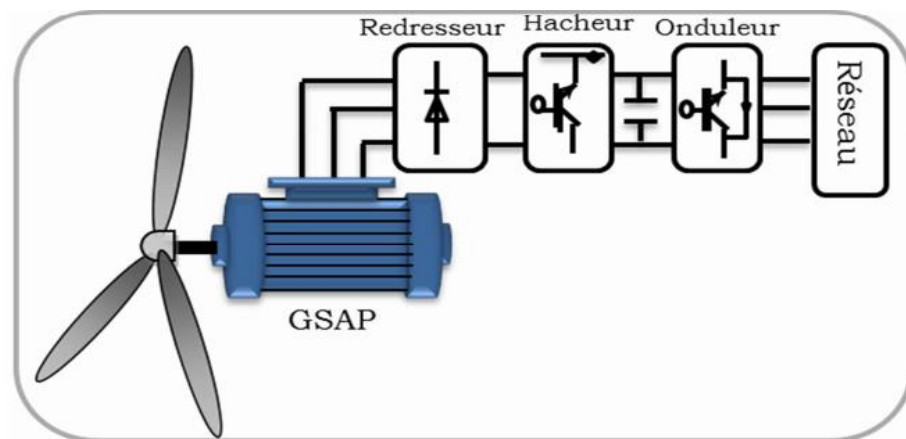


Figure II.1 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent (Configuration 1).

En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Figure(II.2), un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu [10].

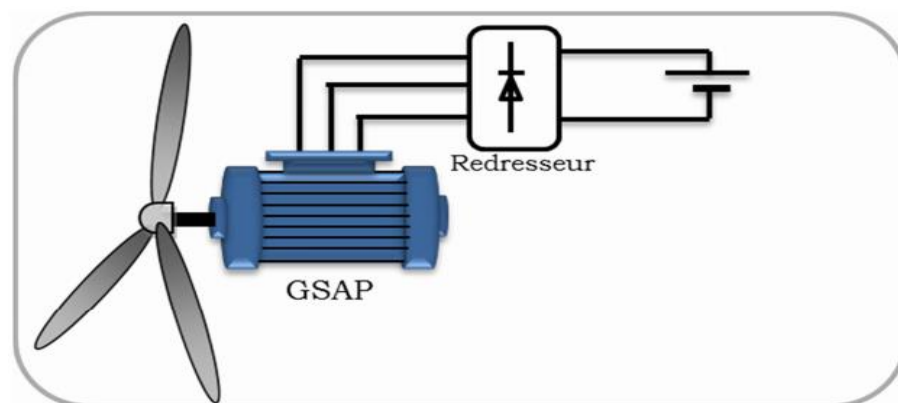


Figure II.2 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent (Configuration 2).

II.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné :

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré généralement par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.

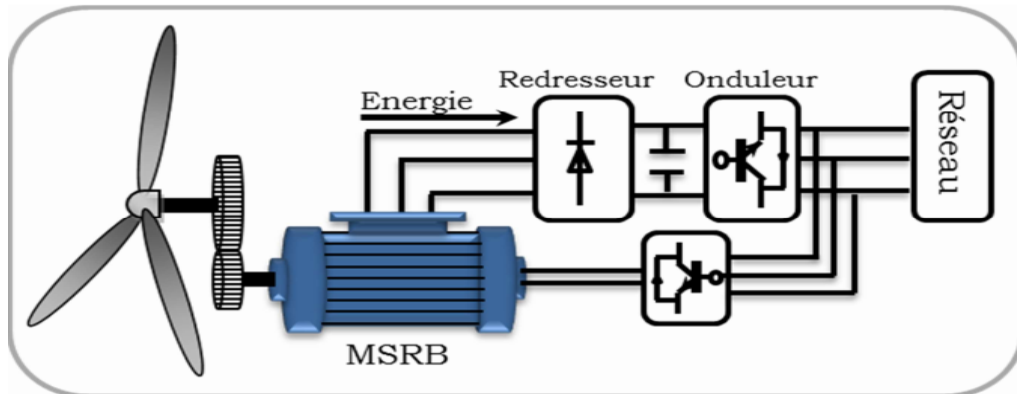


Figure II.3 : Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.

II.3 Les Systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone :

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [11].

II.3.1 Machine asynchrone à rotor bobiné :

Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure (II.4)). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [12]. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor [01] [02].

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage) [12].

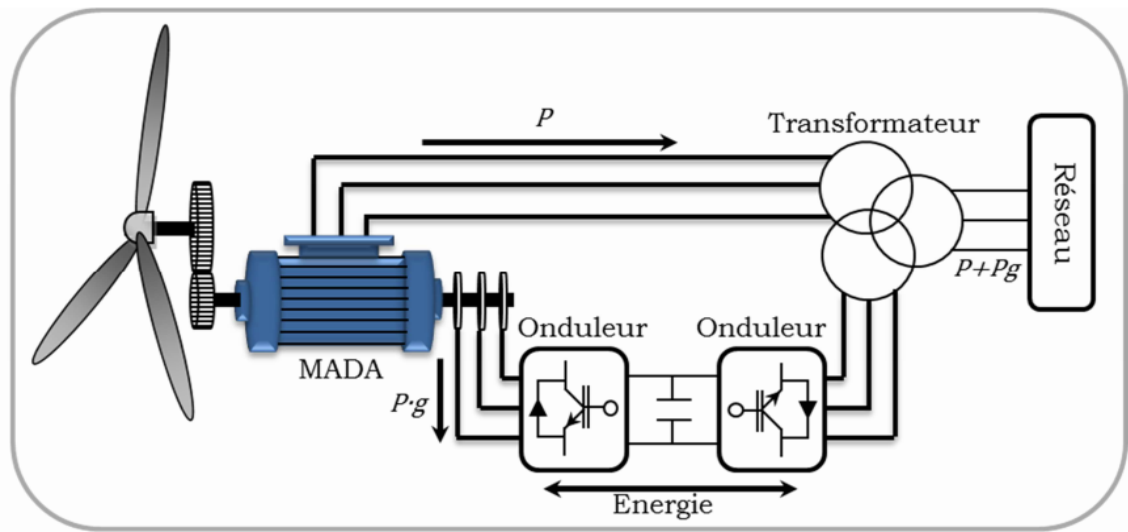


Figure II.4 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 1).

La configuration à vitesse variable représentée sur la Figure (II.5) s'appelle la structure de Kramer, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur et un

Onduleur est placé en sortie du redresseur. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine [13].

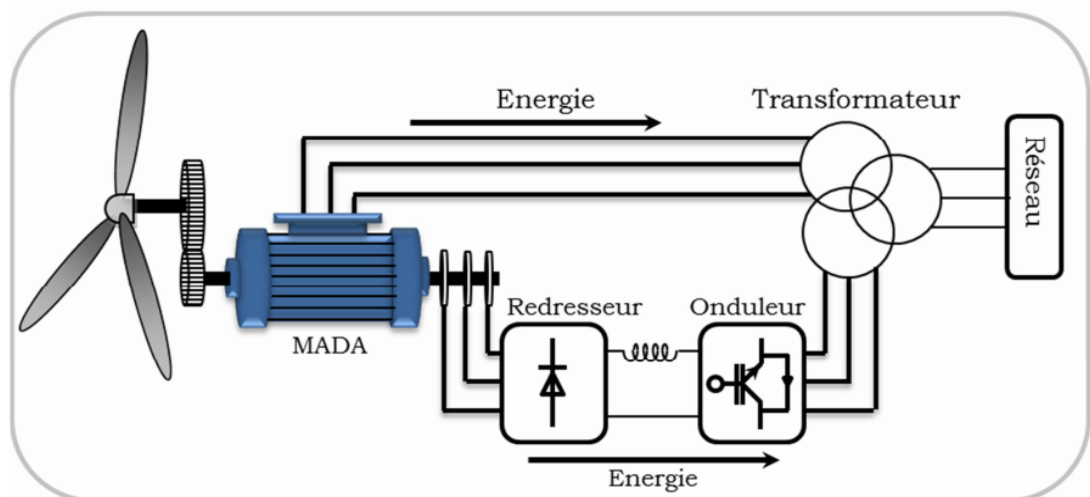


Figure II.5 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 2).

La Figure (II.6) représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [13].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10% [13].

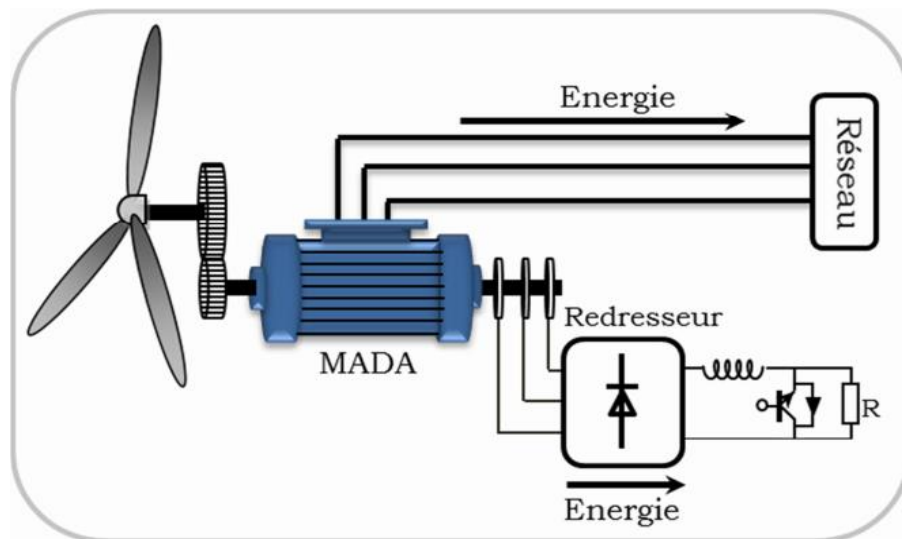


Figure II.6 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 3).

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cyclo-convertisseur (Figure (II.7)) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure (II.6) [14].

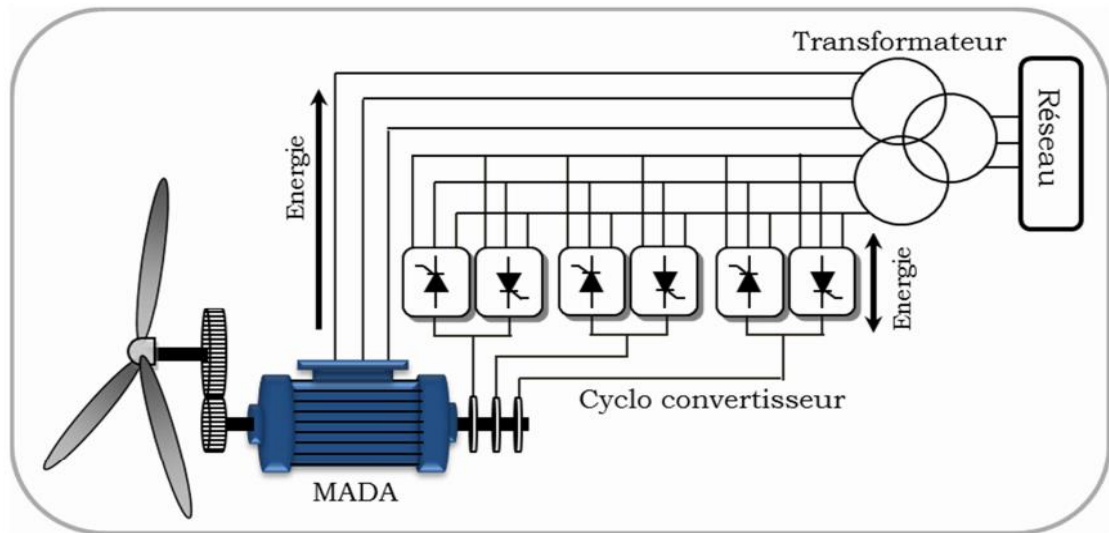


Figure II.7 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 4).

La machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless" est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure(II.8) [14].

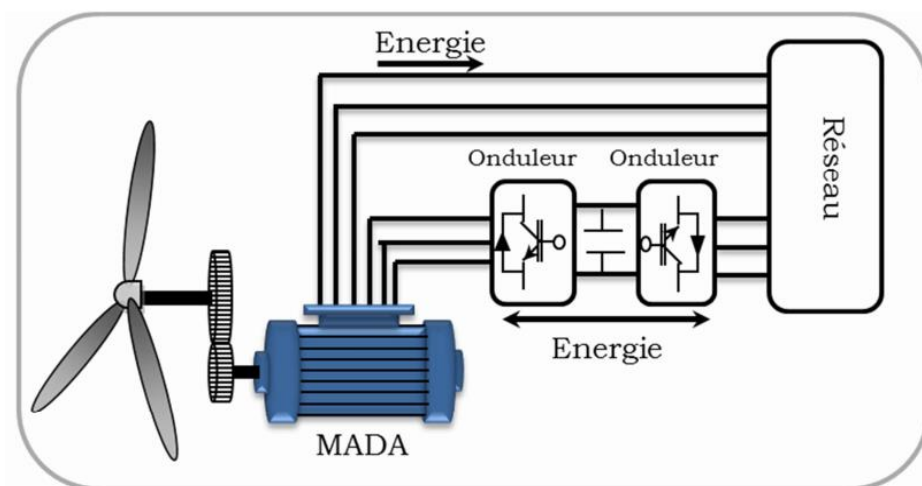


Figure II.8 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné (Configuration 5)

II.3.2 Machine asynchrone à cage d'écurueil

La machine asynchrone à cage est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure (II.9) [15].

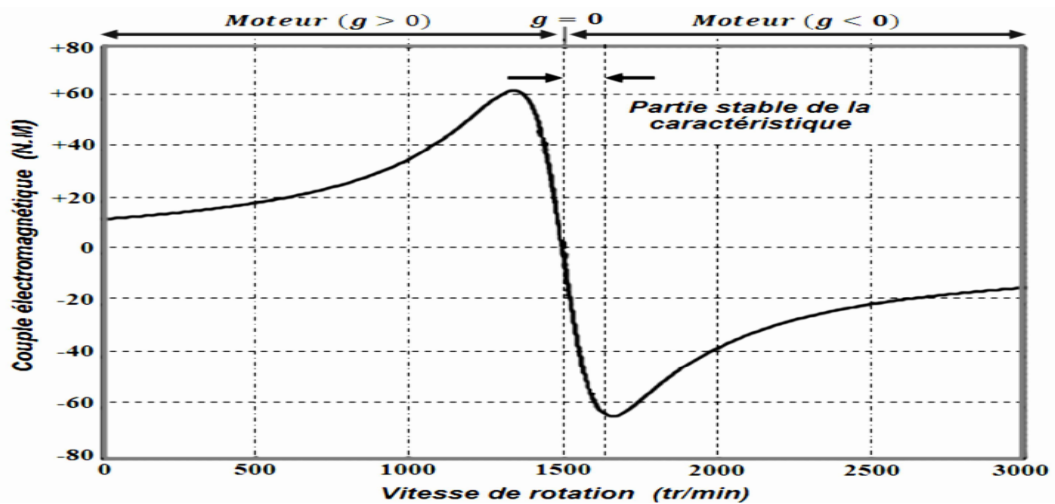


Figure II.9 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min [15].

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure (II.10) [15].

La machine à un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs [12]. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure (II.10), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne. Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

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

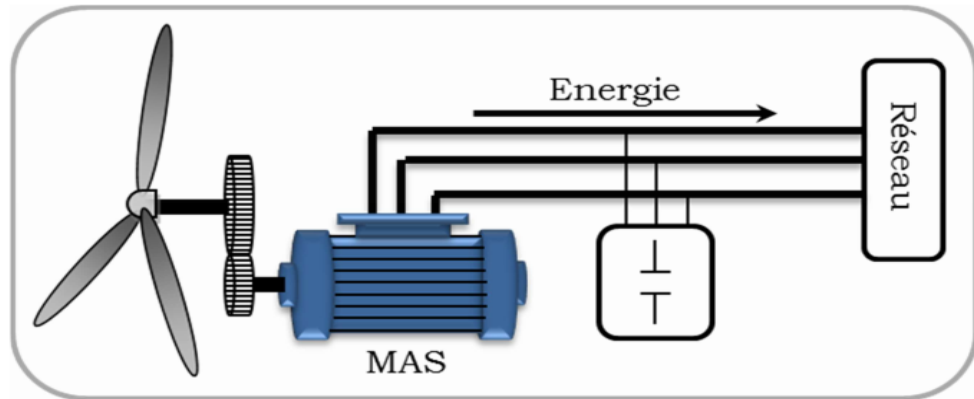


Figure II.10 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil (Configuration 1).

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (Figure(II.11)) [15].

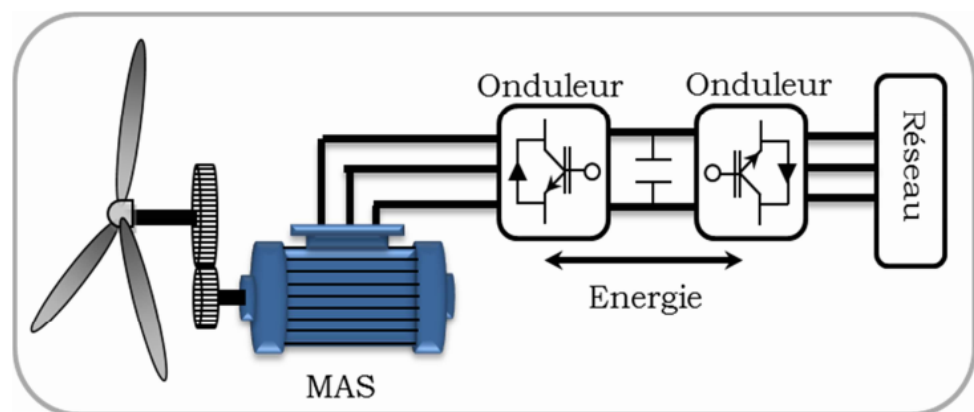


Figure II.11 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil (Configuration 2)

La machine asynchrone à double stator, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Figure (II.12)) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par

changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

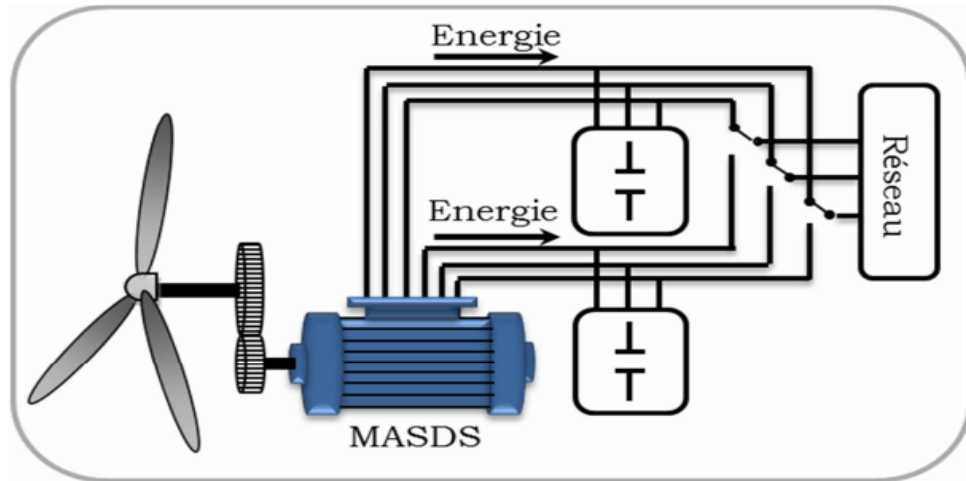


Figure II.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil (Configuration 3).

II.4 La machine synchrone à aimant permanent :

Les machines synchrones vis-à-vis des machines asynchrones ont une puissance massique plus importante et le flux rotorique étant connu, il est plus facile de maîtriser le couple. Les progrès fait dans la fabrication des aimants, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou de terre rares font qu'aujourd'hui l'utilisation des MSAP. Aux plans technologiques les aimants peuvent être surfaciques ou placés dans la profondeur du rotor, ils sont dit alors enterrés.

II.4.1 Principe de fonctionnement de la MSAP :

Le principe de fonctionnement des machines synchrones à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champs créé par les enroulements du stator interagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. On définit un "pas" élémentaire θp comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure $\theta p = 90$. Ceci correspond au passage de la figure (II.13.a) à la figure (II.13.c). Les demi-pas sont obtenus par deux phases à la fois (figure (II.13.b)).

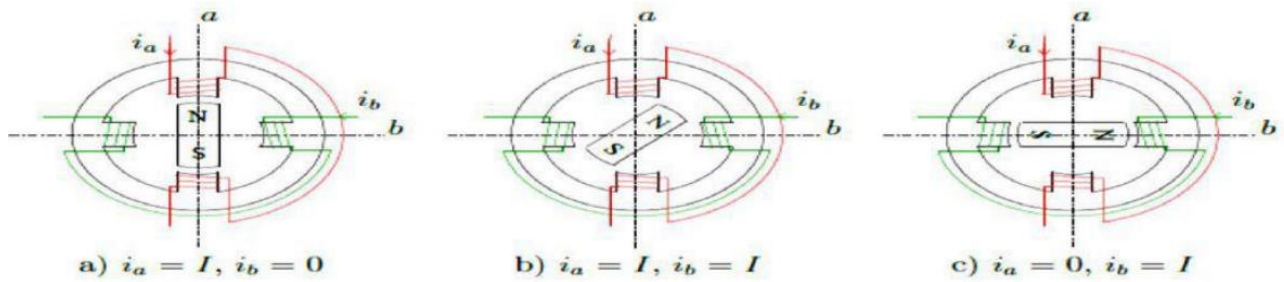


Figure II.13 : Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents.

II.4.2 Les Différents types de la machine synchrone à aimants permanents :

a. La Machine à flux radial :

La machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue dans l'industrie. La première machine synchrone à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est reparti et les aimants placés en surface (Figure (II.14)). Dans les essais, il est possible de la retrouver pour équiper un turbo compresseur (50 kW, 70000 tr/min, 8 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40 kW, 6000 tr/min, 4 pôles) (6 kW, 6000 tr/min, 12 pôles). Elle permet de mettre en avant l'augmentation significative du rendement et de la puissance massique par rapport aux machines asynchrones [16].

L'inconvénient majeur de cette machine est l'emplacement des aimants. En effet, en les mettant en surface, les applications à haute vitesse sont difficiles.

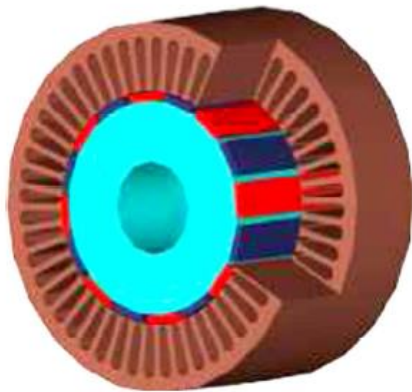


Figure II.14.a. Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur

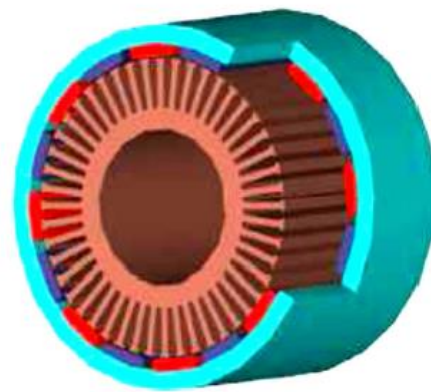


Figure II.14.b. Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur.

Le rotor de la machine peut être placé à l'extérieur du stator c'est pour diminuer le risque de décollement des aimants. L'application éolienne (20kW, 210 tr/min, 36 pôles) et ascenseur en sont également de bons exemples. Néanmoins, l'augmentation d'encombrement de ces machines provoque de nombreux problèmes mécaniques [16].

b. Machines à flux axial

b.1 Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor : Le fonctionnement de ce type de machine est basique car il ne fait intervenir qu'un stator et un rotor. Le flux crée par un bobinage au niveau de stator va interagir avec le flux crée par les aimants permanents colles en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique. Malgré sa conception simple, cette machine accuse de forts problèmes d'attraction entre stator et rotor qui imposant des ajouts mécaniques lourds et coûteux [16].

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

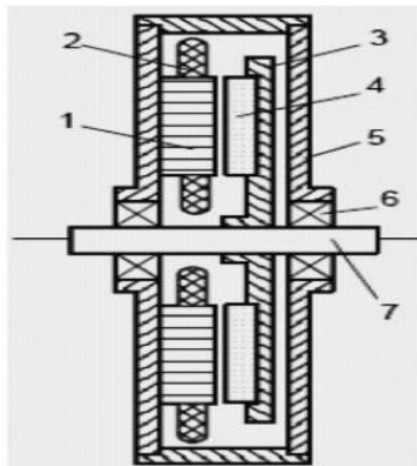


Figure II.15 : Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor.

b.2 Machines à flux axial à stator interne ou externe : A cause de ce problème d'attraction axiale, les concepteurs se sont penchés sur des machines équipées de 2 entrefers communément appelées à stator interne ou stator externe. La présence de 2 rotors ou de 2 stators permet de rééquilibrer les forces d'attractions entre les pièces actives de la machine et ainsi diminuer le risque d'attraction entre le stator et le rotor. Ces types des machines obtiennent de bons résultats en termes couple et puissance.

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

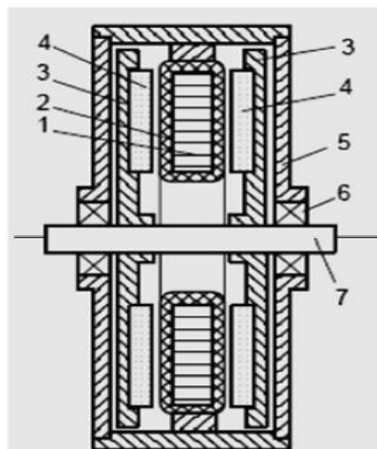


Figure II.16.a : Descriptif de la machine à flux axial stator externe

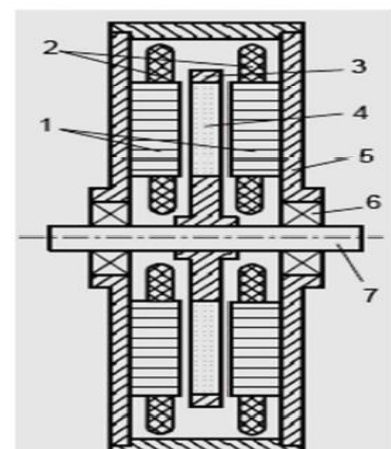
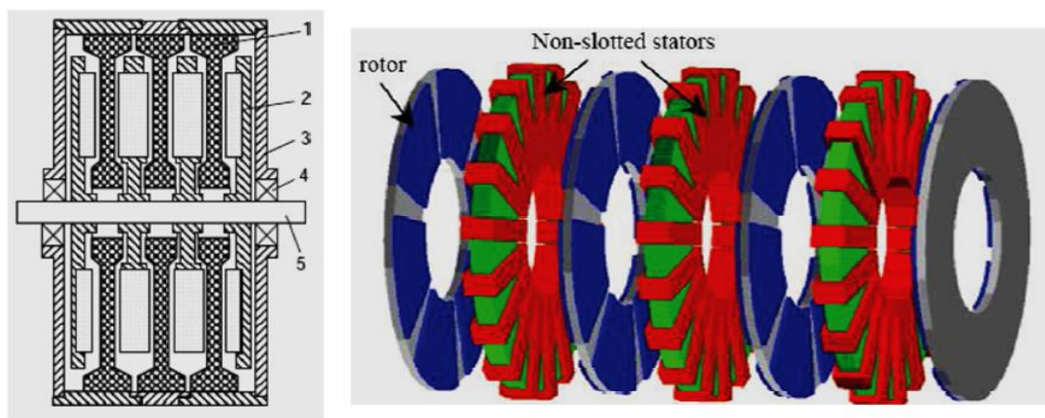


Figure II.16.b : Descriptif de la machine à flux axial stator interne.

b.3 Machines à flux axial à stator multiples ou multi disques : L'adaptabilité est le principal avantage des machines à flux axial multi disques. Pour augmenter la puissance ou le couple d'une machine il suffit d'ajouter sur le même axe de rotation un nouveau stator et rotor. Le principe global de fonctionnement reste identique aux machines discoïdes à simple ou double entrefers.

Les principaux inconvénients sont la difficulté pour bien aligner sur le même axe les différents étages de la machine et la nécessité d'ajouter des renforts mécaniques contre l'attraction magnétique stator / rotor. Dans la littérature scientifique, ces machines sont donc étudiées pour des applications a grandes puissances telles que l'éolien ou pour la traction ferroviaire (571 kW, 680tr/min, 16 pôles) [16].



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

Figure II.17.a : Descriptif de la machine à Flux axial multi Niveaux

Figure II.17.a : Machine à flux axial multi-Niveaux

II.4.3 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents :

a) Hypothèses simplificatrices :

Le modèle mathématique la machine synchrone à aimant permanent obtient certaines hypothèses essentielles simplification :

- absence de la saturation dans le circuit magnétique.

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- L'hystérésis, les courants de Foucault.
- L'effet de peau sont négligé.
- Le circuit magnétique est considéré linéaire.
- machine alimentée par un système de tensions triphasées sinusoïdales et équilibrées.

b). Transformation triphasé-déphasé :

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

c).Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a.b.c) :

La machine synchrone à aimants permanents peut être modélisée par trois équations électriques et une seule équation mécanique, les tensions aux bornes des trois phases sont exprimées en fonction des courants et des flux par les équations suivantes :

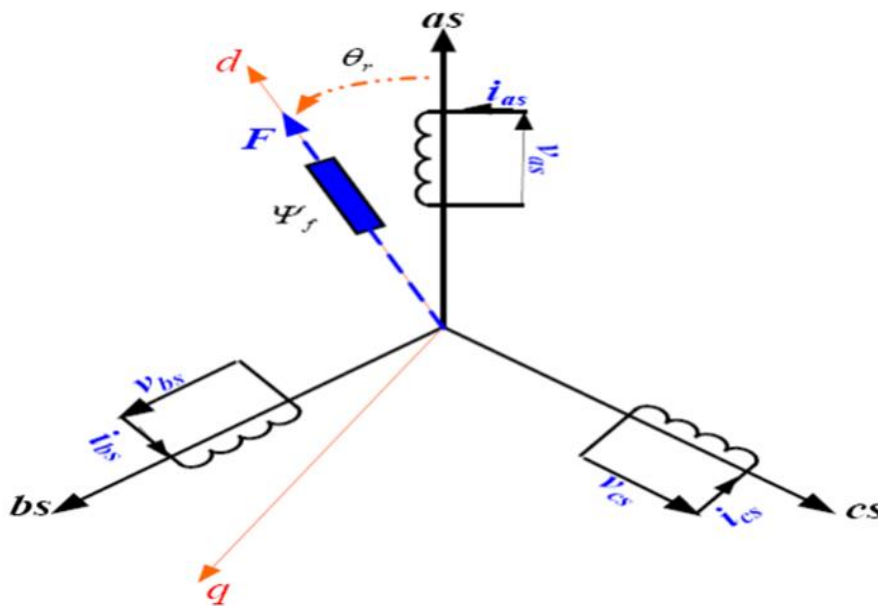


Schéma **Figure (II.18)** : représentatif de la MSAP.

1. Les équations électriques :

Les équations électriques des machines électriques dans le repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} \varphi_s \quad (\text{II.1})$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Où :

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Vecteur tension déphases statorique

$[I_s] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$: Vecteur courants de phases statorique.

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statorique.

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{La résistance d'une phase d'enroulement statorique.}$$

2. Equations magnétiques :

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [\varphi_{sf}] \quad (\text{II.3})$$

Avec :

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

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

et

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

Avec :

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

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

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

3. Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$C_f = f\Omega$$

J : Et le moment d'inertie du moteur

f : C'est le coefficient de frottement visqueux

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

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

d) Modèle de la MSAP dans le repère de Park :

Dans le repère classique, il existe trois axes (as, bs, cs) orientés selon les axes des trois enroulements statiques de la machine. L'axe as est généralement utilisé comme référence pour les conversions ultérieures. Pour le rotor, pour un moteur synchrone à aimants permanents, il y a toujours un axe (F correspond au sens d'aimantation), et θ donne la position du rotor par rapport au stator. Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique transforme les trois bobines statorique déphasées de $2\frac{\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\frac{\pi}{3}$ et situées sur le rotor.

$$[Vabc] = [P(\theta)][Vdq0] \quad (\text{II.5})$$

$$[Vdq0] = [P(\theta)]^{-1} [Vabc] \quad (\text{II.6})$$

$[Vabc]$ et $[Vdq0]$ Sont les matrices de passage directe et inverse, qui sont données par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right) & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right) & \left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right) & \left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right) \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

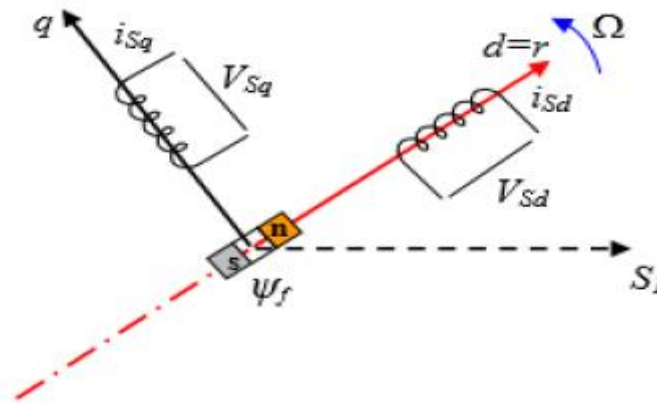


Figure (II .19) : Modèle de PARK pour la GSAP.

Choix du référentiel :

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

* Référentiel lié au stator :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au Stator, dans ce cas la phase as et d coïncident. Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes de démarrages et de freinages des machines à courants alternatif.

* Référentiel lié au rotor :

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

* Référentiel lié au champ tournant :

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

e) **Mise en équation de la GSAP en biphasé :**

$$\text{Equations électriques : } \begin{cases} U_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_{mec} \cdot \varphi_{sq} \\ U_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_{mec} \cdot \varphi_{sd} \\ P_s = U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq} \\ Q_s = U_{sq} I_{sq} - U_{sd} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Equations Magnétiques : } \begin{cases} \varphi_{sd} = -L_{sd} I_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = -L_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Equations Mécaniques :

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

$$C_m - C_{em} - C_f = \frac{J d\Omega}{dt} \quad (\text{II.11})$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} + \varphi_f I_{sq}] \quad (\text{II.12})$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$C_f = \Omega f$: Le couple de frottement.

J : moment d'inertie total de la machine.

f : coefficient de frottement visqueux.

II.5 Conclusion :

Ce chapitre représente un état de l'art sur les générateurs utilisés dans les systèmes éoliens à axe horizontal, les différentes configurations et leurs principes de fonctionnement ainsi que les différents types de la machine synchrone à aimant permanent plus sa modélisation étés détaillés.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la partie commande d'un système éolien à vitesse variable à axe horizontal.

CHAPITRE III :

**LA COMMANDE D'UN SYSTEME EOLIEN A
AXE HORIZONTAL A VITESSE VARIABLE**

III.1 Introduction :

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

Dans ce troisième chapitre, on va essayer de modéliser le système éolien à axe horizontal à vitesse variable complet avec deux techniques de commande : la commande vectorielle puis la commande par mode glissant.

III.2 Modélisation et simulation de la partie mécanique de l'éolienne à vitesse variable adoptée :

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la figure (III.1).

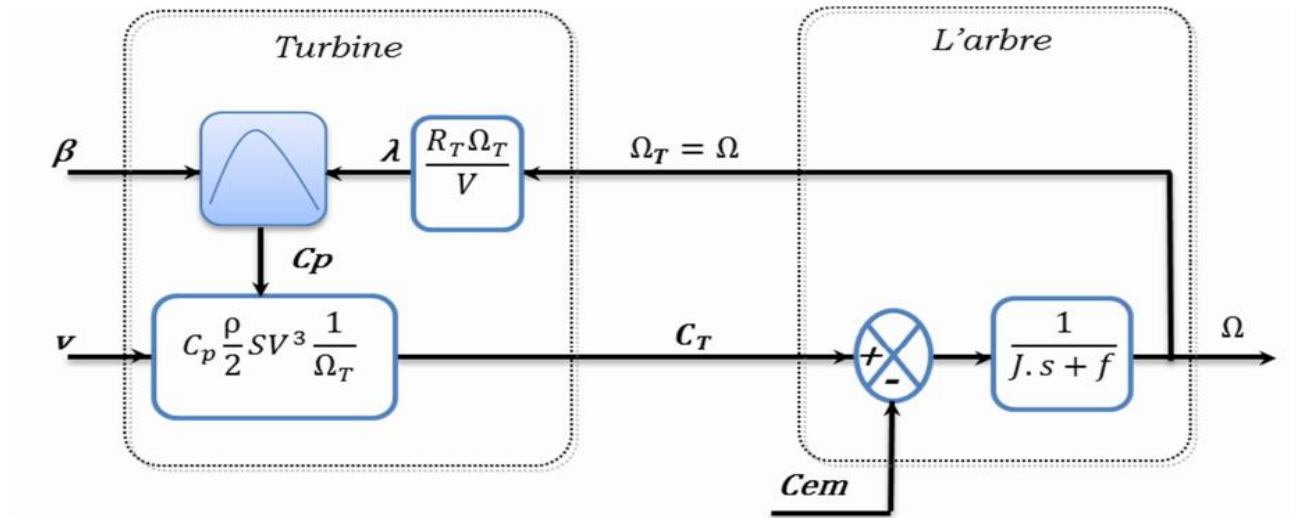


Figure III.1. Schéma bloc du modèle de la turbine.

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

$$C_p = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\beta - 2) \cdot (\lambda - 3) \quad (\text{III.1})$$

La puissance captée par la turbine pourra donc s'écrire :

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad (\text{III.2})$$

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

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3 \cdot \frac{1}{\Omega_T} \quad (\text{III.3})$$

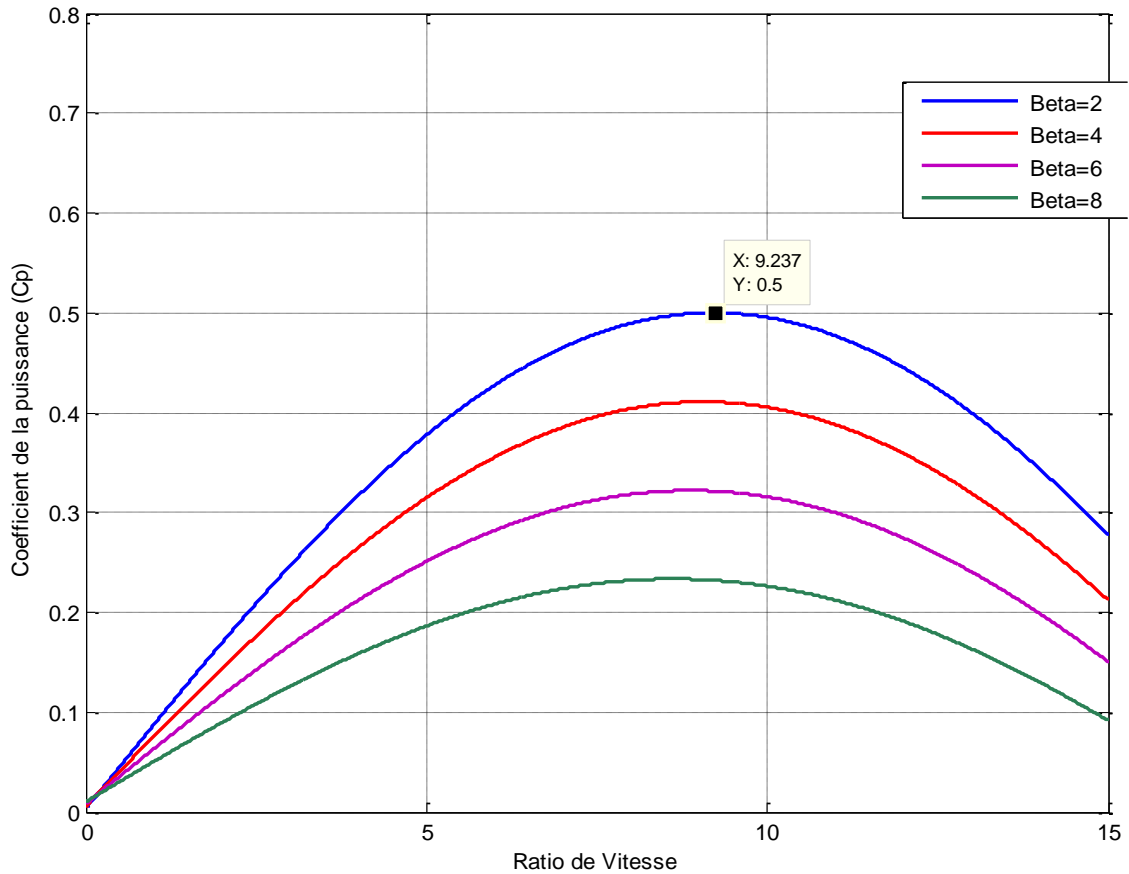


Figure III.2. Le coefficient de la puissance (C_p) en fonction de ratio de vitesse et l'angle de calage de la turbine éolienne.

De la figure (III.2), on peut déduire que le $C_{pmax}=0.5$ et $\lambda_{Cpmax}=9.237$ et cela pour $B=2$. Le modèle de notre turbine à axe horizontal sur la plateforme Simulink du logiciel Matlab avec les données suivantes : « $R= 1\text{m}$; $\rho=1.22\text{ kg/m}^3$ » on obtient les résultats suivants :

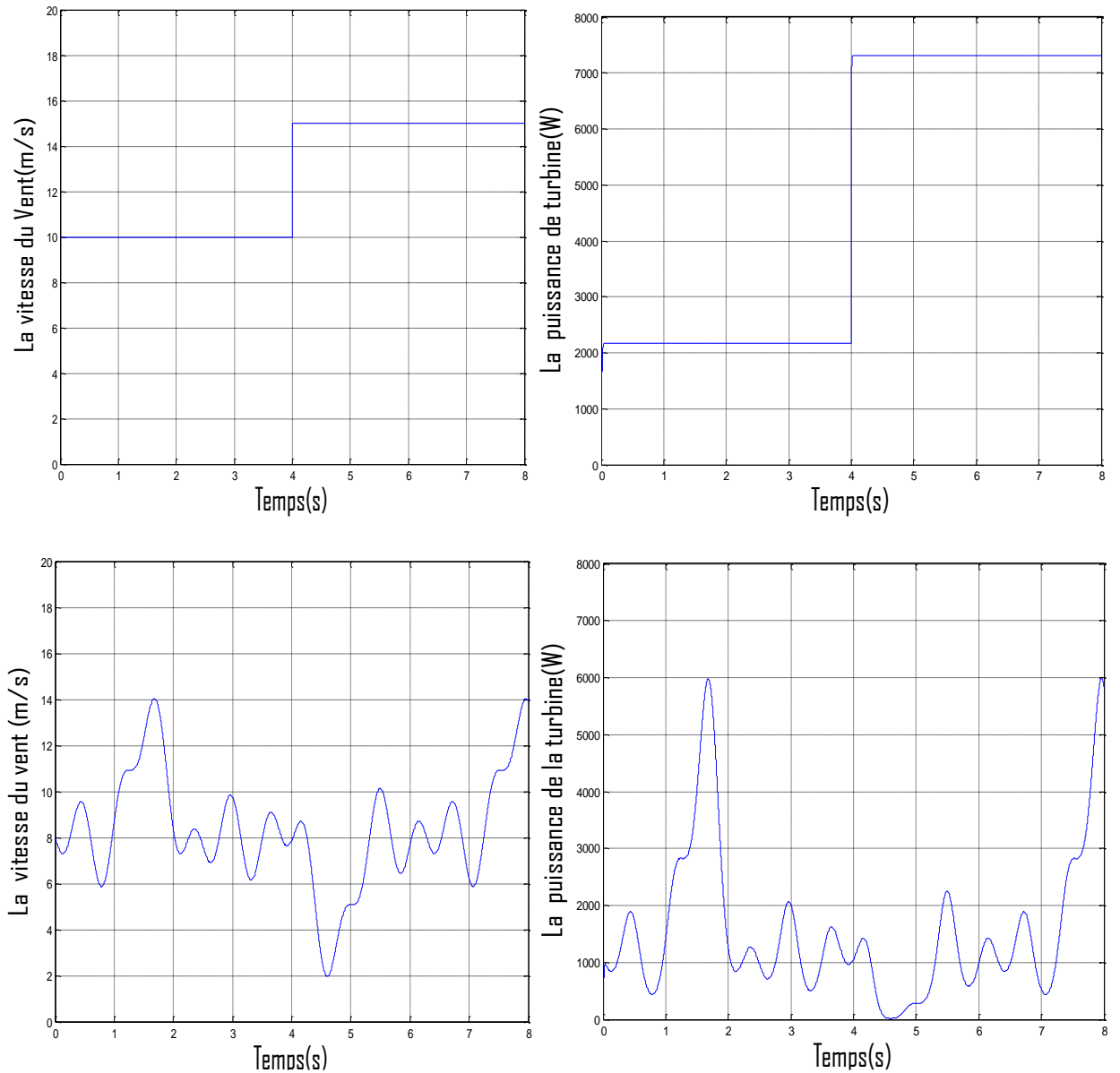


Figure III.3. L'évolution de puissance de la turbine à axe horizontal, à vitesse fixe et à vitesse variable.

On remarque de la figure (III.3) que la puissance électrique est variable avec la variation de la vitesse angulaire mécanique de la turbine (vitesse du vent). On remarque aussi que plus la vitesse du vent est grande plus la puissance délivrée est grande et qui est tout à fait normal car la puissance est exprimée par la vitesse cube du vent.

III.3 Modélisation et simulation de la partie électromécanique adoptée pour l'éolienne à vitesse variable :

En se basant sur ce qui a précédé, la machine synchrone à aimant permanent peut être modélisée comme le montre le système d'équations suivant [19] :

Equations électriques:

$$\begin{cases} U_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_p \psi_{sq} \\ U_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_p \psi_{sd} \\ P_s = U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq} \\ Q_s = U_{sq} I_{sd} - U_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Equations Magnétiques :

$$\begin{cases} \psi_{sd} = -L_{sd} I_{sd} + \sqrt{\frac{3}{2}} \psi_f \\ \psi_{sq} = -L_{sq} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Equations Mécaniques :

Le couple électromagnétique est donné par :

$$\begin{cases} C_m - C_{em} - C_f = J \frac{d\Omega}{dt} \\ C_{em} = \sqrt{\frac{3}{2}} p [(L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq} + \psi_f I_{sq}] \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Le Schéma bloc du modèle de la GSAP dans le repère d q est donné comme suit :

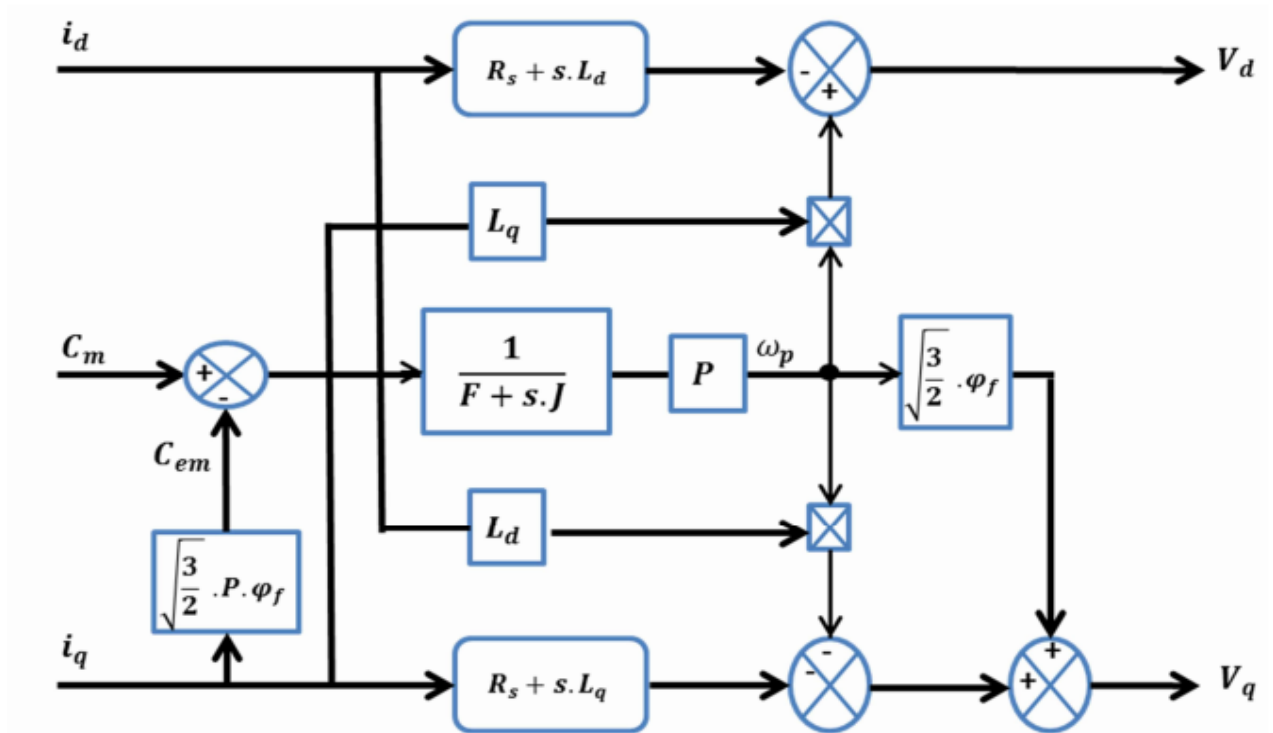


Figure (III.4) Schéma bloc du modèle de la GSAP dans le repère (d q).

La simulation de cette génératrice qui est connectée à une charge triphasée (R_{ch} , L_{ch}) donne les résultats suivants :

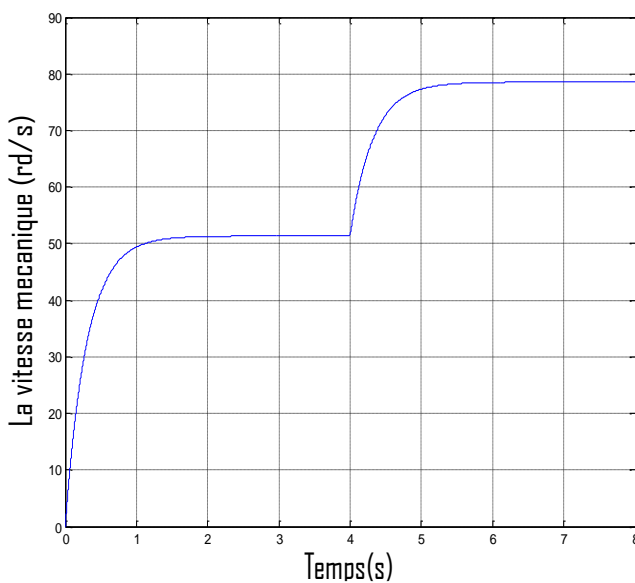


Figure III.5: vitesse de rotation

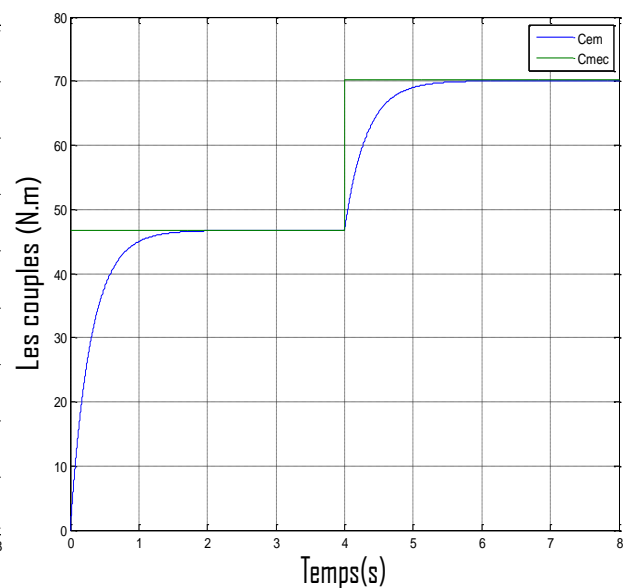


Figure III.6: Couples électromagnétique

et moteur

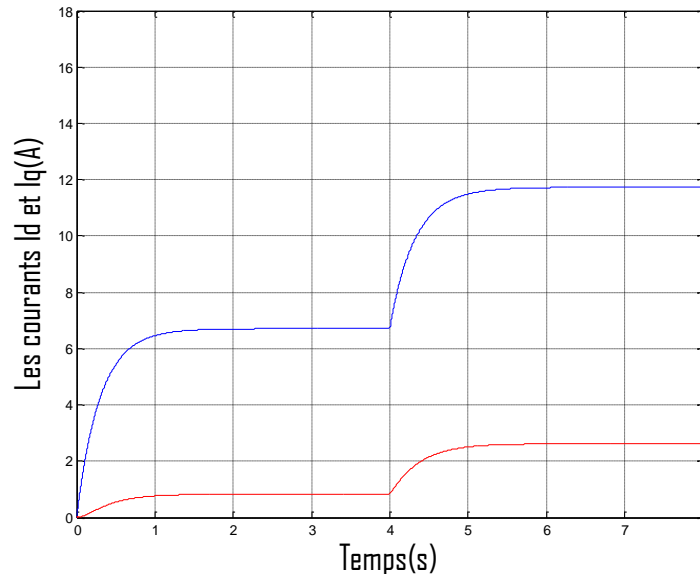


Figure III.7 : Courants statorique i_d et i_q .

III.4 Modélisation de l'MPPT qui varie la vitesse de l'éolienne :

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice et cela grâce à un redresseur commandé dans notre cas. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles [20] :

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

III.4.1 Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure avec asservissement de la vitesse de rotation :

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique C_{em} développé est à tout instant égal à sa valeur de référence C_{em-ref} , (c-à-d : $C_{em} = C_{em-ref}$). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$ qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. La vitesse de la

génératrice Ω égale à Ω_{turbine} (pas de multiplicateur) est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien C_m , le couple électromagnétique C_{em} et le couple résistant C_f . En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire [20] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_m - C_{em} - C_f) \quad (\text{III.7})$$

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

Cette structure de commande (figure (III.8)) consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine C_{aer} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de la vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence $C_{em\text{-ref}}$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est basé sur la relation suivante [20] :

$$C_{em\text{-ref}} = K_{\text{reg}} \cdot (\Omega_{\text{ref}} - \Omega) \quad (\text{III.8})$$

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

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

$$\Omega_{\text{ref}} = \frac{\lambda_{Cp\text{max}} \cdot V}{R} \quad (\text{III.9})$$

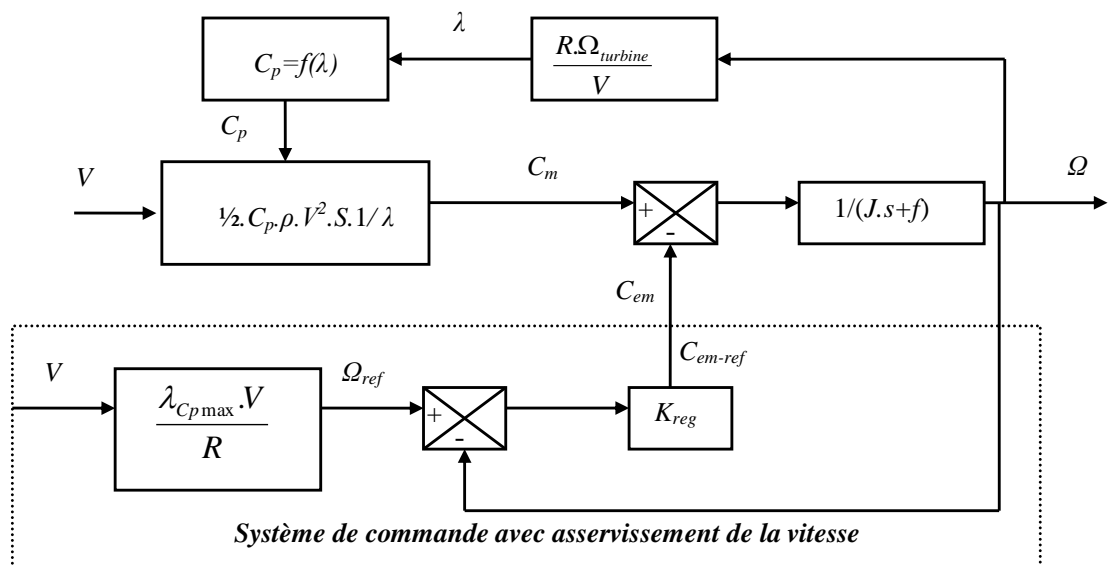


Figure III.8. MPPT avec asservissement de la vitesse.

III.4.2 Modélisation d'un redresseur commandé :

Dans l'étude de l'ensemble commande – machine – redresseur - charge, nous intéresserons uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande. Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir un lien entre le côté alternatif et le côté continu. Ensuite la liaison entre le côté alternatif et le côté continu au travers des interrupteurs ; ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [21]:

$$S_j = \begin{cases} +1, \overline{S}_j = -1 \\ -1, \overline{S}_j = +1 \end{cases} \quad \text{pour } j = a, b, c \quad (\text{III.10})$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S , V et les courants d'entrée i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{III.11})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{sab} = (S_a - S_b)V_{dc} \\ U_{sbc} = (S_b - S_c)V_{dc} \\ U_{sca} = (S_c - S_a)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

La modélisation du redresseur commandé sous forme schéma bloc est donné comme suit :

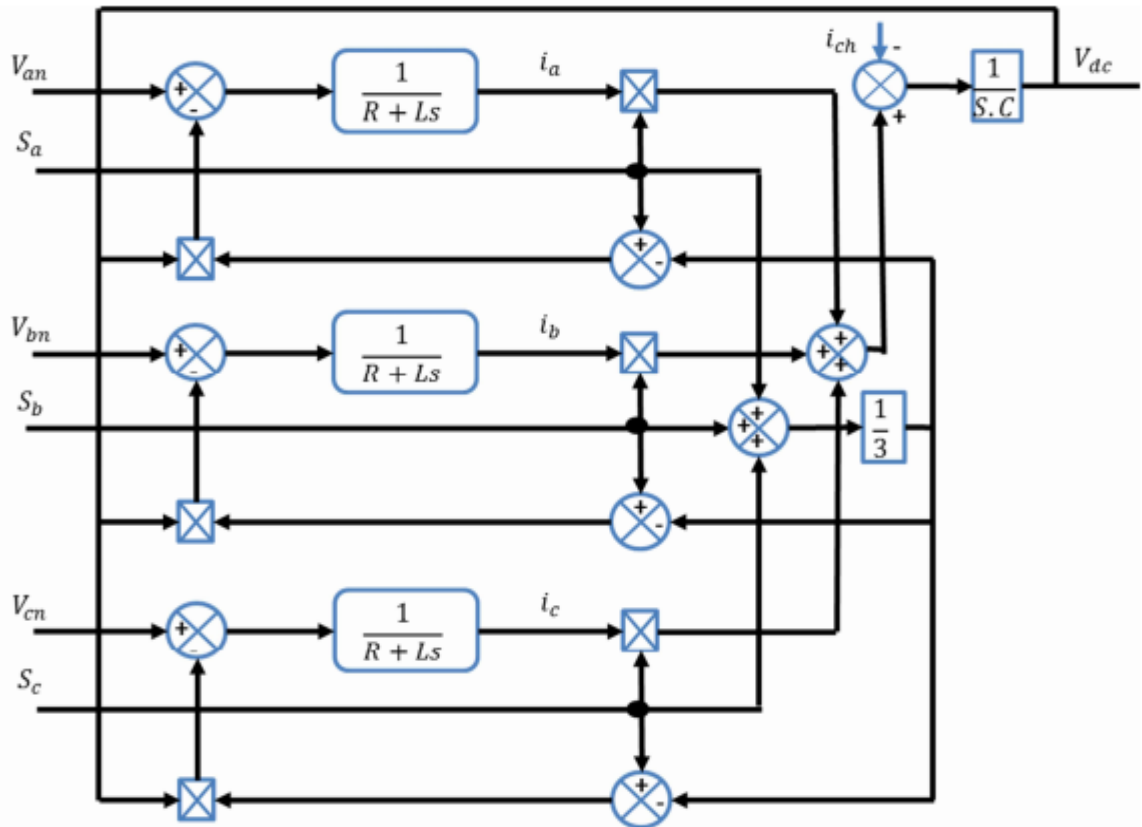


Figure III.9 : Modélisation du redresseur commandé dans un repère fixe lié aux axes abc. [18]

III.5 La commande vectorielle d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable :

III.5.1 Rappel :

La commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) consiste à rendre le comportement du moteur asynchrone identique à celui de la machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux rotorique. Par conséquent, les dynamiques du flux rotorique sont linéaires d'où l'utilisation d'un simple PI pour réguler le flux. Quand les dynamiques du flux rotorique ont atteint une consigne constante, la dynamique de la vitesse devient linéaire et peut être régulée par un PI classique, La commande à flux orienté permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. De nombreuses variantes basées sur ce principe d'orientation. Généralement ces techniques se diffèrent selon [22] :

- la source d'énergie : commande en tension ou en courant,
- l'orientation du repère (d, q) : suivant le flux statorique ou rotorique ou d'entrefer,

- le contrôle du flux : direct par mesure ou indirect par observation

a. Commande vectorielle directe

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du module de flux et de sa phase et celle-ci doit être vérifiée quel que soit le régime transitoire effectué. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du système. Une première possibilité est de mettre des capteurs de flux dans l'entrefer et de mesurer directement les composantes Φ_{sd} et Φ_{sq} de manière à en déduire l'amplitude et la phase, les capteurs mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sévères dues aux vibrations et aux échauffements; les signaux captés sont entachés d'harmoniques d'encoche et leur fréquence varie avec la vitesse ceci nécessite des filtres ajustables. La précision de la définition des flux dépend des paramètres inductifs affectés par la saturation du circuit magnétique. La mesure directe permet de connaître exactement la position des flux. Ce mode de contrôle permet de garantir un découplage correct entre le flux et le couple quelque soit le point de fonctionnement. Dans la majorité des cas, on ne dispose pas de capteur de flux et on fait donc appel à des estimateurs et à des observateurs à partir des mesures effectuées sur le montage. Car l'application de la première méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes [22]:

- la non fiabilité de la mesure de flux ;
- Problème de filtrage de signale mesuré ;
- Précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température.

b. Commande vectorielle indirecte

Dans cette méthode, on ne régule pas le flux rotorique et on a donc besoin ni de capteur ni d'estimateur ou d'observateur de flux. Si le flux rotorique réel n'est pas utilisé, sa position doit être connue pour effectuer les changements de coordonnées ; ceci exige la présence d'un capteur de position du rotor, L'orientation de flux est réalisée par la position déduite par intégration de la position d'autopilotage, il est déduit de la vitesse à partir du bloc de défluxage. Le bloc de défluxage permet l'exploitation optimale des capacités magnétiques de la machine, il permet un fonctionnement à couple constant si la vitesse est inférieure à la vitesse nominale. D'une part, ce bloc permet en outre d'affaiblir le flux inversement proportionnel à la vitesse, pour les fonctionnements à puissance constante lorsque la vitesse excède la vitesse nominale. Il est défini par la relation non linéaire suivante [22]:

$$\begin{cases} \Phi_{S-ref} = \Phi_{S-nom} & Si \omega \leq \omega_{nom} \\ \Phi_{S-ref} = \frac{\Phi_{S-nom}}{|\omega|} \omega_{nom} & Si \omega > \omega_{nom} \end{cases}$$

Avec :

ω_{nom} : la vitesse de rotation nominal ;

Φ_{S-nom} : le flux statorique nominal ;

Φ_{S-ref} : le flux statorique de référence ;

III.5.2L'application de la commande vectorielle pour l'éolienne à vitesse variable :

Dans le schéma bloc de la Figure (III.10), figurent les principaux constituants de la commande vectorielle, à savoir la boucle de régulation de vitesse, les boucles internes des courants i_d et i_q et les transformations directe et inverse.

En se référant au modèle de la MSAP, nous remarquons que le flux rotorique est totalement orienté selon l'axe q (la formule du C_{em} est en fonction du courant i_q seulement), d'où nous pouvons nous abstenir du contrôle vectoriel. Nous nous contenterons d'un seul régulateur voire le courant de référence i_{q-ref} à partir d'une assurant la valeur du couple de référence C_{em-ref} vitesse de référence Ω_{ref} . L'objectif principal de la commande vectorielle de la MSAP est donc de contrôler le couple selon un critère choisi, compte tenu de l'importance, souvent de la minimisation des pertes Joules à couple donné, celles-ci étant proportionnelles au courant efficace, nous amènent à minimiser " $(i_d)^2 + (i_q)^2 = 3(i_{eff})^2$ " à couple voulu, pour cela nous fixons le courant de référence de la composante directe à zéro " $i_{d-ref} = 0$ ".

Afin de régler la vitesse du dispositif, nous devons imposer le couple électromagnétique adéquat, pour cela, nous contrôlons l'évolution des courants débités par la machine en insérant des inductances statoriques de couplage L_{sc} afin d'adapter les deux sources de tension "Machine-redresseur a MLI" (Interdiction de relier deux sources de même nature directement, en supposant que la MSAP est une source de tension) et de minimiser les variations brusques des courants.

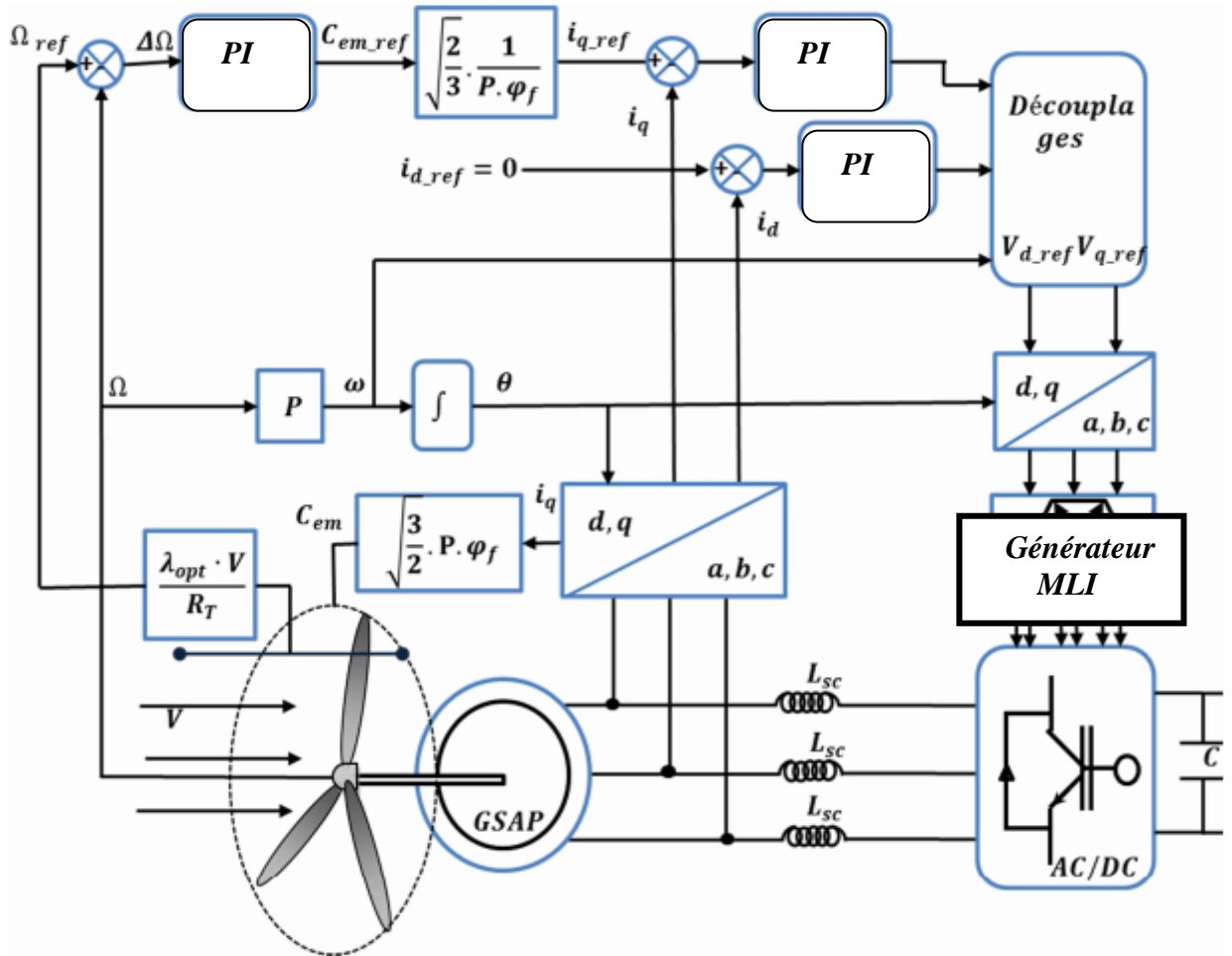


Figure (III.10). Schéma fonctionnel de la commande vectorielle adoptée pour l'éolienne à vitesse variable. [35]

a. Régulateur de vitesse : Le réglage de la vitesse nécessite l'ajout d'un correcteur (PI) permettant d'optimiser les performances du système. La dynamique du système est régit par une équation différentielle du premier ordre, caractérisée par une constante de temps seulement :

$$\Omega = \frac{(C_m - C_{em})}{f + J.s} \quad (III.14)$$

L'insertion du régulateur aboutira au schéma fonctionnel suivant :

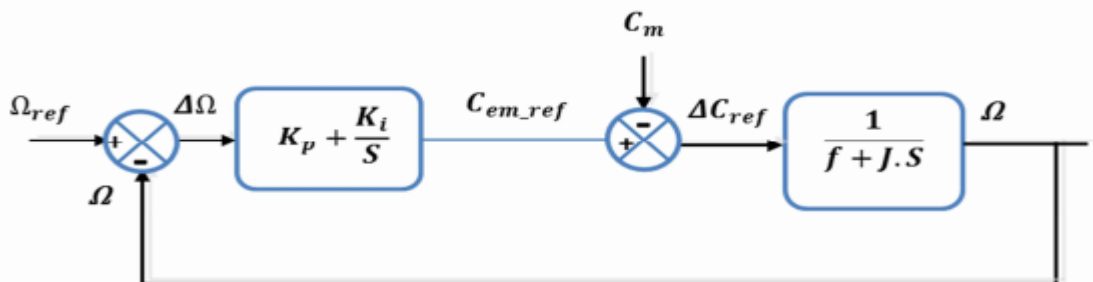


Figure (III.11) Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement de vitesse.

b. Régulation des courants : Pour chacune des boucles de courants, nous avons adopté classiquement un régulateur de type Proportionnel intégral (PI). Compte tenu des équations du modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent présentée par (III.4). Et si nous admettons que la commande du convertisseur de tension, fonctionnant en modulation de largeur d'impulsions à fréquence de commutation élevée, est quasi parfaite tout en supposant nulles les pertes en commutation et en négligeant le retard du convertisseur statique, nous pouvons le modéliser par un simple gain et la commande du système se déduit alors largement du modèle le représentant. Alors La boucle de régulation d'axe d se présente sous la forme du schéma donné sur la Figure (III.12). On note que la structure de la boucle de courant d'axe d est quasiment identique à celle de l'axe q.

III.4.3 Synthèse des différents régulateurs

III.4.3.1 Régulateur PI

Dans notre travail on a choisir le régulateur PI, l'action proportionnel (P) et l'action intégral (I), qui sont mis en parallèle, ce régulateur PI doit être conçu pour stabiliser la boucle de régulation de vitesse afin d'extraire le maximum de puissance du vent et améliorer la dynamique du système contrôlé avec une annulation de l'erreur statique, ceci revient à un réglage judicieux des paramètres K_p et K_i , ce choix justifie par :

-simple à régler et réaliser.

-connaissance de maîtriser ce type de régulateur et l'appliqué dans l'industrie.

– Robustesse de commande.

– prix de cout est moins cher.

La relation entre la sortie du régulateur et le signal de l'écart s'écrit ce frome :

$$U(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (III.18)$$

A partir de (III.), on ce trouve :

$$\frac{U(t)}{e(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (III.19)$$

K_p : représente le gain proportionnel

K_i :le gain intégral

III. Régulation des courants

Les équations du modèle mathématique de la machine synchrone peuvent être écrites par la forme suivante :

$$\begin{cases} Vsd(P) = RsIsd(P) + PLsIsd(P) - \omega\phi sq(P) \\ V(P) = RsIsq(P) + PLsIsq(P) - \omega\phi sd(P) \end{cases} \quad (III.20)$$

Si on considère les termes de couplage ($edq = \omega\phi sd$) comme des perturbations mesurables. On peut alors écrire la fonction de transfert de la machine comme suit :

$$Gs(s) = \frac{1}{Rs + Ls.S} = \frac{1}{Rs} \cdot \frac{1}{1 + \tau.s} \quad (III.21)$$

$$Gs(s) = \frac{isdq(s)}{Vsdq(s) + esdq(s)} \quad (III.22)$$

Ou :

τ : Constante de temps électrique, avec $\tau = \frac{Ls}{Rs}$

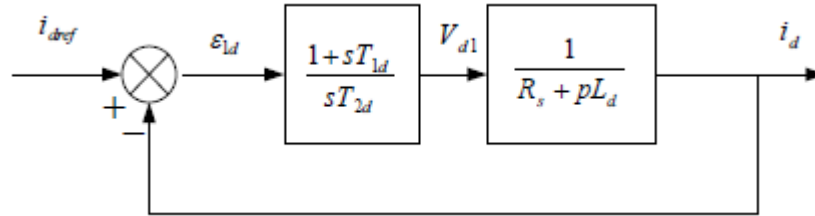


Figure III.12 : boucle de régulation du courant i_d .

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$Gbo(s) = \left(Kpd + \frac{Kid}{s} \right) \left(\frac{1}{Rs + Ld.S} \right) \quad (III.23)$$

$$\text{On pose : } \frac{Ld}{Rs} = \frac{Kpd}{Kid} = \tau e \quad (III.24)$$

F-T devient : $Gbo(s) = \frac{Kid}{Rs.S}$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par : $Gbf(s) = \frac{1}{\frac{Rs}{Kid}S + 1}$ (III.25)

$$Gbf(s) = \frac{1}{\tau e S + 1} \quad (III.26)$$

Avec : $\tau e = \frac{Rs}{Kid}$, $\tau_r = 3\tau e$

D'après les équations précédentes on trouve les paramètres des régulateur PI :

$$\begin{cases} Kid = 3 \frac{Rs}{\tau_r} \\ Kpd = 3 \frac{Ld}{\tau_r} \end{cases} \quad (III.27)$$

La boucle de régulation du courant i_q est représentée comme suit :

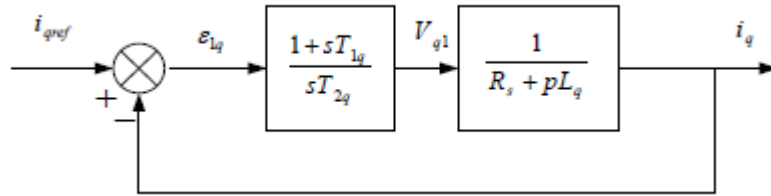


Figure III.13 boucle de régulation du courant i_q

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

III. Régulation de la vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante.

La vitesse correspondante est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + fr\Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{III.29})$$

Le schéma principal de la vitesse est donné comme suit :

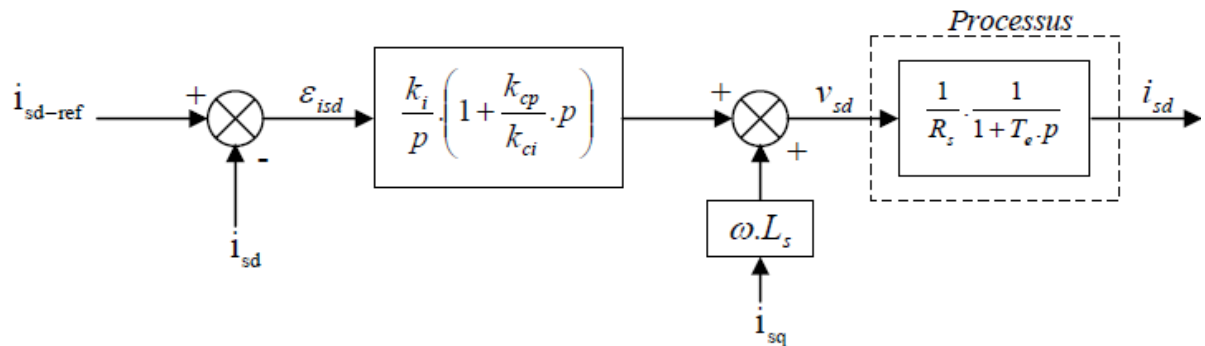


Figure (III.14) : Boucle de régulation de la vitesse de rotation à base de régulateur PI

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte s'écrit :

$$G_{bo}(S) = \left(Kp + \frac{Ki}{S} \right) \left(\frac{1}{JS+f} \right) \quad (\text{III.30})$$

$$G_{bo}(S) = \frac{Kp}{S} \left(S + \frac{Ki}{Kp} \right) \left(\frac{1}{JS+f} \right) \quad (\text{III.31})$$

On obtient la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée, en utilisant la méthode de placement de pôle :

$$Gbf(s) = \frac{1}{\frac{J}{Ki}s^2 + (f + \frac{Kp}{Ki})s + 1} \quad (III.31)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée de l'ordre 2, la forme canonique d'un système de 2 ordre se écrit comme suite :

$$Gbf(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + (\frac{2\xi}{\omega_0})s + 1} \quad (III.32)$$

Avec :

ω_0 : Pulsation propre du système.

ξ : Coefficient d'amortissement.

Par identification avec l'expression (III.32), on obtient :

$$\frac{1}{\omega_0^2} = \frac{J}{Ki} \quad (III.33)$$

$$\left(\frac{2\xi}{\omega_0}\right) = \left(\frac{f + Kp}{Ki}\right) \quad (III.34)$$

Depuis (III.33) et (III.34), on déduit les paramètres du régulateur de vitesse PI comme suit :

$$\begin{cases} Ki = J\omega_0^2 \\ Kp = 2 \cdot \xi \cdot J\omega_0 - f \end{cases} \quad (III.35)$$

III.5.3 Résultats de simulation et interprétation :

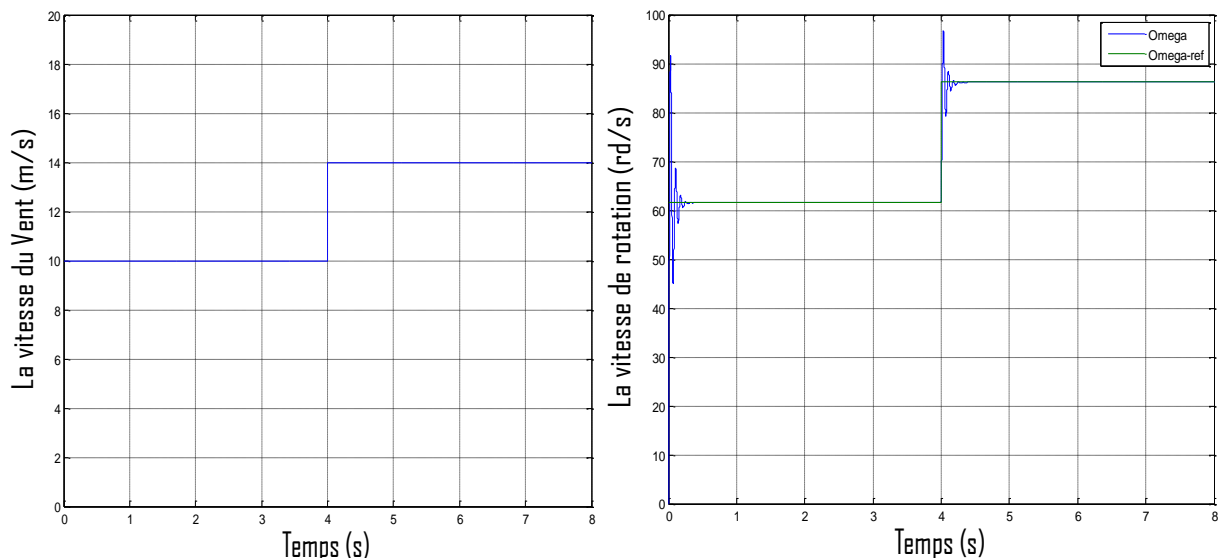


Figure (III.13) [a]: vitesse du vent

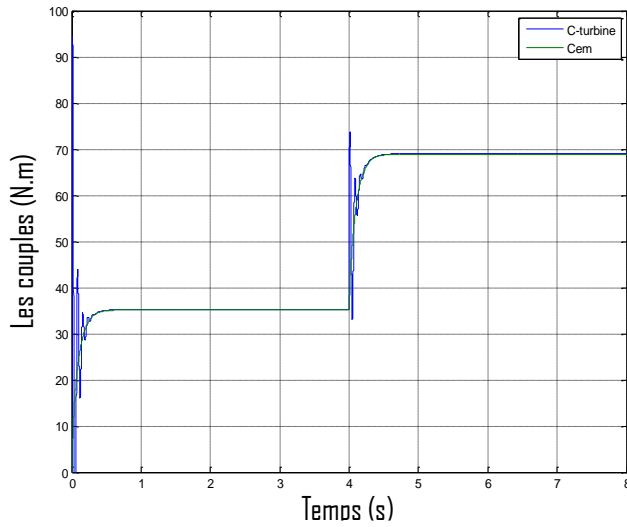


Figure (III.13) [b] :vitesse de rotation

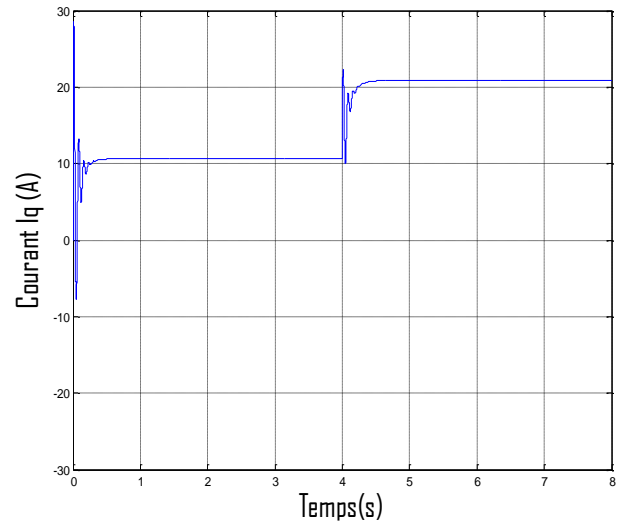


Figure (III.13) [c]: Couples électromagnétique et moteur

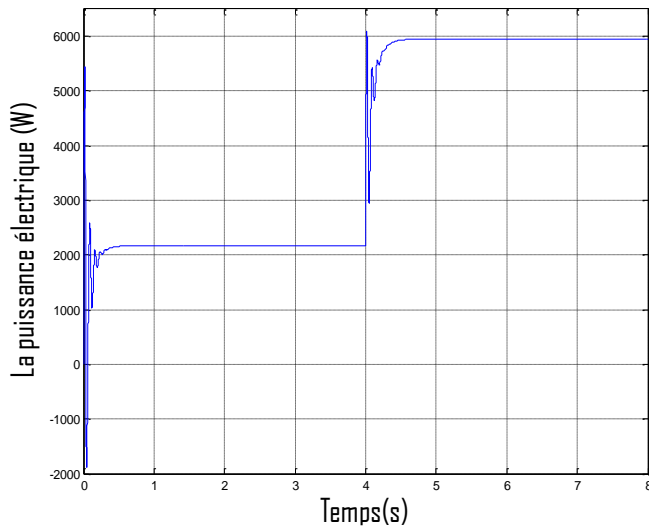


Figure (III.13) [d]: Courants statoriques i_q

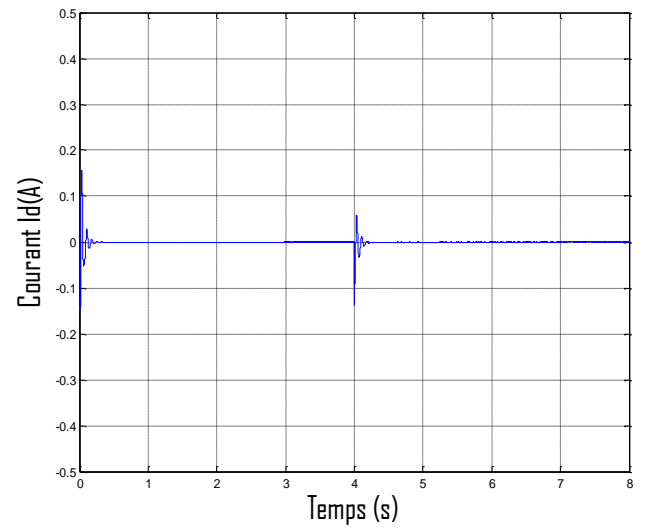


Figure (III.13) [e] P_{elec} à vitesse variable

Figure (III.13) [f] Courants statoriques i_d

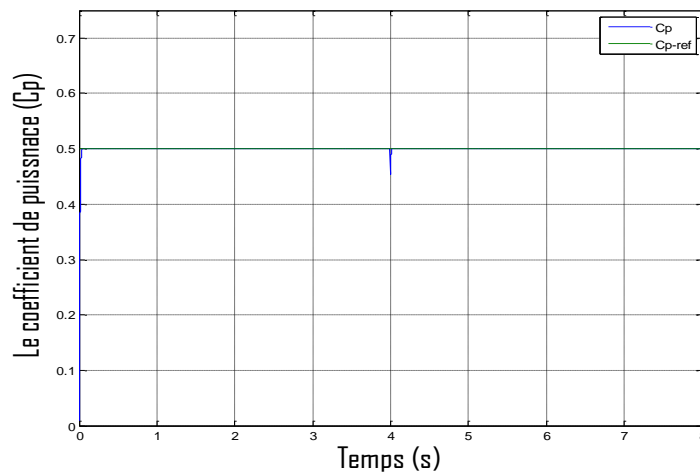


Figure (III.13) [j] La puissance électrique P_{elec} d'une éolienne à vitesse du vent fixe.

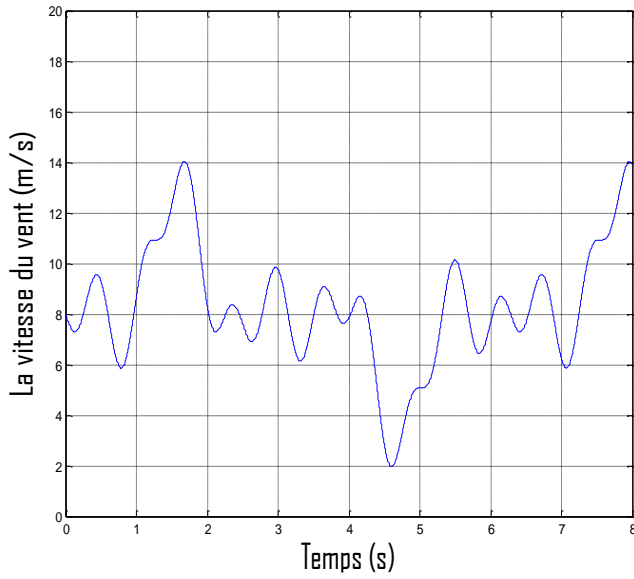


Figure (III.14) [a]: vitesse du vent

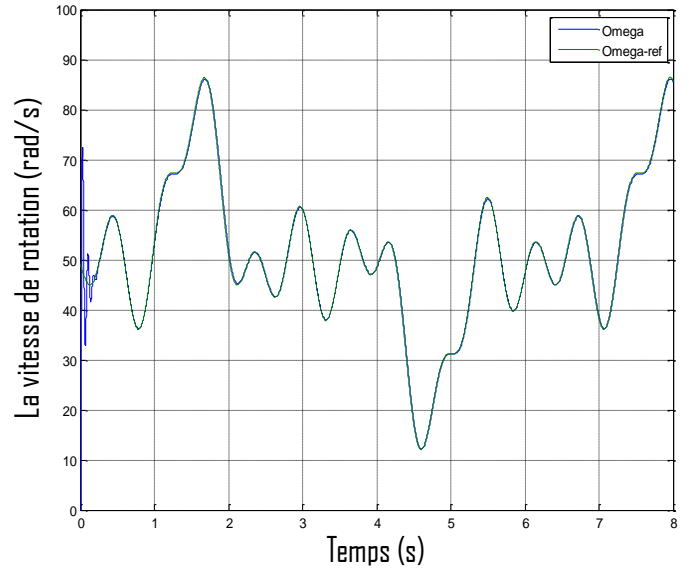


Figure (III.14) [b] : vitesse de rotation

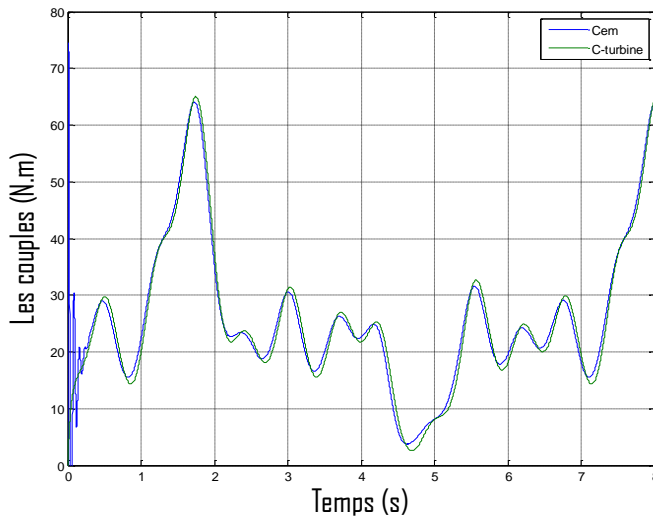


Figure (III.14) [c]: Couples électromagnétique et moteur

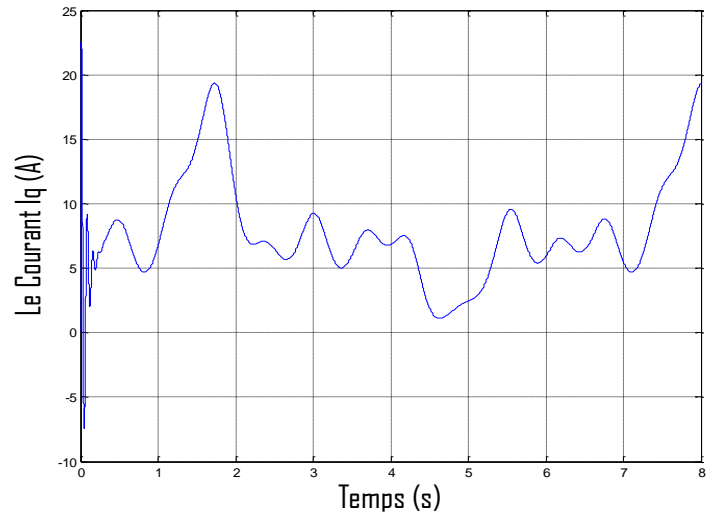


Figure (III.14) [d]: Courants statoriques i_q

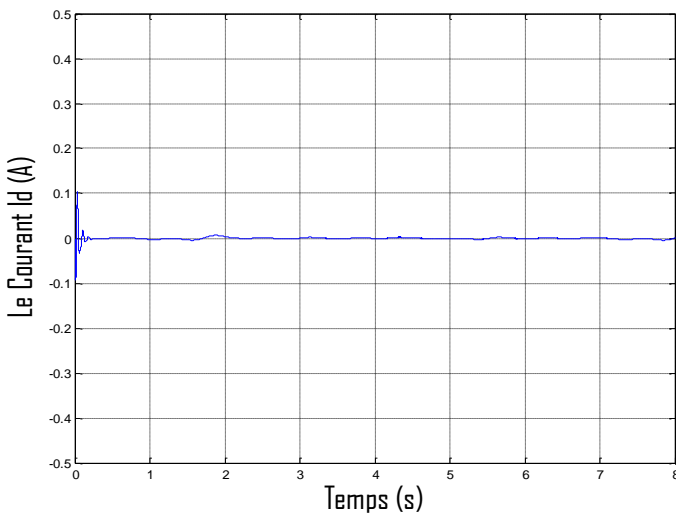


Figure (III.14) [f] Courants statoriques i_d

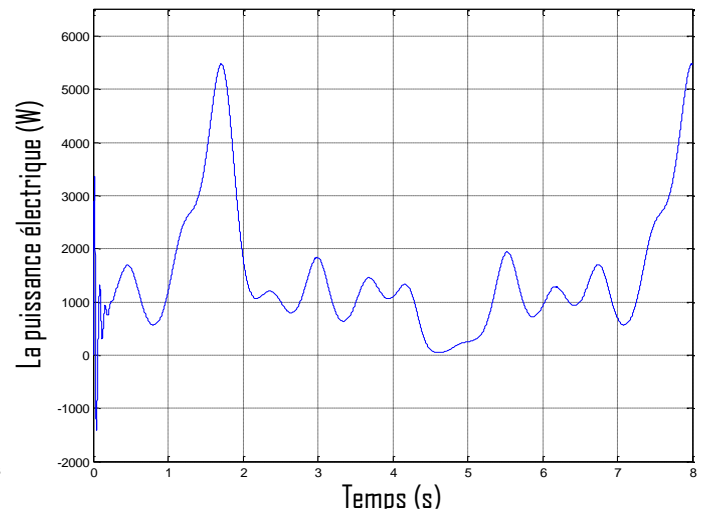


Figure (III.14) [e] : P_{elec} à vitesse variable

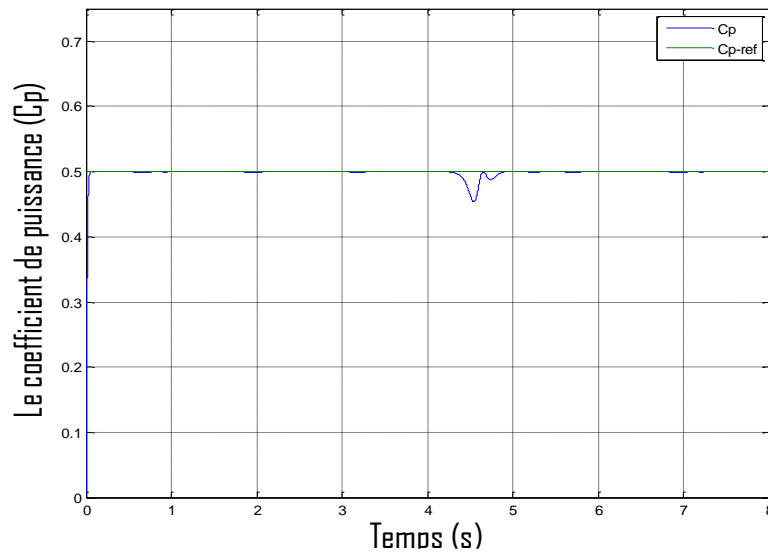


Figure (III.14) [j] : la puissance électrique $P_{\text{élec}}$ d'une éolienne à vitesse du vent fixe

En utilisant l'outil MATLAB, on a établi un programme numérique permettant la simulation de l'évolution des caractéristiques du système éolien étudié dont les paramètres sont donnés selon [22]. La puissance nominale $P_n=7.4$ kW, La puissance maximale $P_{\text{max}}=10.6$ kW, $R_s=1.36$ Ω , $L_{sd}=L_{sq}=12.5$ mH, Nombre de paires des pôles $P=3$, Courant nominal $i_n=15$ A, Courant d q nom maximal $i_{\text{max}}=20$ A. max D'après ces simulations, on peut remarquer la robustesse de la commande vectorielle en termes de découplage et les bons résultats obtenus par la régulation avec le correcteur PI classique.

III.6 La commande par mode glissant d'une éolienne à axe horizontal à vitesse variable :

III.6.1 Rappel :

La commande par mode glissant consiste à concevoir une loi de commande qui puisse guider le vecteur d'état d'un système donné vers un hyperplan $S=0$, communément appelé surface de glissement. Une fois ce sous espace d'état atteint, le vecteur d'état possèdera alors une dynamique stable qui dépendra directement du choix de la surface de glissement, et qui fera en sorte que le vecteur d'état convergera vers le point d'équilibre. Nous dirons que le vecteur d'état 'glisse' sur l'hyperplan jusqu'à atteindre le point d'équilibre. La figure (III.15) schématise ce processus dans le plan de phase, c'est-à-dire dans le cas particulier d'un système mono variable d'ordre '2'. Ainsi nous pouvons constater que la commande par mode glissant est divisée en deux phases. Dans une

première phase, le vecteur d'état doit atteindre la surface de glissement, nous parlons alors du mode attraction. Dans une deuxième phase, et après avoir atteint la surface de glissement ' $S=0$ ', le vecteur d'état doit glisser sur cette surface jusqu'à atteindre le point d'équilibre, nous parlons alors du mode glissant [23].

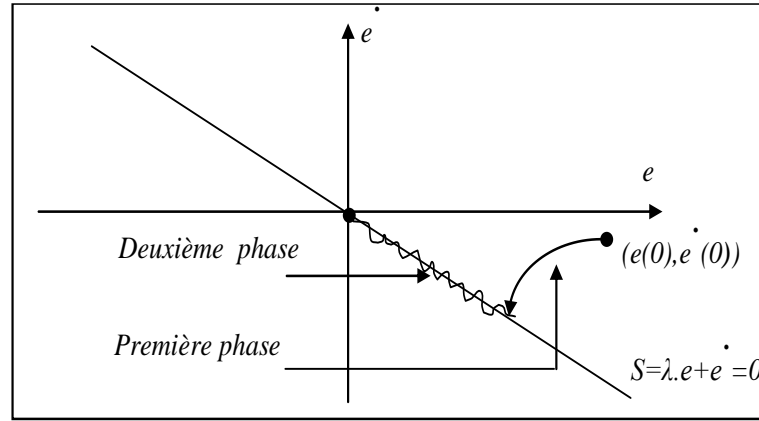


Figure (III.15) Schéma de principe du mode glissant dans le plan de phase.

La synthèse de cette commande peut être donnée comme suit :

Considérant le système non linéaire suivant :

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (\text{III.16})$$

Le but du contrôle est de trouver une loi de commande pour laquelle l'erreur tend vers zéro malgré la présence des perturbations, cette erreur est définie comme suit :

$$e(t) = x^{mes}(t) - x^{ref}(t) = (e, e^{(1)}, \dots, e^{(n-1)})^T \quad (\text{III.17})$$

La mise en œuvre d'une commande par mode glissant passe par trois étapes :

- Le choix de la surface de glissement : La fonction qui assure la convergence d'une variable d'état ' x ' vers sa valeur de consigne ' x^{ref} ' est donnée sous forme générale suivante :

$$S(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{(n-1)} \cdot e \quad (\text{III.18})$$

λ est un scalaire qui représente la pente de la surface de glissement, une fois la fonction de commutation est établie le problème de la poursuite nécessite la conception d'une loi de commande tel que le vecteur d'état ' $e(t)$ ' reste sur la surface de glissement ' $S(x, t)=0$ ' pour tout $t \geq 0$.

- La condition d'existence d'une surface de glissement : Elle peut être déduite de la fonction énergétique de Liapunov donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{1}{2} \cdot S^2$$

(III.19)

Une condition suffisante pour que le système (1.23) soit stable est :

$$V^{(1)} = \frac{1}{2} \frac{\partial S^2}{\partial t} \leq -k \cdot |S| \quad (\text{III.20})$$

- L'établissement de la loi de commande : La loi de commande par mode glissant est donnée par la formule suivante :

$$u = u_{eq} + k \cdot \text{sign}(S) = u_{eq} + \Delta u \quad (\text{III.21})$$

Une méthode qui permet de réduire l'effet du broutement est de remplacer la fonction discontinue 'sign' par une fonction de saturation 'sat', qui consiste à déterminer une bande limite autour de la surface de glissement ainsi assurant le lissage de la commande et le maintien de l'état du système dans cette bande.

III.6.2 L'application de la commande par mode glissant pour l'éolienne à vitesse variable :

Dans le schéma bloc de la Figure (III.16), figurent les principaux constituants de la commande par mode glissant, à savoir la boucle de régulation de vitesse, les boucles internes des courants i_d et i_q et les transformations directe et inverse. On rappelle le modèle de la machine synchrone à aimants permanents :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \cdot \Omega \cdot i_q - \frac{1}{L_d} U_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \cdot \Omega \cdot i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\psi_f}{L_q} p \cdot \Omega - \frac{1}{L_q} U_q \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} C_m - \frac{f}{J} \Omega - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{p \cdot \psi_f}{J} i_q \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

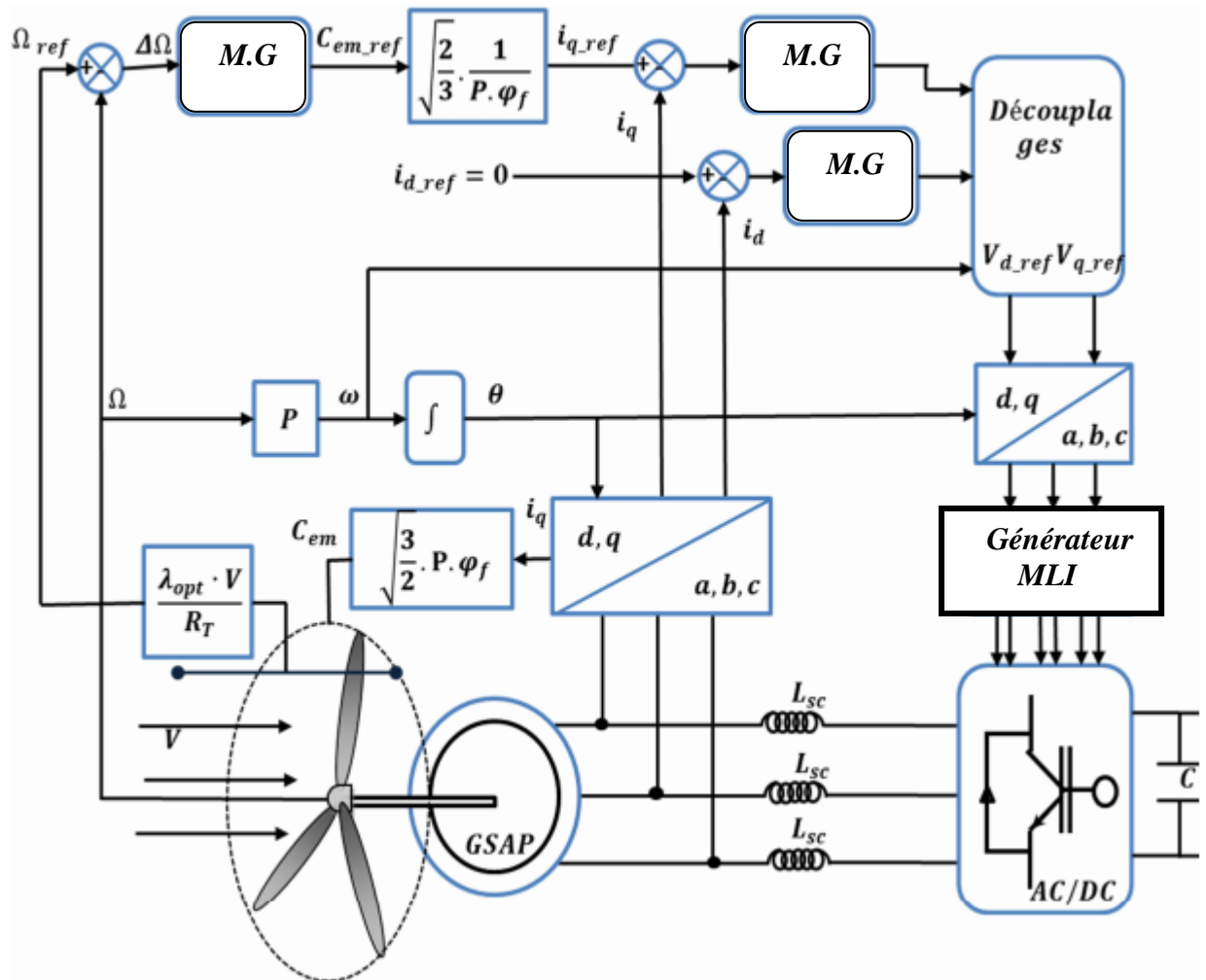


Figure (III.16). Schéma fonctionnel de la commande par mode glissant adoptée pour l'éolienne à vitesse variable.

La Figure (III.14) présente le schéma du réglage par mode glissement d'ordre 1 (MGO1), utilisant le principe de la méthode de réglage en cascade (structure de trois surfaces). La boucle interne permet de contrôler les courants, tandis que la boucle externe permet de contrôler la vitesse.

a. Surface de régulation de la vitesse : On remarque que d'après l'équation (III.22), le degré relatif de la vitesse Ω avec i_q est égal un. Dans ce cas, l'erreur de réglage est choisie comme la surface :

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \quad (III.23)$$

La dérivée de la surface est :

$$\begin{cases} \frac{dS(\Omega)}{dt} = S^*(\Omega) = \Omega_{ref}^* - \frac{1}{J} C_m + \frac{f}{J} \Omega + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{p \cdot \psi_f}{J} i_q \\ i_q = i_{qeq} + i_{qN} \end{cases} \quad (III.24)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, nous avons :

$$S(\Omega) = 0 \Rightarrow S^*(\Omega) = 0 \quad \text{et} \quad i_{qN} = 0 \quad (III.25)$$

Donc, on déduit la commande équivalente à partir de l'équation (III.24) :

$$i_{qeq} = - \frac{\Omega_{ref}^* - \frac{1}{J} C_m + \frac{f}{J} \Omega}{\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{p \psi_f}{J}} \quad (III.26)$$

Durant le mode de convergence, la dérivée de l'équation de Lyapunov doit être négative :

$$V^*(\Omega) = S(\Omega) S^*(\Omega) < 0 \quad (III.27)$$

Si en remplace l'équation (III.26) dans (III.24), on obtient :

$$\frac{dS(\Omega)}{dt} = S^*(\Omega) = - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{p \cdot \psi_f}{J} i_{qN} \quad (III.28)$$

Alors :
$$i_{qN} = -k_{\Omega} \text{sign}(S(\Omega)) \quad (III.29)$$

k_{Ω} : Gain positif.

b. Surface de régulation du courant i_q : La surface de glissement est choisie comme :

$$S(i_q) = i_{qref} - i_q \quad (III.30)$$

Dans ce cas, les commandes V_{qeq} et V_{qN} sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{qeq} = -L_q [i_{qref}^* + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \cdot \Omega \cdot i_d - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\psi_f}{L_q} p \cdot \Omega] \\ V_{qN} = -k_q \text{sign}(S(i_q)) \end{cases} \quad (III.31)$$

c. Surface de régulation du courant i_d : La surface de glissement est choisie comme :

$$S(i_d) = i_{d_{ref}} - i_d \quad (III.32)$$

Dans ce cas, les commandes V_{deq} et V_{dN} sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{deq} = -L_d [i_{qref}^* + \frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} p \cdot \Omega \cdot i_q] \\ V_{dN} = -k_q \text{sign}(S(i_d)) \end{cases} \quad (III.33)$$

III.6.3 Résultats de simulation et interprétation :

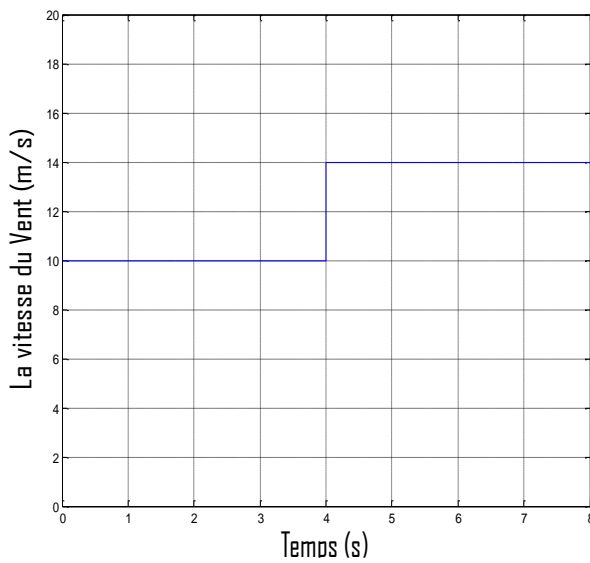


Figure (III.17) [a]: vitesse du vent

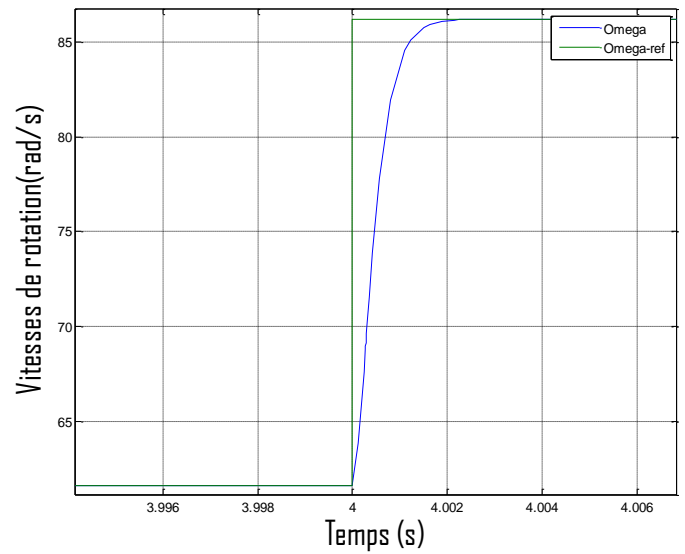


Figure (III.17) [b] vitesse de rotation

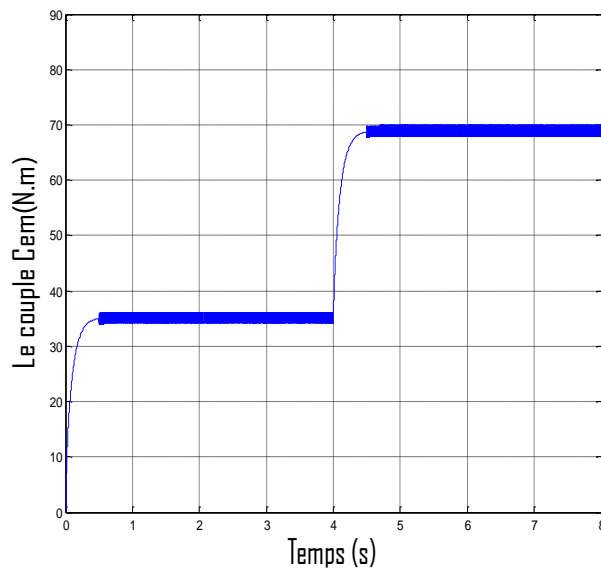


Figure (III.17) [c]: Couples électromagnétique et moteur

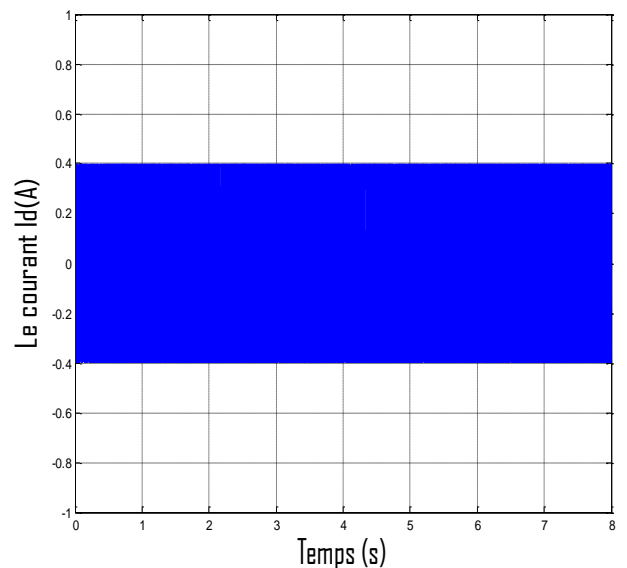


Figure (III.17) [d]: Courants statoriques i_d

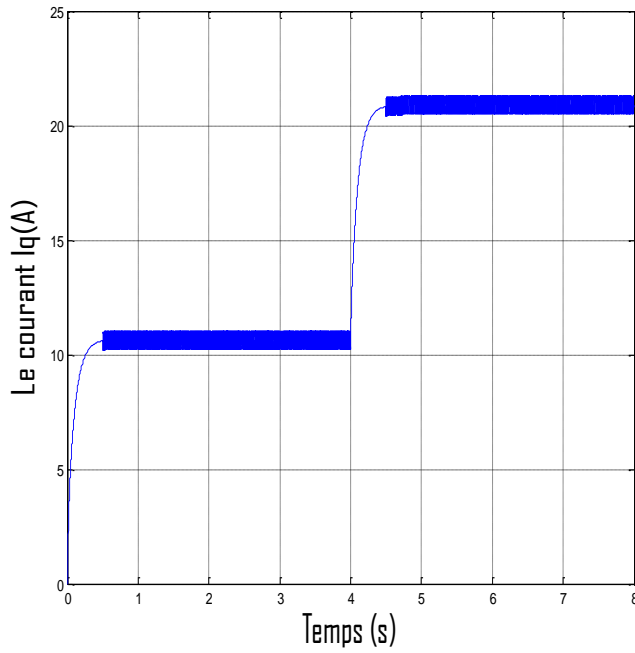


Figure (III.17) [e] Courants statoriques i_q

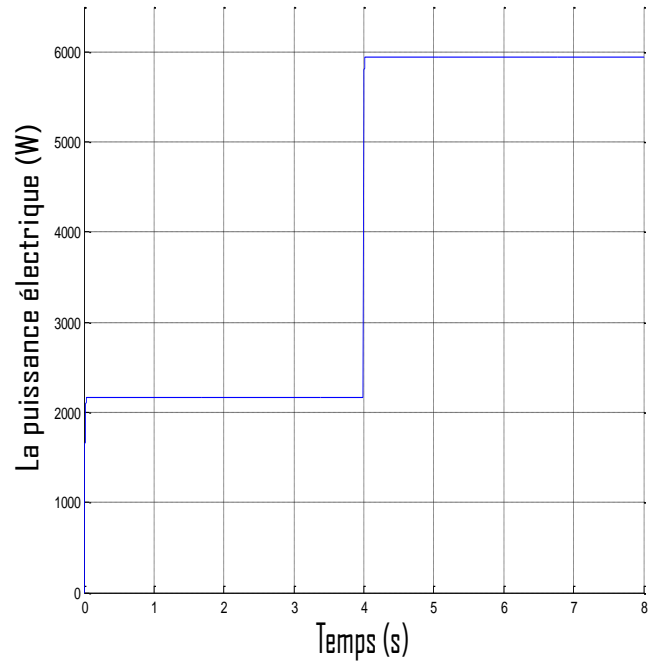


Figure (III.17) [f] : P_{elec} à vitesse variable

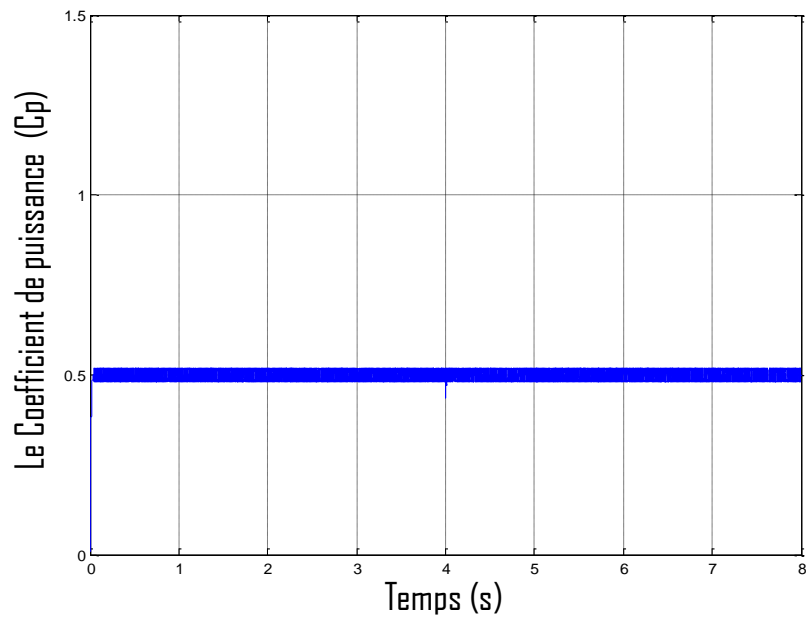


Figure (III.17) [g] : La puissance électrique P_{elec} d'une éolienne à deux vitesses du vent différentes.

En utilisant l'outil MATLAB, on a établi un programme numérique permettant la simulation de l'évolution des caractéristiques du système éolien étudié dont les paramètres sont donnés selon [22]. La puissance nominale $P_n=7.4$ kW, La puissance maximale $P_{max}=10.6$ kW, $R_s=1.36 \Omega$, $L_{sd}=L_{sq}=12.5$ mH, Nombre de paires des pôles $P=3$, Courant nominal $i_n=15$ A, Courant d q nom maximal $i_{max}=20$ A. max D'après ces simulations, on peut remarquer la robustesse de la commande mode

glissant en termes de découplage et les bons résultats obtenus malgré le broutement au régime nominal.

III.8 Conclusion :

Au cours de ce troisième chapitre nous avons modélisé et simulé le modèle de la turbine, puis nous avons présenté la commande vectorielle appliqué à notre GSAP afin de rendre son comportement similaire à celui de la machine à courant continu. La vitesse et les courants sont contrôlés via des correcteurs de type proportionnel intégral (PI). On peut dire mieux sur la commande par mode glissant malgré le broutement existant au niveau du régime permanent et cela à cause de la fonction discontinue 'sign'.



CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

Lors de notre étude, nous avons appliqué deux commandes à la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), dont l'une d'elles est la commande vectorielle classique dotée de régulateur PI, tandis que l'autre est la commande mode glissement, d'un système éolien à vitesse variable. Qui a pour but d'améliorer les performances et la robustesse de la commande vectorielle sur la machine.

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par un état d'art concernant la production d'énergie électrique à partir du système éolien. Les différents types d'éoliennes et leurs principes de fonctionnement ont été détaillés ainsi que le rôle de chaque composant éolien.

Dans le deuxième chapitre nous avons donné un aperçu général sur les machines utilisées dans le domaine éolien. Ce qui nous a amené à choisir la machine synchrone à aimants permanents, puis nous avons établi le modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel biphasé en se basant sur le modèle de Park, simplifiant ainsi la commande de la machine.

Dans le dernier chapitre, nous avons commencé par modéliser les différents composants de la partie mécanique de l'aérogénérateur, à savoir : la turbine, le multiplicateur de vitesse ainsi que l'arbre de la génératrice, puis nous avons établi le modèle mathématique du redresseur, dans la deuxième partie nous avons appliqué la commande vectorielle à la GSAP qui permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple de la génératrice. Après résultat, l'instar de vitesse qui suit la forme de la consigne. Il apparaît cependant que le réglage de la vitesse par la commande vectorielle manque de robustesse, en raison des variations paramétriques de la machine qui affectent le découplage. En complétant la commande vectorielle par une commande par mode glissement qui permet d'obtenir de meilleurs résultats ainsi qu'une meilleure robustesse.

PERSPECTIVES :

Comme perspectives, nous proposons :

- Utiliser d'autres techniques de commande (MPPT avancés, la logique floue, réseaux de neurones....)
- Connecter l'éolienne à un réseau ou à une charge.

Annexe

Paramètres de la turbine :

Angle de calage	3
Nombre de pale	3
Rayonne de pale (R)	1 M
Gaine de multiplicateur (G)	1
Coefficient de frottement visqueux	0.001 N.m /rad
Coefficient de puissance (Cp)	0.54
Lambda (λ)	6.61 La
densité volumique	1.22
Moment d'inertie (J)	0.0141 Kg.m ²

Paramètres de la GSAP :

Puissance nominale	KW
Nombre de paires du pôle	3
Inductance statorique en directe	0.016 H
Inductance statorique en quadrature	0.016 H
Résistance statorique	0.895 Ω
Le flux magnétique produit par les aimants	0.9 Web
La charge électrique résistive (Rch)	200 Ω
La charge électrique inductive (Lch)	0.002 H
Le coefficient de frottement (f)	0.001 N.m /rad

Caractéristique de vent :

La vitesse moyenne du vent : $V_{moy} = 8m/s$

La masse volumique de l'air : $= 1.225(kg/m^3)$



Bibliographie

Bibliographie

[1] **KOUMIR MILOUD** : «Commande Intelligente d'une Éolienne à Vitesse Variable», thèse de doctorat département génie électrique –laboratoire des Signaux-Systèmes et Informatique, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah Faculté des Sciences , maroc, 2017.

[2] : **SALMA EL AIMANI** «modélisation des différents technologies éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», thèse de doctorat département génie électrique -le laboratoire L2EP de l'Ecole centrale de Lille sous la direction du professeur Benoit robyns, école central de Lille, université des sciences et technologies, le 06/12/2004.

[3] : **TOUATI MUSTAPHA KAMEL** «Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique», mémoire de magister, département d'électrotechnique – Université de Batna Faculté de Technologie, le 15/01/2015.

[4] : **BENKHALED BILAL** « Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne», Mémoire de master département de génie électrique – université de m'sila faculté de technologie, promo 2013.

[5] : **TELLI ABDERRAHIM** «étude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseau mt», mémoire de magister, département d'électrotechnique,-université des sciences et de la technologie d'Oran, faculté de génie électrique, promo 2012.

[6] : **AKRABOU Omar, AICHAOUI Belkheir** « Etude des paramètres météorologique intervenant dans la simulation d'un parc éolien - Cas du site d'Adrar », mémoire de master, département des sciences des matières, université ahmed draia adrar, faculté des sciences et technologie, 22/05/2017.

[7] : **BELAIMECHE FATIMA ZOHRA** «Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable», thèse de doctorat 3ème cycle, département d'électrotechnique, université djillali liabes de sidi-belabbes, Faculté de Génie Electrique, 2018.

[8]: **S. HAMECHA** « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents » Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri –TiziOuazou 2013.

[9] [sites.uclouvain.be/ eleee/ FR/ realisations/ EnergiesRenouvelables/ FiliereEolienne/ Generalites/ DifferentesTechnologies/ DifferentesTechnologiesEolien2](https://sites.uclouvain.be/eleee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/DifferentesTechnologies/DifferentesTechnologiesEolien2) .

[10] **DIONE FATOU** « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents », MEMOIRE DE MASTER, Université d'Annaba, Juin 2018.

[11] **TEBBAL ABDEREZZAK ET SEKHRI Miloud** « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent », Master en Electrotechnique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, en 2019.

- [13] **P. LECONTE, M. RAPIN ET E. SZECHENYI**, « Eoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. 1-21, 2009.
- [14] **G. B. Huang, Q. Y. Zhu and C. K. Siew**, "Extreme learning machine: Theory and applications", Neurocomputing, vol. 70, pp. 489–501, 2006.
- [15] **A. GUETTAF**, « Optimisation floue-génétique d'un système de pompage éolien », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider–Biskra, 2013.
- [16] **S. METATLA** « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » Mémoire de magister, École Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger, 2009.
- [17] **A. NABIL**. « Optimisation multicritères et multi-physique d'aérogénérateurs à aimants permanents à flux axial ». Université du Havre, 2008.
- [18] **ABDIL, ANZIZI AHMADI** « ETUDES EXPERIMENTALES DES MACHINES A COURANTS CONTINU ». THESE C.A.P.E.N, UNIVERSITE D'ANTSIRANANA. Février 2001
- [19] **BOUARAKI MOULOUD** « étude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF ». Thèse de doctorat, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES. 2011/2012.
- [20] **KAHLA SAMI** « Modélisation et commande d'un système éolien ». Thèse de doctorat, UNIVERSITE 8 MAI 1945 GUELMA, 2017/2018.
- [21] **BELGACEM HASSANE & Hamoudi Mektoub** «Optimisation du Rendement d'un Générateur Eolien à axe Horizontal Basé sur Machine Synchrone » Master en Electromécanique. Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira. 2017-2018
- [22] **ASSAM Azzeddine & BOUKERMA Redouane** « Optimisation et commande d'une chaîne de conversion éolienne par la logique floue adaptative » Master en Electromécanique. Université Akli Mohand Oulhadj –Bouira. 2018-2019.
- [23] **Dr. JOHNSON. G.L**, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.
- [24] **A.S. TOLEDO**, 'Commande Directe et Observation des Convertisseur de Puissance : Application à l'Onduleur de Tension Triphasé', Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique, Grenoble, 2000.
- [25] Communication, 'Les Moteurs Synchrones et leurs Applications Industrielles', Journées de l'Enseignement, de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle, SEE-MAFPEN, Gif-sur-Yvette, Mars 1995.
- [26] **N.AIT RAMDANE**, Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri –Tizi-Ouazou (2012).
- [27] **L.ZAROOUR**, Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau, Thèse de doctorat, Université Mentouri–Constantine (2010).

- [28] **ADAMS. A.D, CABOT. W.K, G. AE et Jr IRVING.**, « Fractional pitch windings for induction motors », compte rendu de conférence du 24^{me} congrès annuel de l’A.I.E.E, Niagara Falls, N.Y., 28 juin 1970. Pp. 1485- 1503.
- [29] **Beltran, B., Ahmed-Ali, T., Benbouzid, M.E.H** (2008). Sliding Mode Power Control of VariableSpeed Wind Energy Conversion Systems. IEEE Transactions on énergie Conversion 23(2), 551 - 558.
- [30] **NAIT SEGHIR amirouche** «contribution à la commande adaptative neuronale d’uneMachine synchrone à aimants permanents », mémoire de magister, département génie électrique –laboratoire de commande des processus, école national polytechnique,
16 /12/2007
- [31] **Noureddine BOUNASLA** « Commande par Mode de Glissement d’Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents » mémoire de magister. Université Ferhat ABBAS Sétif -1.2014
- [32] **MIRECKI. A,** « Etude comparative de chaîne de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, l’Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [33] **R. SADOUNI,** « Commande par mode glissant flou d’une machine asynchrone à double étoile » Thèse de Magister, Université de Sidi Bel Abbès, 2010.
- [34] **Gaad M** « Modélisation et réalisation d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC. Application à la conduite de la machine asynchrone », mémoire de magister, EMP 2000.Alger.
- [35] **H. SEMMACHE** «Développement des Performances des Systèmes Energétiques Dans la Production d’Energie Eolienne» Laboratoire ‘Interaction Réseau Commande’, Dpt. Électrotechnique, Université Djillali Liabbès, Sidi Bel Abbés. 1999.
- [36] **MAYOUF MESSAOUD** « contribution à la modélisation de l’aérogénérateur synchrone a aiment permanents » Mémoire de magister, Département d’Electrotechnique, Université de Biskra, 18/02/2008.
- [37] **FREDERIC .POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation De l’énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double Alimentation reliée aux réseaux)», Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes,France, 2003].
- [38] **ZEGGAI SIDI MOHAMMED.** « Commande non linéaire d’une génératrice synchrone à aimant permanent pour un système éolien » mémoire de master Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2018-2019.
- [39] **Soltane BELAKEHAL** « Conception & Commande des M Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables » thèse Doctorat en sciences science. CONSTANTINE UNIVERSITE DE CONSTANTINE.