



RÉPUBLIQUE POPULAIRE DÉMOCRATIQUE
D'ALGÉRIE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE LAGHOuat AMAR TELIDJI

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Mémoire de Master

DOMAINE : Science Technologie

FILIERE : Electronique

OPTION : Automatique et Informatique Industrielle

Titre:

**Commande d'un système éolien basé sur un générateur
synchrone à aimants permanents et connecté au réseau
électrique**

Présenté par :

AKROUB Nouredine

GUEFFAF Laala

Encadré par :

Pr. BOUTOUBAT Mohamed

Devant le Jury de soutenance composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ABOUC HABANA Nabil	MCB	Président
BOUTOUBAT Mohamed	Pr	Encadreur
BELKHIRI Mohamed	Pr	Examineur

Promotion : 2023 -2024

Remerciement

Nous remercions Allah le Tout Puissant qui nous a donné la santé, la force, la patience et la volonté pour mener à bien cette thèse.

Nous sommes vraiment redevables et reconnaissants à notre encadrant Pr.Mohamed BOUTOUBAT qui a accepté de diriger ce travail et pour ses encouragements, son encadrement et son soutien pour comprendre et mener à bien cette thèse du niveau préliminaire au niveau final.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi que les administrateurs et tous les membres du jury pour nous avoir honoré en acceptant de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos familles et amis qui nous ont accueilli et soutenu pendant nos études.

A ceux que nous avons involontairement oublié et qui ont participé de quelque manière que ce soit à la préparation de ce travail, trouvez ici l'expression de notre gratitude.

DEDICACE

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire « Ya Kayoum »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère...

À mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que Dieu les garde et les protège.

- mes frères et mes sœurs,
- toute ma famille.
- tous les amis.
- A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.
- Toute la promotion 2024 d'électronique. 

GUEFFAF Laala

DEDICACE

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire « Ya Kayoum »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère...

À mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que Dieu les garde et les protège.

- Mes frères et mes sœurs, • Toute ma famille.
- tous les amis.
- A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.
- Toute la promotion 2024 d'électronique.

AKROUB Nouredine

Résumé

L'objectif principal de ce travail est la commande d'un système éolien à base d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) entraînée par une turbine à vitesse variable. En premier temps, un modèle a été établi pour chaque élément constituant la chaîne de conversion d'énergie.

L'aérogénérateur (MSAP) est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire de deux convertisseurs en cascade (AC/DC) et (DC/AC) à commande MLI. En effet, l'application au Convertisseur Côté Machine (CCM) d'un régulateur PI de vitesse associé à un autre régulateur PI des courants statoriques dans le repère dq nous a permis de capter le maximum de puissance du vent et réaliser ce qu'on appelle le fonctionnement en MPPT. Un autre régulateur PI associé un régulateur à hystérésis du courant ont été appliqués au convertisseur Côté Réseau (CCR) afin de garder une tension constante au niveau du bus continu et permettre ainsi le transfert optimal de la puissance active au réseau au pertes près.

Mots clés: Système de Conversion d'Energie Eolienne; Convertisseurs Statiques (AC/DC et DC/AC), MLI, commande de la Vitesse par PI, MSAP, Commande de la tension du bus continu, MPPT.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التحكم في نظام طاقة الرياح بالاعتماد على آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم (MSAP) مدفوعة بتوربينة متغيرة السرعة. أولاً تم إنشاء نموذج لكل عنصر من عناصر سلسلة تحويل الطاقة. يتم توصيل مولد الرياح MSAP بشبكة الكهرباء عبر محولين متتاليين (AC/DC) و (DC/AC) مع التحكم في PWM في الواقع، فإن التطبيق على CCM لمنظم سرعة PI المرتبط بمنظم PI لتيارات الجزء الثابت في مرجع dq سمح لنا بالتقاط أقصى طاقة للرياح وتحقيق ما يسمى بتشغيل MPPT. تطبيق منظم PI آخر مرتبط بمنظم التباطؤ الحالي على محول CCR من أجل الحفاظ على جهد ثابت عند مستوى ناقل التيار المستمر.

الكلمات المفتاحية: نظام تحويل طاقة الرياح؛ المحولات الثابتة (AC/DC) و (DC/AC)، PWM، التحكم في السرعة عن طريق PI، MSAP، التحكم في جهد الناقل..DC.

Abstract

The main objective of this work is the control of a wind system based on a Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) driven by a variable speed turbine. First, a model was established for each element constituting the energy conversion chain.

The PMSM stator is connected to the electrical network via two cascade converters (AC/DC) and (DC/AC) with PWM control strategy. Indeed, the application to the CCM of a PI speed regulator associated with a PI regulator of the stator currents in the dq frame allowed us to capture the maximum power of the wind and achieve what is called MPPT operation. Another PI regulator associated with a current hysteresis regulator is applied to the CCR converter in order to keep a constant voltage at the DC bus.

Keywords: Wind Energy Conversion System; Static Converters (AC/DC and DC/AC), PWM, PI Speed Control, MSAP, DC Bus Voltage Control, MPPT.

Sommaire

Remerciement	I
DEDICACE.....	I
DEDICACE.....	II
Liste Des Figures.....	IV
Liste Des Tableaux.....	VI
Introduction générale	1
I. Chapitre I Etat de l'art sur les systèmes éoliens	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique de l'éolien.....	3
I.3 Définition de l'énergie éolienne	4
I.4 Constitution d'une éolienne	6
I.5 Définition du vent	7
I.6 La mesure du vent.....	7
I.7 Principaux composants d'une éolienne.....	8
I.7.1 Le mât	8
I.7.2 La nacelle	9
I.7.3 Le rotor	9
I.8 Principe de conversion d'énergie éolienne	10
I.9 Les différents types d'éoliennes	11
I.9.1 Eoliennes à axe vertical	11
I.9.2 Eoliennes à axe horizontal	13
I.10 Modes d'opération d'une éolienne	13
I.10.1 Eolienne connectée au réseau	14
I.10.2 Eolienne alimentant une charge isolée.....	14
I.10.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne	14
I.11 Classification des éoliennes	16

I.12 Chaînes de conversion électromécanique	16
I.12.1 Systèmes couplés aux réseaux alternatifs	16
I.12.2 Systèmes autonomes	18
I.13 Conclusion	20
II. Chapitre II Modélisation de la chaîne éolienne	24
II.1 Introduction	23
II.2 Description et modélisation du système éolien étudié.....	23
II.3 Modélisation du vent	23
II.4 Modélisation de la turbine	24
II.4.1 Puissance mécanique de la turbine	24
II.4.2 Loi d'Albert BETZ	26
II.4.3 Coefficient de puissance de la turbine.....	26
II.5 Intérêt de la vitesse variable	27
II.6 Nombre de pales	28
II.7 Modélisation de la Machine Synchrone à aimant permanent.....	29
II.7.1 Mise en équation de la MSAP	29
II.7.2 Transformation de Park	31
II.8 Les convertisseurs d'électronique de puissance.....	35
II.8.1 Définition.....	35
II.8.2 Modélisation de l'onduleur de tension alimentant la MSAP.....	35
II.9 Bus-continu.....	37
II.10 Modélisation du convertisseur côté réseau (CCR)	38
II.11 Conclusion.....	40
III. Chapitre III Commande du Système Eolien	44
III.1 Introduction	41
III.2 Principe de la MLI Sinus-Triangle.....	41
III.3 Principe de la MLI à hystérésis de courant	43

III.4 Stratégie de commande du convertisseur (CCM)	43
III.4.1 Synthèse du régulateur PI de la vitesse	45
III.4.2 Synthèse des régulateurs PI des courants (i_d et i_q)	46
III.4.3 Stratégies de commande appliquées au CCR.....	53
III.4.4 Régulateur PI de la tension Vdc	55
III.5 Conclusion.....	58
Conclusion générale	59

Liste Des Figures

Figure I-1 :Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure I-2 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus	5
Figure I-3 : Composition d'une éolienne à axe horizontal.	7
Figure I-4 : Outils de mesure de la vitesse du vent.....	8
Figure I-5 : Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne. 9	
Figure I-6 : principe de conversion d'énergie éolienne	10
Figure I-7 : Éolienne de Savonius.....	11
Figure I-8 : Éolienne de Darrieux.	12
Figure I-9 : Éoliennes à axes horizontales.	13
Figure I-10 : Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent	15
Figure I-11 : Système éolien à vitesse fixe connecté au réseau.	17
Figure I-12 : Système éolien à vitesse variable à base d'une MADA connecté au réseau	17
Figure I-13 : Système éolien à vitesse variable à base d'une MSAP connecté au réseau	18
Figure I-14 : Système éolien à base d'une MCC connecté au réseau	18
Figure I-15 : Aérogénérateur à aimants permanents débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu.....	20
Figure II-1 : Système éolien connecté au réseau	23
Figure II-2 : Schéma bloc général du système éolien.	26
Figure II-3 : Variation du coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$ en fonction de λ pour différentes valeurs de β	27
Figure II-4 : Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	28
Figure II-5 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation	29
Figure II-6 : Représentation géométrique d'une machine synchrone à aimants permanents.	30
Figure II-7 : L'image de vecteur x sur les axes d q à des différents instants	32
Figure II-8 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé avec la MSAP.....	36
Figure II-9 : Schéma électrique du bus continu [9]	37

Figure II-10 Schéma électrique du convertisseur du côté réseau.	38
Figure III-1 : Schéma de principe de MLI sinus triangle.....	42
Figure III-2 : Signal MLI résultant.	42
Figure III-3 : <i>Contrôle à hystérésis d'un bras de l'onduleur</i> . [12].....	43
Figure III-4 : Illustration de la bande de courant à hystérésis [13]	43
Figure III-5 : <i>Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique $C_p(\lambda)$</i>	44
Figure III-6 : Structure de la commande du CCM.....	45
Figure III-7 : Boucle de régulation de la vitesse.....	45
Figure III-8 : Boucle de régulation du courant I_d	47
Figure III-9 : Boucle de régulation du courant I_q	48
Figure III-10 : Allure de la vitesse de vent	49
Figure III-11 : Allure de la vitesse de rotation réelle avec sa référence (rad/s).....	50
Figure III-12 : Allure du coefficient de puissance (C_p).....	50
Figure III-13 : Allure de la vitesse spécifique.	50
Figure III-14 : Allure du courants référence i_q et sa référence (A)	51
Figure III-15 : Allure du courant i_d avec sa référence (i_{dref})(A)	52
Figure III-16 : Composantes réelles du courant statorique dans le repère abc.	53
Figure III-17 : Zoom des courant statoriques dans le repère abc.	53
Figure III-18 : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCR.	55
Figure III-19 : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}).	55
Figure III-20 : Allure de la tension du bus continu (V_{dc}) (V).....	56
Figure III-21 : Allure du courants de la ligne (i_{abc}) (A).	57
Figure III-22 : Zoom de la tension de phase A ($V_{A/100}$) (V) et son courant correspondant (i_a) (A).	57
Figure III-23 : Allures des puissances active (P_g) (W) et réactive (Q_g) (Var).....	58

Liste Des Tableaux

Tableau II-1 : la différence entre l'onduleur de tension et onduleur de courant.....	35
--	----

Introduction générale

L'énergie éolienne est l'énergie extraite de l'énergie cinétique du vent par la rotation des éoliennes pour produire de l'énergie électrique, et elle est considérée comme un type d'énergie électromécanique. L'énergie éolienne est l'un des types d'énergie renouvelable qui s'est répandue comme alternative aux combustibles fossiles, et c'est une énergie abondante et renouvelable, mais son abondance varie d'un endroit à l'autre. Il s'agit d'une énergie propre et renouvelable qui ne produit pas d'émissions telles que des gaz à effet de serre pendant son fonctionnement, et qui nécessite des surfaces variables en fonction de la taille de l'usine et du type de tours utilisées. Les éoliennes ne sont pas recommandées dans les zones urbaines en raison d'obstacles qui empêchent l'utilisation de bonnes vitesses de vent, mais elles sont réalisables dans les zones rurales en raison du grand espace et du manque de bâtiments. Leur impact sur l'environnement est généralement moins problématique que celui des autres sources d'énergie. Malgré sa production abondante dans les zones où la vitesse du vent est élevée, l'un de ses inconvénients à l'échelle de l'utilité est que sa production de pointe ne correspond généralement pas à la consommation de pointe, ce qui ne contribue pas à réduire la charge sur les centrales électriques conventionnelles pendant les pics de consommation. À l'échelle des maisons, son plus grand inconvénient est que la production des éoliennes n'est pas permanente, et pour éviter cela, la production peut être utilisée en la connectant directement au réseau électrique public ou en installant des batteries pour stocker cette énergie et en bénéficier tout au long de la journée. En règle générale, dans les systèmes hors réseau à l'échelle domestique, l'énergie éolienne n'est pas utilisée seule sans d'autres sources renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque, pour se soutenir mutuellement et augmenter la fiabilité de la production d'électricité. Les grands parcs éoliens sont constitués de centaines d'éoliennes individuelles qui sont connectées à un réseau pour le transport de l'énergie électrique. L'énergie éolienne terrestre est une ressource peu coûteuse et compétitive ; elle est moins chère que les centrales au charbon, au gaz ou à combustibles fossiles. Les éoliennes offshore sont plus stables et plus fortes que les éoliennes terrestres, mais les parcs éoliens offshore ont des coûts de construction et de maintenance plus élevés que les fermes ordinaires. Les petits parcs éoliens terrestres peuvent fournir de l'électricité à des sites isolés hors réseau. Selon les statistiques de 2013, le Danemark est le pays le plus consommateur d'énergie éolienne au monde, produisant plus d'un tiers de

ses besoins en électricité éolienne. En outre, 83 pays dans le monde utilisent l'énergie éolienne pour renforcer leurs réseaux électriques. La capacité éolienne a rapidement augmenté pour atteindre 336 gigawatts en juin 2014, de sorte que la production d'énergie éolienne représentait environ 4 % de la consommation totale d'électricité dans le monde, et ce pourcentage est en constante augmentation.

Ce mémoire présente l'étude d'une chaîne de l'énergie éolienne en énergie électrique connectée au réseau électrique. En effet, cette chaîne est connectée au réseau à travers un dispositif d'électrique de puissance.

Dans le premier chapitre, on présente quelques généralités sur quelques chaînes de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique et le choix de la structure à étudier.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments constituant la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

La simulation sous MATLAB nous permet de déterminer le comportement dynamique de la turbine.

Le troisième chapitre sera réservé au développement des différentes stratégies de commande appliquées au système éolien afin de satisfaire certaines performances en boucle fermée.

Finalement, ce travail sera clôturé par une conclusion générale sur les travaux réalisés durant ce travail et on avancera un certain nombre de perspectives pour donner une suite fructueuse à ce travail dans le futur

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux.

Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie, tout en préservant l'environnement. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne.

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne.

Ensuite nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques.

Ainsi que les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées

I.2 Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins {blé et les constructions permettant le pompage d'eau}. Mais jusque présent son exploitation reste difficile.

L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en avant Jésus-Christ environ Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent.

La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ ans avant J.-C.

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Âge. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie.

Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000.[1]

A l'arrivée de la machine {vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice.

Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu-être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du dernier siècle, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ million d'aérogénérateurs.

La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde. [1]

I.3 Définition de l'énergie éolienne

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

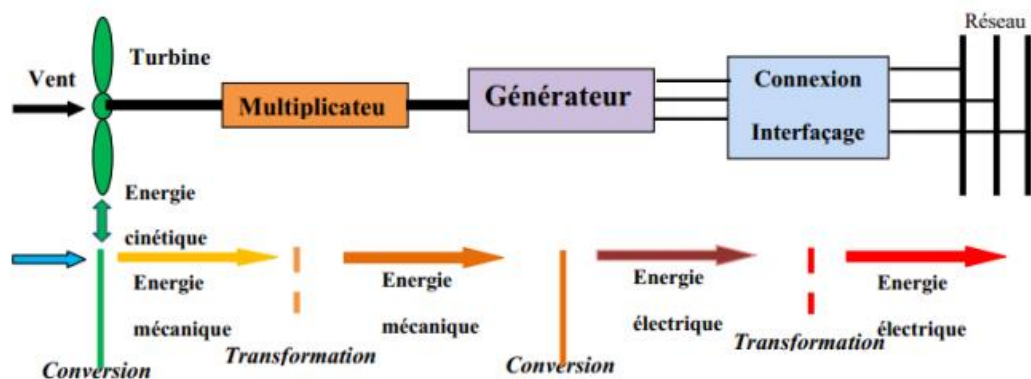


Figure I-1: Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.[2]

Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes

de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical: ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances).

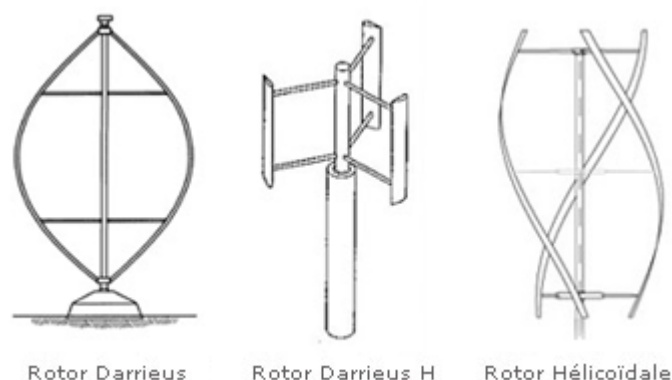


Figure I-2: Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus

Les éoliennes à axe horizontal : beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles.

Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles.

En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres.

Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.4 Constitution d'une éolienne

Une éolienne comprend six composants principaux : [2]

- Un rotor servant à convertir de façon aérodynamique l'énergie éolienne en énergie mécanique sur un arbre tournant lentement.
- Une boîte de vitesses servant à accroître la vitesse de l'arbre du rotor pour le générateur.
- Un générateur produisant de l'électricité. Dans certains cas, des générateurs de conception spéciale pouvant fonctionner à la vitesse de l'arbre du rotor sans aucune boîte de vitesses.
- Un système de commande et de protection servant à optimiser le rendement et à conserver la machine en état de fonctionnement dans des limites sécuritaires.
- Une tour qui permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, où la vitesse du vent est supérieure et les effets des obstacles locaux sont moindres.
- Une base qui soutient l'éolienne, quelquefois à l'aide de haubans.

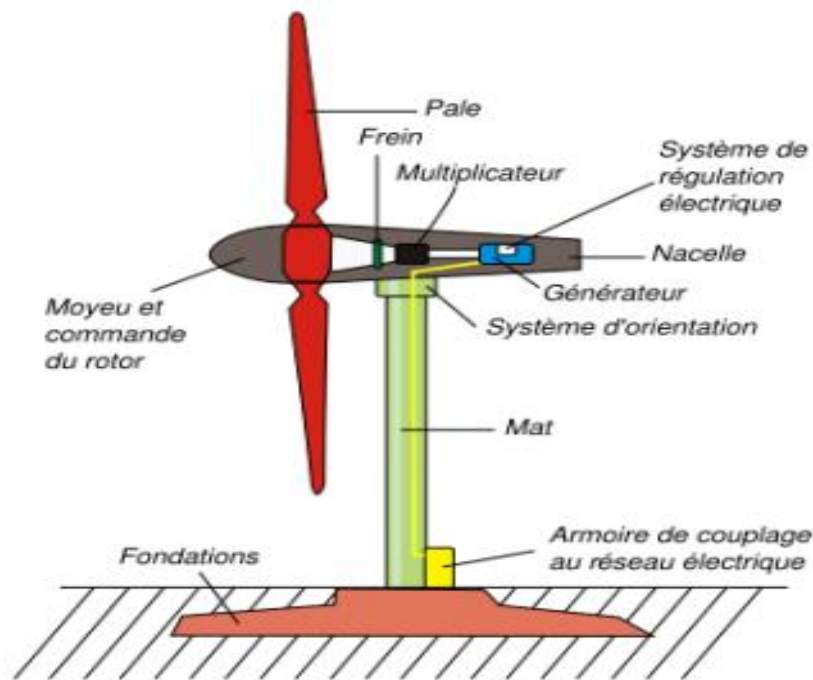


Figure I-3: Composition d'une éolienne à axe horizontal.

I.5 Définition du vent

Le vent est le déplacement de l'air au sein de l'atmosphère. Il est né sous l'effet des différences de températures et de pressions.

Ainsi, lorsqu'il existe une différence de pression entre deux points, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée (où l'air est froid) vers l'endroit où elle est la moins élevée (où l'air est chaud).

En d'autres termes, l'air se déplace de la haute pression vers la basse pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil. Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (matin et soir). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent.[3]

I.6 La mesure du vent

La mesure du vent comprend deux grandeurs à savoir, la vitesse et la direction du vent.

Pour mesurer la vitesse du vent on se sert d'un anémomètre. Ce dernier est un instrument qui se compose de 3 petites coupelles hémisphériques, disposées à l'extrémité de bras métalliques espacés de 120° (Figure I.4.a).

Un compteur relié à l'axe de rotation permet de lire la vitesse et de l'enregistrer suivant les modèles.

Aussi, il est à noter que la vitesse du vent peut être exprimée en milles, en kilomètres par heure, en mètres par seconde ou en nœuds.

Par ailleurs, pour connaître la direction des vents on se sert d'une girouette, souvent associée à l'anémomètre (Figure I.4.b). Lorsque le vent change de direction, il pousse sur la grosse partie de la flèche (l'arrière) jusqu'à ce qu'elle soit alignée avec le vent (parallèle au vent). Cela a pour conséquence de faire pointer la flèche dans la direction d'où provient le vent. On se réfère alors aux quatre principaux points cardinaux pour juger de la direction d'où vient le vent. On place habituellement la girouette à 10m du sol ainsi, la direction du vent est exprimée comme un point de la boussole d'où le vent souffle. De l'air se déplaçant du Sud-ouest au Nord-est s'appelle un vent de Sud-ouest.

A noter que la direction peut également être exprimée en degrés, où le vent de Sud-ouest est relatif à une direction de 220° . [3]

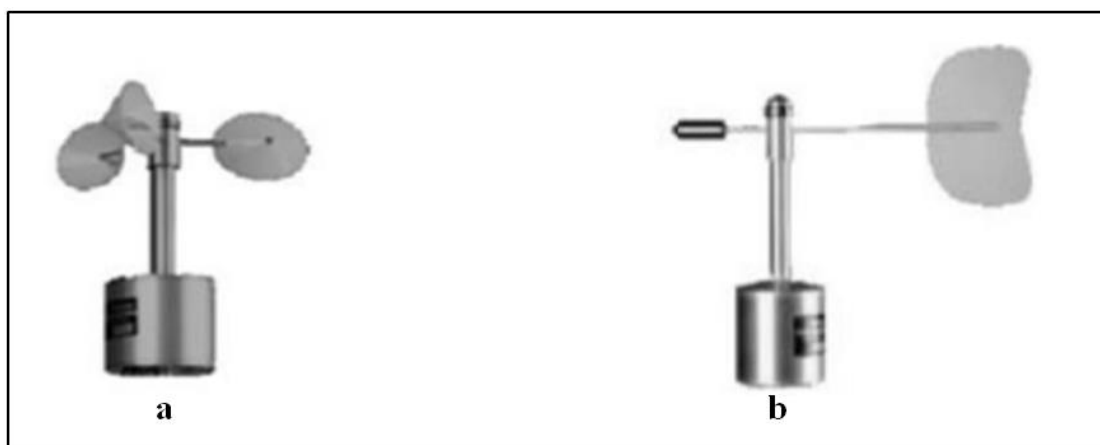


Figure I-4: Outils de mesure de la vitesse du vent

I.7 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes.

Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

I.7.1 Le mât

Généralement, c'est un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.

Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

I.7.2 La nacelle

Elle Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure I-5): arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

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

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne. [1]

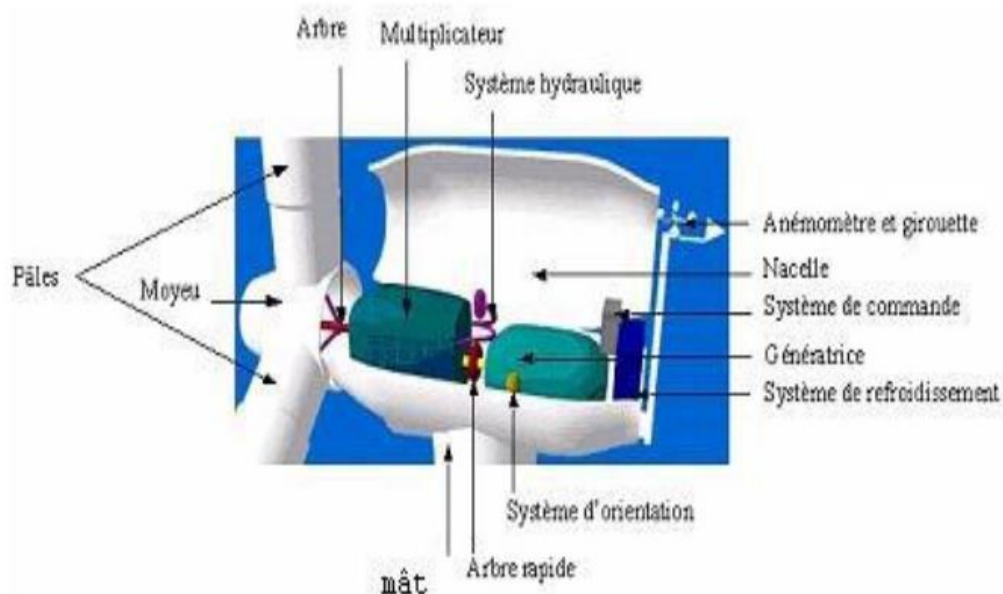


Figure I-5: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

I.7.3 Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Il existe deux types de rotors à savoir :

- **Les rotors à vitesse fixe** sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage de la fréquence de production d'électricité. Le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

- **Les rotors à vitesse variable** sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe).

Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances

I.8 Principe de conversion d'énergie éolienne

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique disponible sur l'arbre de la turbine, puis en énergie électrique par le générateur.

Celle-ci est ensuite distribuée aux normes sur le réseau électrique, via un transformateur. Le fonctionnement général est illustré par la figure I.5

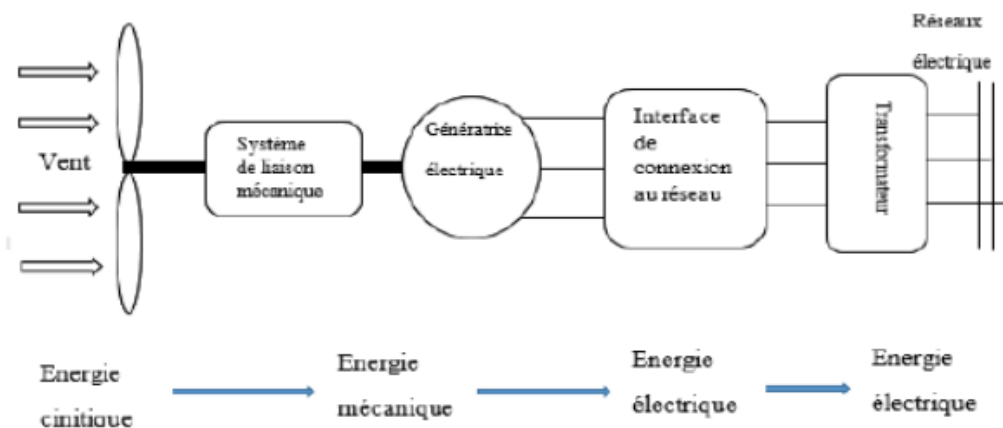


Figure I-6: principe de conversion d'énergie éolienne

Il existe différentes configurations possibles, qui peuvent avoir des différences importantes selon la conception mécanique et la technologie utilisée.

Néanmoins, un aérogénérateur classique est constitué de mêmes éléments de bases, à savoir:

- Une turbine ou l'hélice avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Un générateur électromécanique qui reçoit de l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.
- Un système de liaison au réseau électrique.

I.9 Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical

I.9.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation à savoir :

- 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'intensité différente, 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-6).

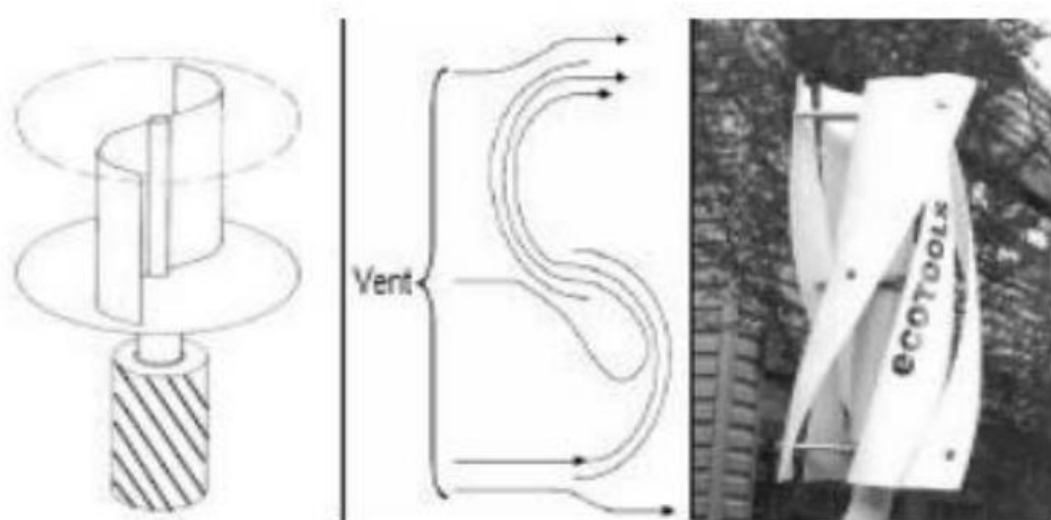


Figure I-7: Éolienne de Savonius.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieux (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 (Figure I-7) 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).

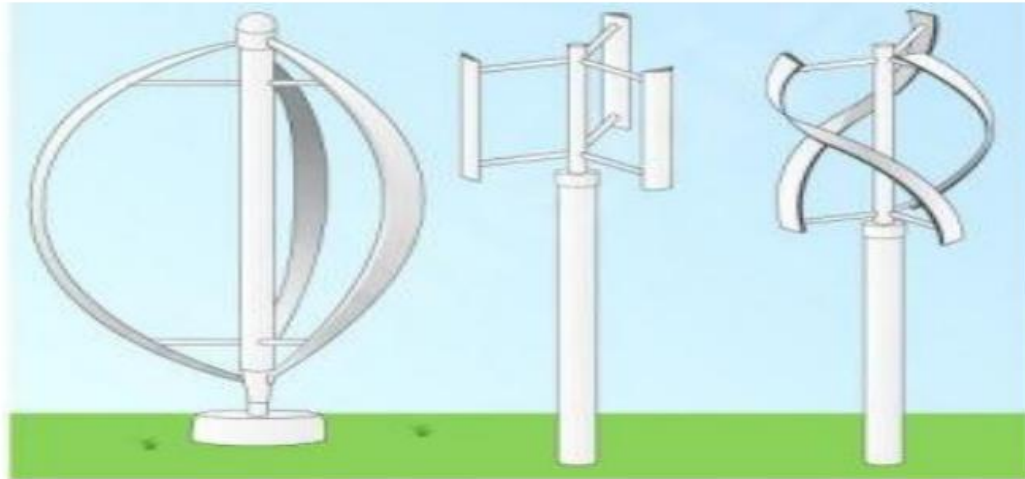


Figure I-8: Éolienne de Darrieux.

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance, de 100 W à 25 kW [1]. Elles sont destinées à des utilisations permanentes.

Par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne.

Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent.

Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

I.9.2 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'éolienne 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.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [1].



Figure I-9: Éoliennes à axes horizontales.

I.10 Modes d'opération d'une éolienne

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de deux manières ; selon qu'elle soit connectée au réseau ou alimentant une charge isolée.

I.10.1 Eolienne connectée au réseau

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines, mais on peut retrouver aussi des machines isolées connectées au réseau [4].

Le courant électrique acheminé à travers le réseau doit avoir une fréquence de 50 Hz avec une tension d'amplitude bien définie. Une éolienne raccordée au réseau se doit donc de fournir une tension respectant ces exigences, quelle que soit la vitesse du vent.

Une première technique consiste à garder la vitesse de rotation de la génératrice constante. Cette dernière est alors obtenue par régulation notamment avec l'orientation des pales (Commande STALL).

Mais il est également possible de faire fonctionner une éolienne à vitesse de rotation variable en utilisant un convertisseur de fréquence tel que le cycle-convertisseur.

A vitesse trop faible du vent, l'éolienne s'arrête en raison des forces de frottement sec qui s'opposent à la rotation de l'hélice. Cette diminution de la vitesse de rotation ne permet plus de fournir cette fréquence. Dans ce cas, l'éolienne devienne consommatrice d'électricité, elle est donc automatiquement déconnectée du réseau.

Si la vitesse du vent est trop forte (supérieure à 100 km/h par exemple), l'éolienne est mise en sécurité et déconnectée du réseau, ses pales sont "mises en drapeau" et s'arrêtent pour éviter des sollicitations qui pourraient les briser. Certaines éoliennes récentes continuent à tourner mais à vitesse réduite, diminuant ainsi le nombre de déconnexions du réseau et augmentant la production moyenne par vent fort. [4]

I.10.2 Eolienne alimentant une charge isolée

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel. [4]

I.10.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Le rôle de la régulation de vitesse de l'éolienne est d'assurer la sécurité de l'éolienne contre les vents violents (rafales) et d'optimiser l'extraction de la puissance du vent.

Suite au diagramme de la Figure I.8, une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre mécanique une puissance nominale P_n obtenue à partir d'une vitesse nominale du vent V_n .

Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n , la turbine éolienne doit modifier son mode de fonctionnement afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n , on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage V_d à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent V_m , avec laquelle, il y'aura plus de conversion de l'énergie du vent pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n, V_d, V_m définissent quatre zones sur le diagramme de puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- zone I, où $P = 0$ (la turbine à l'arrêt) ;
- zone II, dans laquelle la puissance fournie dépend de la vitesse du vent V_n ;
- zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance P fournie reste égale à P_n .
- zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

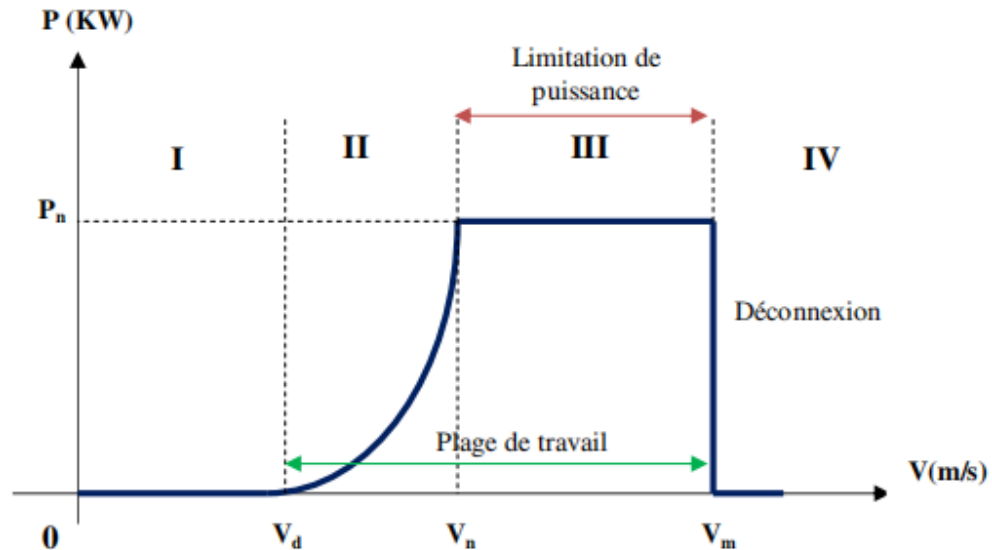


Figure I-10: Diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent

Il est noté que la plupart des éoliennes démarrent lorsque la vitesse du vent atteint une certaine valeur qui presque égale 3 m/s (*Cut in*) et s'arrêtent lorsque cette vitesse atteint 25 m/s (*Cut out*). [4]

I.11 Classification des éoliennes

Les génératrices éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé comme suit :

- La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, machine asynchrone, machine à courant continu).
- Le type de capteur.
- Le mode de régulation (pitch ou stall régulation).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse constante ou variable) [2]

I.12 Chaînes de conversion électromécanique

Diverses chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs.

Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe (ou peu variable) ou à vitesse variable. On peut, par exemple, classer ces solutions par leur fonctionnement couplé ou non au réseau.

I.12.1 Systèmes couplés aux réseaux alternatifs

I.12.1.1 *Machines asynchrones à cage*

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [2].

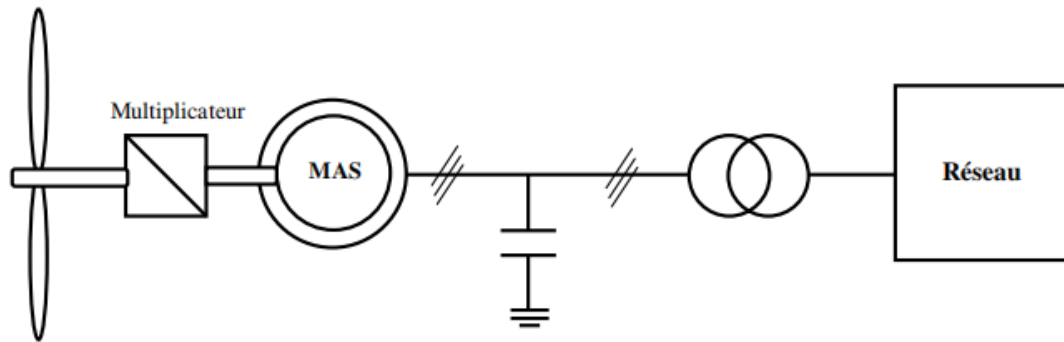


Figure I-11: Système éolien à vitesse fixe connecté au réseau.

I.12.1.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant [2].

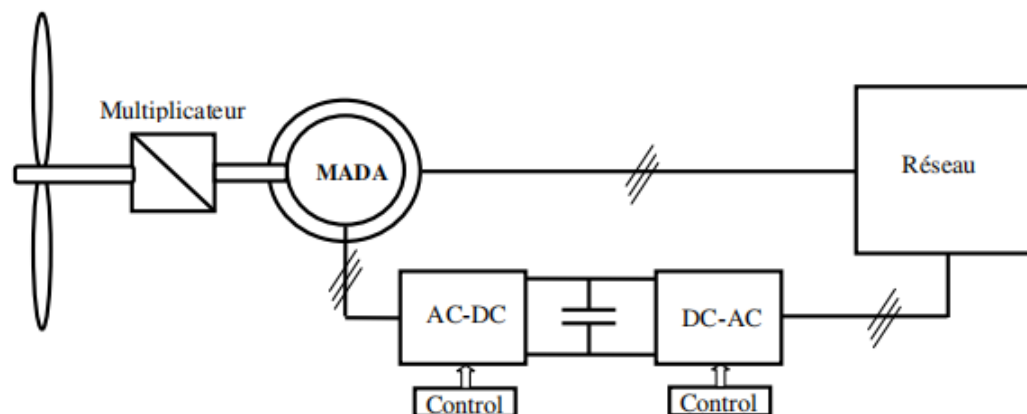


Figure I-12 : Système éolien à vitesse variable à base d'une MADA connecté au réseau

I.12.1.3 Machines synchrones (MS)

Enfin, tout particulièrement dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs performances, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles.

Leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable. Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses.

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années.

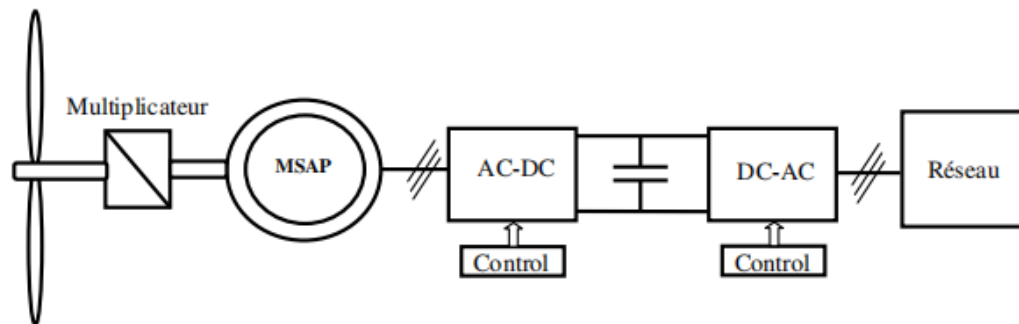


Figure I-13 : Système éolien à vitesse variable à base d'une MSAP connecté au réseau

I.12.1.4 Machines à courant continu (MCC)

Les machines à courant continu peuvent être utilisées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique comme le montre le schéma suivant :

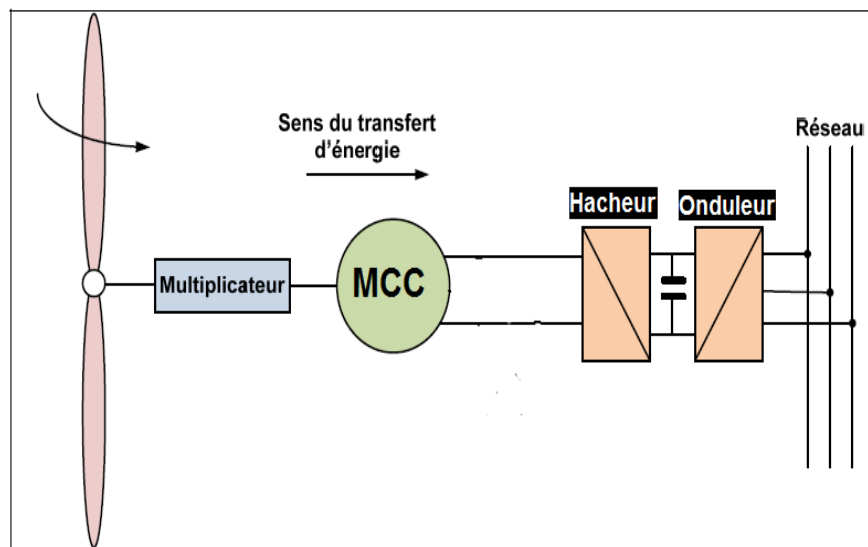


Figure I-14 : Système éolien à base d'une MCC connecté au réseau

I.12.2 Systèmes autonomes

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel.

Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et est auto amorcée par condensateurs. Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voir des accumulateurs inertiels, peuvent également être associés via un convertisseur électronique.

Les inconvénients principaux de ce type de chaîne sont dus à la rigidité (vitesse faiblement variable par glissement de la GAS), l'absence d'optimisation de puissance et la nécessité d'un multiplicateur de vitesse.

Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu. Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus.

La (figure I.19) montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système.

La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique.

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects.

En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation.

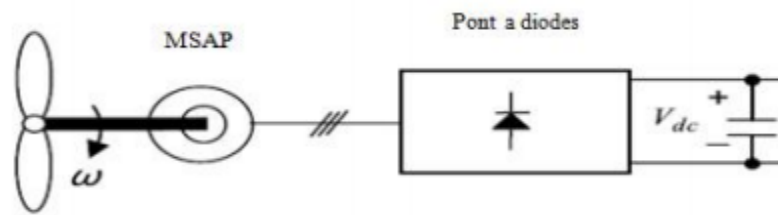


Figure I-15 : Aérogénérateur à aimants permanents débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à donner des informations générales sur les turbines (historique, type, constitution...etc). Ensuite, on a passé à une brève description des principaux systèmes éoliens existants dans la littérature. Effectivement, on a essentiellement décrit les principes de fonctionnement des différentes machines utilisées dans des systèmes éoliens et on s'est concentré principalement sur leurs avantages, inconvénients et leurs constitutions. Finalement, et vue la simplicité de son modèle et sa commande, notre choix est porté sur l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents comme génératrice dans notre système éolien qui est connecté au réseau et qui sera modélisé et commandé dans les prochains chapitres.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne éolienne

II.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ses différents éléments sont conçus pour optimiser cette conversion énergétique. D'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Pour parvenir à cet objectif, une éolienne doit comporter généralement:

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

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation des éléments constituant le système éolien.

II.2 Description et modélisation du système éolien étudié

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette mémoire est constituée d'une turbine éolienne, un multiplicateur, une machine à courant alternatif (Machine Synchrone à Aimants Permanents), un bus continu et deux convertisseurs statiques de puissance (redresseur + onduleur). Le schéma complet de notre système éolien est présenté sur la figure suivante :

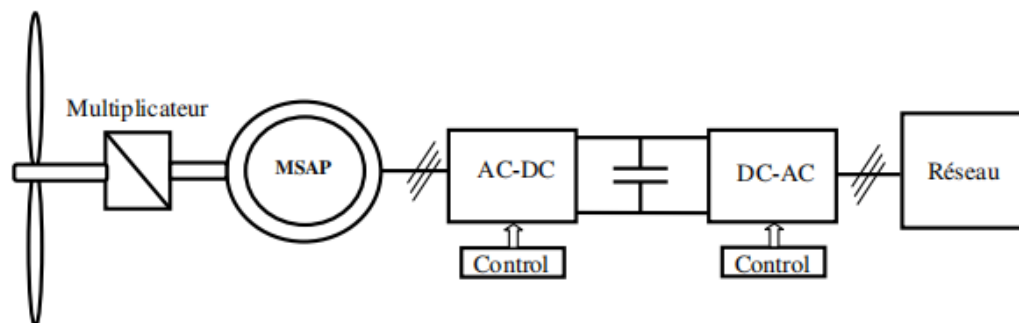


Figure II-1 : Système éolien connecté au réseau

Les paragraphes suivants sont réservés à modélisation des différents éléments de ce système éolien

II.3 Modélisation du vent

Généralement, l'énergie cinétique du vent est l'énergie primaire et fondamentale du système de conversion d'énergie éolienne. Son principe physique général se résume comme suit. Le déplacement du vent au niveau de la turbine éolienne crée des forces sur les surfaces de ses pales qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif.

La modélisation du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'année concernée par l'étude. Le modèle mathématique du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est exprimé par l'équation (II.1).

$$v(t) = v_0 + v_t(t) \quad (II.1)$$

Avec:

v_0 : Valeur moyenne de la composante lente.

$v_t(t)$: Fluctuations provoquées par les turbulences.

Il existe trois niveaux de vent suivant la valeur moyenne [3]

- Vent faible pour ($6 < v_0 < 12 \text{ m/s}$);
- Vent moyen ($12 < v_0 < 18 \text{ m/s}$);
- Vent fort ($v_0 > 18 \text{ m/s}$).

II.4 Modélisation de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

II.4.1 Puissance mécanique de la turbine

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante

$$p_{turb} = c_p(\lambda, \beta) \cdot p_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c_p(\lambda, \beta) \cdot v_{vent}^3 \quad (II.2)$$

Notant que la puissance du vent est exprimée par :

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turb}}{v_{vent}} \quad (II.3)$$

Avec:

- λ : vitesse spécifique (en anglais « tip speed ratio »);
- β : angle d'orientation des pales en degrés [$^\circ$];
- p_{turb} : puissance aérodynamique de la turbine [W].
- c_p : coefficient de puissance représentant le rendement de conversion de l'énergie du vent.
- ρ : masse volumique de l'air [kg/m^3].
- Ω_{turb} : vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s].
- v_{vent} : la vitesse d vent [m/s].

- R : Rayon d'une pale de turbine [m].

Dans notre cas, la boîte de vitesse est modélisée par un gain (G). On peut donc écrire

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{turb} \quad (II.4)$$

- Ω_{mec} : vitesse de rotation de la génératrice [rad/s],
- G : gain du multiplicateur,
- Ω_{turb} : vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s],

Ainsi, le couple du générateur (C_{mec}) qui fait tourner la GSAP est lié au couple de la turbine (C_{turb}) par la :

$$C_{mec} = \frac{C_{turb}}{G} \quad (II.5)$$

L'équation mécanique du système éolien côté générateur s'exprime par [5] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.6)$$

Où, J et f sont donnés respectivement par :

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_{mach} \quad (II.7)$$

$$f = \frac{f_{tur}}{G^2} + f_{mach} \quad (II.8)$$

- J_{tur} : (Kg.m²) est l'Inertie de la turbine ;
- J_{mach} : (Kg.m²) est l'inertie du générateur ;
- f_{tur} : (N.m.s) est le frottement de la turbine ;
- f_{mach} : (N.m.s) est le frottement du générateur ;
- C_{em} : Est le couple électromagnétique du générateur (N.m).

A partir des équations précédentes, on peut établir le schéma bloc général de notre système éolien.

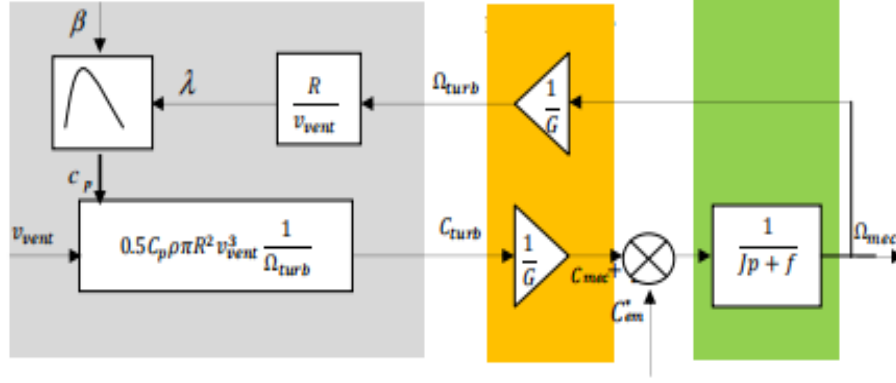


Figure II-2 : Schéma bloc général du système éolien.

II.4.2 Loi d'Albert BETZ

Selon la théorie de **BETZ** (année 1920), nous pouvons écrire $c_p(\lambda, \beta)$ en fonction d'un facteur d'interférence (a).

$$c_p(\lambda, \beta) = 4a \cdot (1 - a)^2 \quad (II.9)$$

La valeur maximale du coefficient de puissance, est appelée limite de **BETZ**.

Elle a été obtenue par **BETZ** en procédant comme suit :

$$\frac{dc_p}{da} = 0$$

Donc

$$\frac{d[4a \cdot (1-a)^2]}{da} = 0 \rightarrow 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

D'où $a = 1$

(Solution à rejeter parce que le coefficient de puissance s'annule) et $a = \frac{1}{3}$ qui est la du coefficient maximal exprimé par:

$$c_{pmax} \approx 0.5926 = 59.26\%$$

Cette limite indique que la turbine ne peut pas extraire plus de 59.26% de la puissance disponible dans le vent.

II.4.3 Coefficient de puissance de la turbine

Empiriquement, le coefficient de puissance C_p peut être exprimé par la relation empirique suivante [3]:

$$c_p(\lambda, \beta) = [0.73(\frac{151}{\lambda'}) - 0.002 \cdot \beta - 13.2] \exp(\frac{-18.4}{\lambda'}) \quad (II.10)$$

Avec :

$$\lambda' = [1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\lambda^3 + 1)]^{-1} \quad (II.11)$$

La représentation graphique du coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$, en fonction de λ , exprimé par l'équation (II.10), pour différentes valeurs de β est illustrée par Figure II.3.

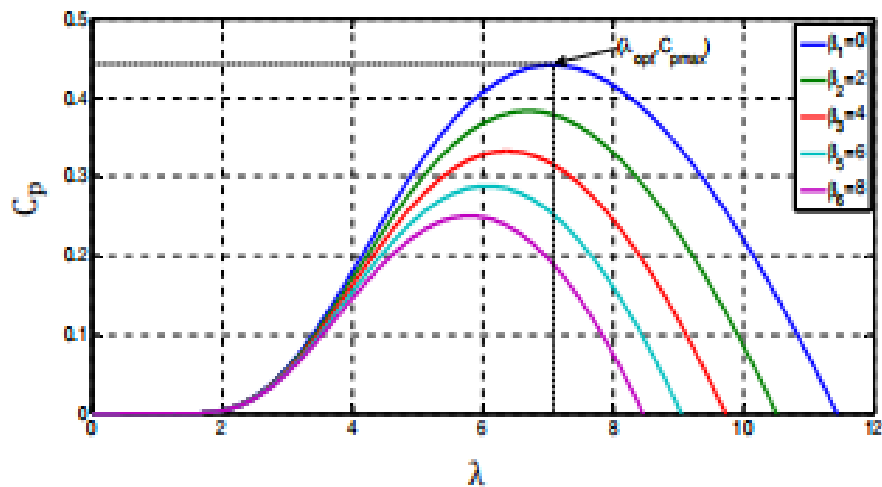


Figure II-3 : Variation du coefficient de puissance $c_p(\lambda, \beta)$ en fonction de λ pour différentes valeurs de β .

On peut remarquer que le coefficient de puissance passe par un maximum ($c_{pmax} = 0.44$), qui est toujours inférieur à la valeur maximale de BETZ (0.59) pour un angle de calage des pales $\beta = 0$. Il lui correspond une valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda_{opt} = 7.05$.

II.5 Intérêt de la vitesse variable

Si on considère les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse.

En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée à une charge, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent qui correspond à une valeur (λ_{opt}).

La vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique. La (figure I.13) montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent.

Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. [2]

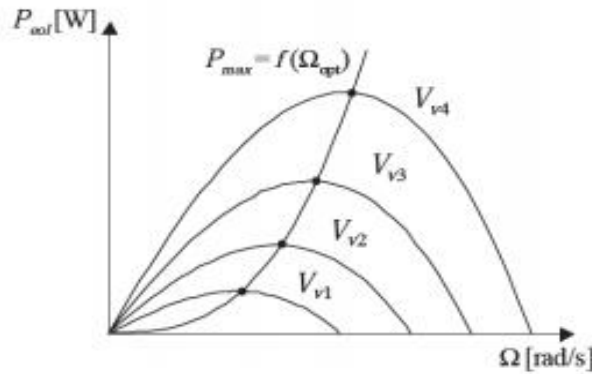


Figure II-4 : Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

II.6 Nombre de pales

Dans l'optique de réduire les contraintes dues à la précession, les éoliennes modernes ont trois pâles, de sorte qu'une seule pale est soumise à une précession maximale.

Le défaut historique majeur des éoliennes était d'avoir un nombre pair de pâles, de sorte que deux pâles étaient verticales en même temps. Le modèle à deux pâles est celui qui reçoit le plus de contraintes.

La plupart des éoliennes artisanales possèdent deux pâles, car elles sont fabriquées à partir d'une seule longue pièce courbée de bois ou de métal, montée sur un générateur de récupération, tel qu'un alternateur de voiture ou un moteur de machine à laver.

Les rotors à nombre pair de pâles ne nécessitent pas obligatoirement de fixer individuellement chaque pale sur un moyeu. Aussi, beaucoup d'éoliennes commercialisées ont elles deux pales, car il est plus facile et plus économique d'usiner celles-ci d'un seul tenant.

Les éoliennes à trois pâles, bien plus efficaces et silencieuses, doivent généralement être montées sur place.

Quand une éolienne puissante possède plus de trois pâles, celles-ci sont perturbées par l'air déplacé par la pale précédente.

Le rendement s'en trouve réduit. La (figure II.5) montre l'influence du nombre de pale sur la puissance utile présente sur l'arbre :

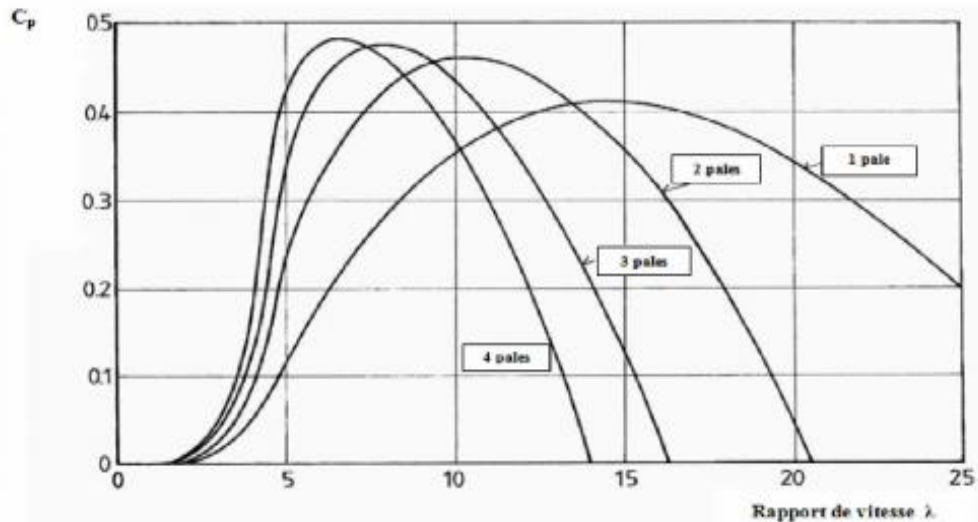


Figure II-5 : Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation

Les vibrations diminuent quand le nombre de pâles augmente. En plus de fatiguer les mécanismes, certaines vibrations sont audibles et provoquent des nuisances sonores.

Cependant, les éoliennes possédant moins de pâles, plus grandes, fonctionnent à un nombre de Reynolds plus élevé, et sont par conséquent plus efficaces.

Le prix d'une éolienne augmente avec le nombre de pâles, leur nombre optimal semble donc être de trois.

II.7 Modélisation de la Machine Synchrone à aimant permanent

L'établissement d'un modèle mathématique d'une Machine Synchrone à aimant permanent (MSAP) est nécessaire pour son étude et sa commande pour fonctionner dans les différents régimes (transitoire et permanent). Pour pouvoir établir un modèle de la MSAP afin de faciliter sa commande, des hypothèses de simplification sont nécessaires :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé ;
- Les f.e.m sont à répartition sinusoïdale ;

L'effet de la température sur les résistances est négligeable, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligeable,

II.7.1 Mise en équation de la MSAP

La figure II.6 donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.

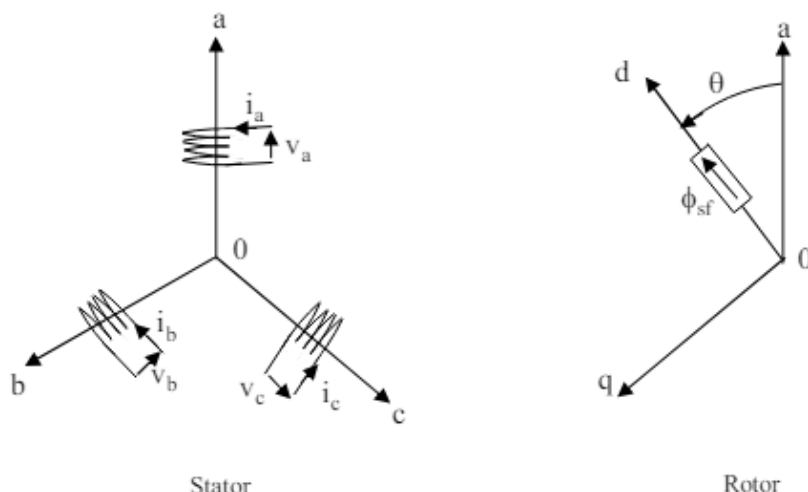


Figure II-6: Représentation géométrique d'une machine synchrone à aimants permanents.

A partir de la figure II.6, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère abc en utilisant la notation matricielle:

- Expression des tensions statoriques

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (II.12)$$

- Expression des flux statoriques

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [\varphi_r] \quad (II.13)$$

Avec :

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

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} : \text{Vecteur des tensions statoriques.}$$

$$[I_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} ; \text{Vecteur des courants statoriques.}$$

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} ; \text{Vecteur des flux statoriques.}$$

- Expression des flux magnétiques

Les flux statoriques sont la somme des flux dus aux courants statoriques et aux flux dus aux aimants permanents et ils s'écrivent :

$$[\varphi_{abc}(t)] = [L_s][i_{abc}] + [\varphi_r] \quad (II.14)$$

Avec:

$$[\varphi_r] = [\varphi_{rm}] \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

$[\varphi_r]$; Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique ;

φ_{rm} : Valeur maximale de flux créé par l'aimant; θ est

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}; \text{matrice des inductances statorique.}$$

L'Angle électrique (θ) se calcule comme suit :

$$\theta = \int_0^t \omega_r(\tau) d\tau \quad (II.16)$$

Avec :

$$\omega_r(t) = P\Omega_{mec} \quad (II.17)$$

P : Nombre de paires de pôles ;

Ω_{mec} : Vitesse de rotation mécanique du rotor ;

ω_r : Pulsation des tensions statoriques et , des courants statoriques et les flux statoriques.

L'étude analytique du comportement des équations (II.16) et (II.17) est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de PARK

Après avoir déterminé ces différentes équations de la MSAP dans le modèle naturel (abc), nous allons établir le modèle de Park de la machine et cela afin d'appliquer facilement les différentes techniques de commande en boucle fermée dans le chapitre prochain.

II.7.2 Transformation de Park

La transformée de Park, souvent confondue avec la transformée dqo, est un outil mathématique utilisé en électrotechnique, et en particulier pour la commande vectorielle, afin de modéliser un système triphasé grâce à un modèle biphasé.

Il s'agit d'un changement de repère. Les deux premiers axes dans la nouvelle base sont traditionnellement nommés d, q. Les grandeurs transformées sont généralement des courants, des tensions ou des flux.

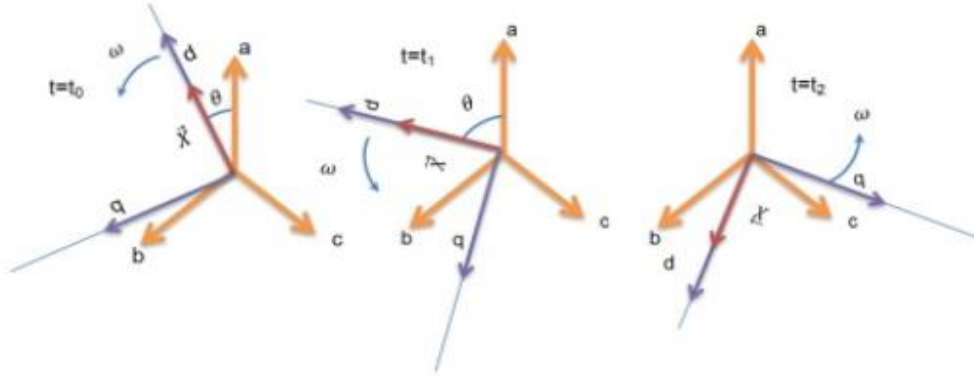


Figure II-7: L'image de vecteur x sur les axes d q à des différents instants

II.7.2.1 Modèle de Park de la machine

Hypothèses

Pour pouvoir établir le modèle PARK à notre machine, il est important de faire certaines hypothèses, qui sont :

- La répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale ; les harmoniques d'espace sont négligés [6], [7].
- Le stator est muni d'un enroulement triphasé a,b,c couplé en étoile sans neutre et il n'y a pas de courant mono polaire;
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé (régime établi);
- Saturation du matériau négligée ;
- Les phénomènes d'hystérésis et des courants de Foucault sont négligés.
- Les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés.
- L'effet de la température est négligé.

Fonctionnement en moteur.

- Passage direct (triphasé au biphasé)

Le passage d'un système triphasé à un système biphasé (d,q) est donné par l'équation suivante :

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}] \quad (II. 18)$$

Avec :

P(θ): la matrice de passage direct de Park

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (II. 19)$$

Où, X représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux.

Alors on peut écrire:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad (II. 20)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad (II. 21)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix}; \quad (II. 22)$$

X_d : La composante d'axe direct.

X_q : La composante d'axe en quadrature.

X_o : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est équilibré.

- Passage inverse (biphasé au triphasé)

Le passage inverse d'un système biphasé (d,q) à un système triphasé est obtenu par l'équation suivante :

$$[X_{abc}] = P(\theta)^{-1} \cdot [X_{dqo}] \quad (II. 23)$$

Et la matrice de passage inverse de Park $[P(\theta)^{-1}]$ est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (II. 24)$$

Autrement dit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (II. 25)$$

Équations électriques

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - P\Omega L_q i_q \quad (II.26)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + P\Omega L_d i_d + P\Omega \varphi_{rm} \quad (II.27)$$

Avec

$$\omega_r = P \cdot \Omega \quad (II.28)$$

ω_r : la vitesse électrique de rotation et P paires de pôles de la MSAP.

Équations magnétiques

$$[\varphi_{dq}] = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} [i_{dq}] + \begin{bmatrix} \varphi_{rm} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

Expression du couple électromagnétique

La puissance active consommée par le stator est la suivante :

$$\begin{cases} P_s = 1.5(v_d i_d + v_q i_q) \\ P_s = 1.5R_s(i_d^2 + i_q^2) + 1.5 \left(L_d i_d \frac{di_d}{dt} + L_q i_q \frac{di_q}{dt} \right) + 1.5\Omega P(L_d i_d i_q + i_q \phi_{rm} - L_q i_q i_d) \end{cases} \quad (II.30)$$

Cette dernière équation représente le bilan de puissance de la MSAP. Effectivement

- Le terme: P_s : représente la puissance électrique active consommée par la MSAP;
- Le terme: $1.5R_s(i_d^2 + i_q^2)$ représente les pertes Joules;
- Le terme: $1.5 \left(L_d i_d \frac{di_d}{dt} + L_q i_q \frac{di_q}{dt} \right)$ représente la variation de l'énergie électrique emmagasinée dans les inductances statoriques
- Le terme: $1.5\Omega P(L_d i_d i_q + i_q \phi_{rm} - L_q i_q i_d)$ représente la puissance électromagnétique qui s'écrit en fonction du couple électromagnétique et de la vitesse comme suit:

$$P_{em} = C_{em}\Omega = 1.5\Omega P(L_d i_d i_q + i_q \phi_{rm} - L_q i_q i_d) \quad (II.31)$$

D'où l'expression du couple électromagnétique:

$$C_{em} = 1.5P((L_d - L_q) i_d i_q + i_q \phi_{rm}) \quad (II.32)$$

MSAP à pôles lisses

Dans le cas où la MSAP est à pôles lisses ($L_d=L_q$), cette dernière équation se simplifie à:

$$C_{em} = 1.5P(i_q \phi_{rm}) \quad (II.33)$$

Puissance utile

En multipliant les deux membres de l'équation mécanique (équation II.8) par la vitesse mécanique (Ω), on obtient:

$$P_{em} = C_{em}\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \Omega + f\Omega^2 + C_r\Omega \quad (II.34)$$

- P_{em} : Puissance électromagnétique produite par la MSAP (cas de génératrice);
- Le premier terme: $J \frac{d\Omega}{dt} \Omega$, représente la variation de l'énergie mécanique emmagasinée dans l'inertie de la MSAP;
- Le deuxième terme: $f\Omega^2$, représente les pertes par frottements;
- Le troisième terme: $C_r\Omega$, représente la puissance utile consommée par la charge (produite par l'éolienne dans notre cas).

II.8 Les convertisseurs d'électronique de puissance

II.8.1 Définition

Un onduleur est un convertisseur de type continu-alternatif (DC/AC); il permet d'alimenter une charge en alternatif à partir d'une source de tension continue.

Il existe deux types d'onduleurs : onduleur de tension et onduleur de courant. Le tableau (II.1) résume les principales différences entre un onduleur de tension et celui du courant:

Tableau II-1 : la différence entre l'onduleur de tension et onduleur de courant

Onduleur	Interrupteurs électronique	Source continue d'alimentation	Charge alimentée en alternatif
De tension	Bidirectionnel en courant	Source de tension	La tension est imposée, le courant dépend de la charge
De courant	Unidirectionnel en courant	Source de courant	Le courant est imposé, la tension dépend de la charge

Si l'onduleur impose sa propre fréquence à la charge on parle d'un onduleur autonome [8].

Si la fréquence est imposée par la charge (exemple : onduleur débitant sur le réseau) on parle d'un onduleur assisté [8].

Dans notre cas, on a utilisé un onduleur de tension bidirectionnel en courant et qui est modélisé dans le paragraphe suivant:

II.8.2 Modélisation de l'onduleur de tension alimentant la MSAP

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne.

- $S_{a,b,c} = 1$: Interrupteur du demi-bras haut (a,b ou c) fermé.
- $S_{a,b,c} = 0$: Interrupteur du demi-bras bas (a,b ou c) ouvert.

La figure II.8 montre le schéma d'un onduleur triphasé avec sa charge (MSAP).

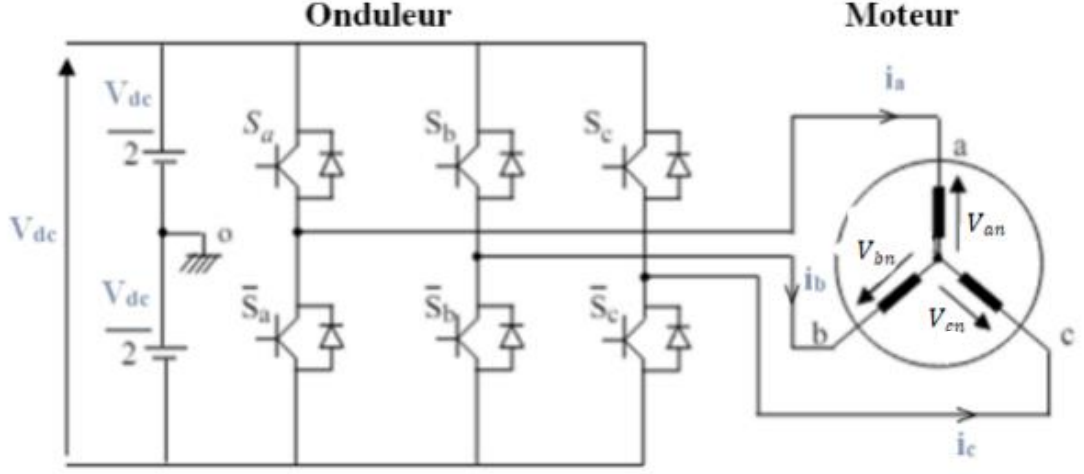


Figure II-8: Schéma d'un onduleur de tension triphasé avec la MSAP

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Soit "n" l'indice du point neutre du coté alternatif, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (II.35)$$

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions simples de la machine et V_{no} est la tension fictive entre le neutre de la MASP et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (II.36)$$

La substitution de (II.36) dans (II.35) aboutit à:

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}). \quad (II.37)$$

En remplaçant (II.37) dans (II.35), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} + \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} + \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (II.38)$$

Alors :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bn} = \frac{V_{dc}}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ V_{cn} = \frac{V_{dc}}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (II.39)$$

Finalement, les tensions statoriques à MLI en fonction des états des interrupteurs et de la tension du bus continu, peuvent être exprimées de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

Cette dernière équation représente le modèle mathématique de l'onduleur de tension à deux niveaux.

En outre, on peut écrire le courant i_{CCM} en fonction des courants de la ligne

(i_a, i_b, i_c) est de l'état des interrupteurs (S_i) comme suit :

$$i_{CCM} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (II.41)$$

II.9 Bus-continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration de son courant capacitif (Figure II.9) [9]:

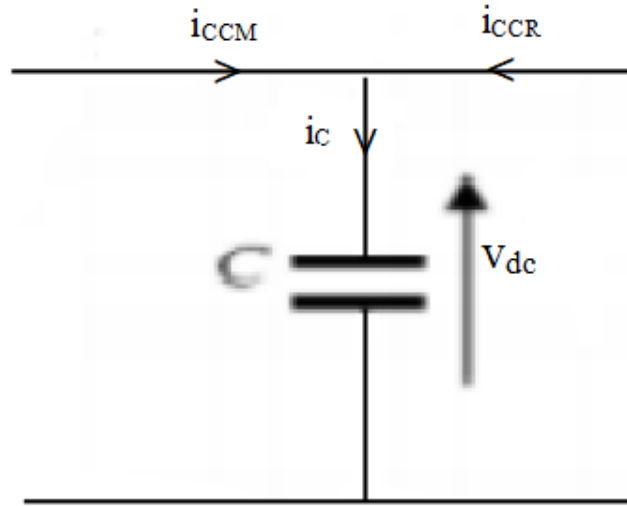


Figure II-9 : Schéma électrique du bus continu [9]

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (II.42)$$

Ainsi :

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int i_c + V_{dc}(0) \quad (II.43)$$

Le courant i_c peut jouer un rôle particulier dans le maintien de la tension du condensateur de stockage à une valeur constante désirée.

La capacité C est choisie suffisamment élevée pour lisser la tension aux bornes du condensateur.

II.10 Modélisation du convertisseur côté réseau (CCR)

Le convertisseur côté réseau est utilisé pour assurer la connexion du système éolien au réseau électrique, son rôle est l'injection de la puissance générée par l'éolienne au réseau tout en respectant les normes et les conditions exigées par ce dernier; en termes de fréquence, d'amplitude et de phase. Pour cela il est indispensable de choisir une stratégie de contrôle du convertisseur qui doit assurer les objectifs suivants:

- La régulation de la tension de bus continu; cette tension est généralement déstabilisée par plusieurs facteurs, comme la nature fluctuante de la puissance éolienne causée par le vent, le déséquilibre dans le réseau et les chutes de tension dans les commutations des semi-conducteurs;
- Le contrôle de la puissance active et réactive transmise au réseau, afin de maintenir un facteur de puissance désiré du côté réseau.

Figure II-10 présente le convertisseur côté réseau, alimenté par une source de tension continue externe, qui est représentée dans notre cas par la tension V_{dc} du bus continu; placé entre les deux convertisseurs (CCM et CCR). Le convertisseur côté réseau est connecté au réseau à travers un filtre passif de type RL pour filtrer le courant injecté dans le réseau électrique afin d'éviter d'injecter les harmoniques dans le réseau et perturber le fonctionnement des charges et les systèmes de protection dans le réseau électrique.

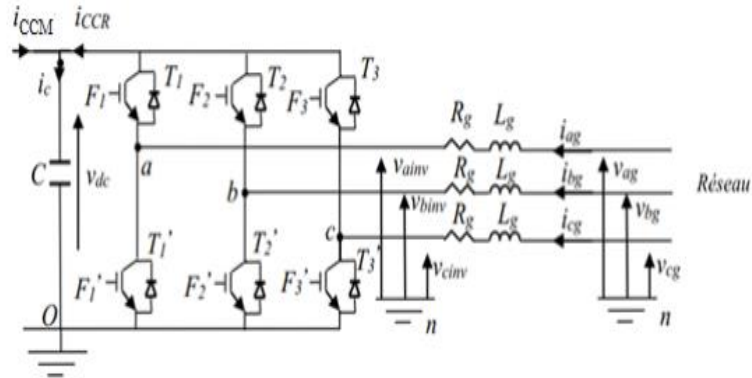


Figure II-10 Schéma électrique du convertisseur du côté réseau.

R_g et L_g sont respectivement la résistance et l'inductance de la ligne triphasée reliant le CCR au réseau.

A partir du schéma électrique, on peut écrire les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{ainv} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{binv} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cinv} + V_{no} \end{cases} \quad (II.44)$$

Les tensions à MLT à la sortie de l'onduleur dans le système triphasé sont équilibrées et par conséquent leur somme est nulle. Donc la somme des tensions à MLI à la sortie du convertisseur sont nulles ($U_{ainv} + U_{binv} + U_{cinv} = 0$).

Par conséquent la tension V_{no} s'exprime de la manière suivante :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}). \quad (II.45)$$

Nous remplaçons l'équation (II.44) dans l'équation (II.42), on peut exprimer les tensions à MLI à la sortie du CCR comme suit :

$$\begin{cases} U_{ainv} = \frac{2}{3}V_{ao} + \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{1}{3}V_{co} \\ U_{binv} = \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} + \frac{1}{3}V_{co} \\ U_{cinv} = \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (II.46)$$

D'autre part, on peut exprimer les tensions ($V_{ao} + V_{bo} + V_{co}$) en fonction de la tension du bus continu V_{dc} suivant les états logiques des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = \begin{cases} V_{dc} \text{ si } T_1 \text{ fermé} & T'_1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_1 \text{ ouvert } T'_1 \text{ fermé} \end{cases} \\ V_{bo} = \begin{cases} V_{dc} \text{ si } T_2 \text{ fermé} & T'_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_2 \text{ ouvert } T'_2 \text{ fermé} \end{cases} \\ V_{co} = \begin{cases} V_{dc} \text{ si } T_3 \text{ fermé} & T'_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_3 \text{ ouvert } T'_3 \text{ fermé} \end{cases} \end{cases} \quad (III.47)$$

Alors à la fin, on obtient les tensions de MLI à la sortie de convertisseur exprimée en fonction de l'état logique F_i des interrupteurs ($i=1, 2,3$) et de la tension du bus continu comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ainv} \\ V_{binv} \\ V_{cinv} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (II.48)$$

En outre, on peut écrire le courant redressé i_{CCR} en fonction des courants de la ligne (i_a, i_b, i_c) est de l'état des interrupteurs (F_i) comme suit :

$$i_{CCR} = F_1 i_{ag} + F_2 i_{bg} + F_3 i_{cg} \quad (II.49)$$

Notons que la détermination des états logiques (F) et (S_i) des intercepteurs dépend de la stratégie de commande à appliquer aux CCM et CCR.

En appliquant la loi de maille, nous pouvons écrire les relations mathématiques reliant les tensions de la sortie du CCR aux tensions du réseau de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_{ag} = R_{giag} + L_g \frac{di_{ag}}{dt} + V_{ainv} \\ V_{bg} = R_{gibg} + L_g \frac{di_{bg}}{dt} + V_{ainv} \\ V_{cg} = R_{gicg} + L_g \frac{di_{cg}}{dt} + V_{ainv} \end{cases} \quad (II.50)$$

Le courant traversant le bus continu est donné par :

$$C \cdot \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = i_{CC}(t) \quad (II.51)$$

Le courant dans la capacité peut aussi être écrit comme suit :

$$i_{CC} = i_{CCM} + i_{CCR} \quad (II.52)$$

Donc l'équation (II.51) peut être exprimée en fonction des états d'interrupteurs comme suit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = (F1i_{ag} + F2i_{bg} + F3i_{cg}) + (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad (II.53)$$

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents éléments constituant notre système éolien. En plus, l'utilisation de la transformation de PARK nous a permis d'élaborer un modèle simple de la MSAP qui va nous faciliter sa commande dans le prochain chapitre. Ensuite, on a établi les modèles statiques à MLI des deux convertisseurs (CCM et CCR) à lesquels on va appliquer les techniques à MLI afin de satisfaire les performances souhaitées en boucle fermée. Aussi, les différents courants circulant dans le système sont exprimés en fonction des états des interrupteurs. Enfin et après avoir établi les différents modèles des éléments constituant notre système éolien, il est temps de lui appliquer les différentes stratégies de commande afin d'achever les performances désirées et notamment la MPPT et la régulation de la tension du bus continu et l'assurance d'un facteur de puissance désiré du côté réseau. Ces travaux seront vus dans le prochain chapitre.

Chapitre III

Commande du Système

Eolien

III.1 Introduction

Après avoir modélisé au chapitre précédent le système de conversion d'énergie éolien basé sur la MSAP, on va s'intéresser dans ce présent chapitre au développement des stratégies de commande qui seront appliquées au système afin de satisfaire certains objectifs en boucle fermée. Ces derniers sont réalisés en commandant les deux convertisseurs à MLI (CCM et CCR).

On procède à l'application au CCM d'un régulateur PI de vitesse associé à un régulateur PI des courants statoriques dans le repère dq afin de satisfaire le fonctionnement en mode MPPT et extraire le maximum de puissance disponible dans le vent. Un autre régulateur PI associé à un régulateur à hystérésis du courant seront appliqués au convertisseur CCR afin de garder une tension constante au niveau du bus continu.

Avant de rentrer dans la commande des deux convertisseurs, on doit expliquer le fonctionnement des techniques à MLI utilisées à savoir (sinus triangle et hystérésis du courant).

III.2 Principe de la MLI Sinus-Triangle

Son principe général consiste à convertir un modulateur (tension de référence de niveau de contrôle), généralement sinusoïdal, en une tension générée à la sortie de l'onduleur sous forme de fentes successives (niveau de puissance). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commande des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

Cette commande de MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants [11]:

- L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence ($m = \frac{f_p}{f_{ref}}$).
- Le coefficient de réglage en tension « r » égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation ($r = \frac{V_{ref}}{V_p}$)

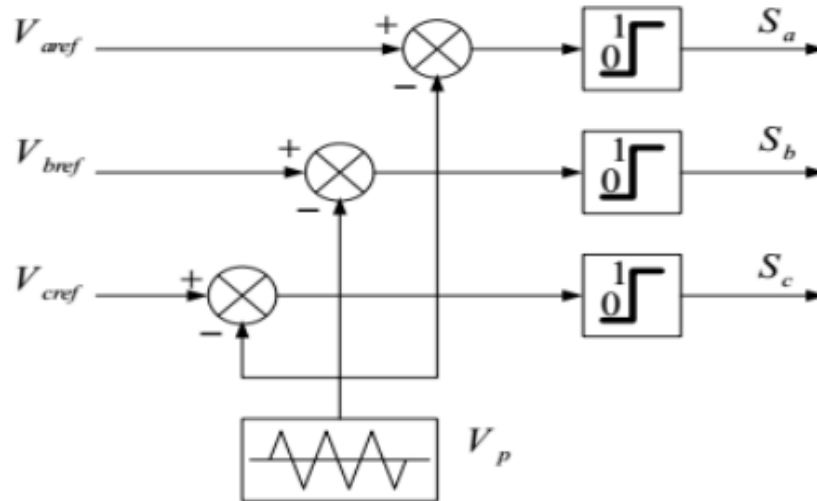


Figure III-1: Schéma de principe de MLI sinus triangle.

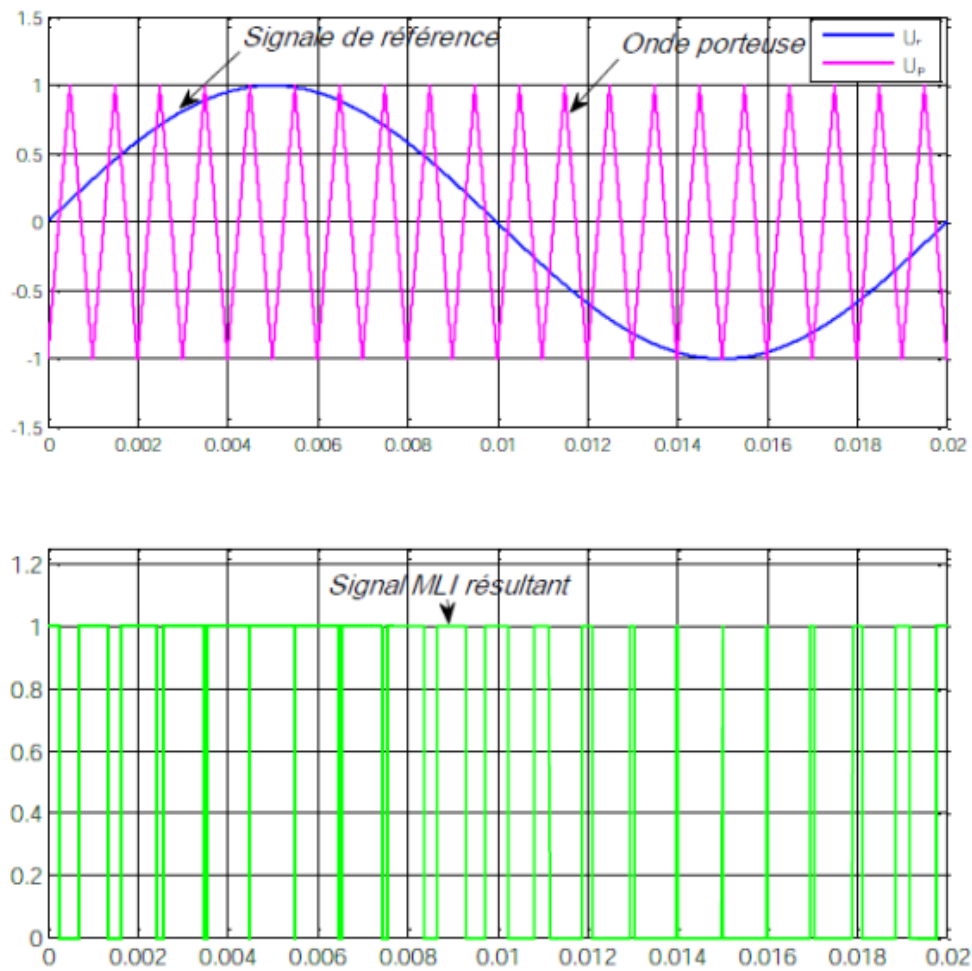


Figure III-2: Signal MLI résultant.

III.3 Principe de la MLI à hystérésis de courant

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à présenter le principe de la technique à MLI à hystérésis. En effet, la commande par hystérésis appelée aussi tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant mesuré. L'erreur obtenue est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis (Δi). Le principe de cette technique est illustré sur la **Figure (III.3)**. A la sortie d'un comparateur à hystérésis, les impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur sont produites, de façon à limiter le courant de phase dans la bande d'hystérésis (Δi) autour du courant de référence [12].

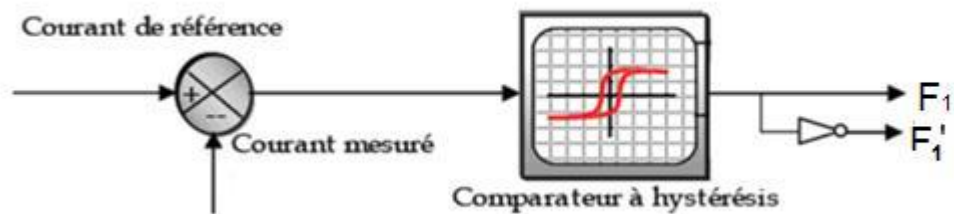


Figure III-3: Contrôleur hystérésis d'un bras de l'onduleur. [12].

Le principe de cette technique est détaillé dans la figure suivante :

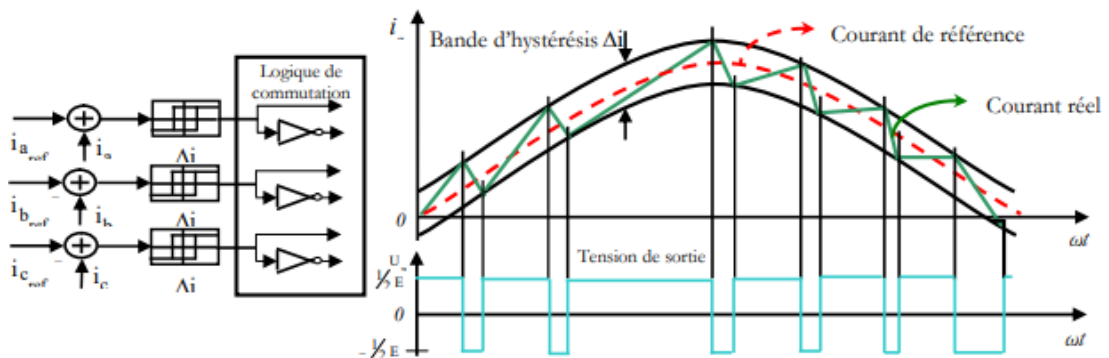


Figure III-4: Illustration de la bande de courant à hystérésis [13]

III.4 Stratégie de commande du convertisseur (CCM)

L'objectif principal fixé par la commande du convertisseur du côté machine (CCM) est l'extraction de puissance maximale du vent et l'injecter dans le réseau électrique et réaliser ce qu'on appelle MPPT. La variation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique est présentée sur la figure suivante :

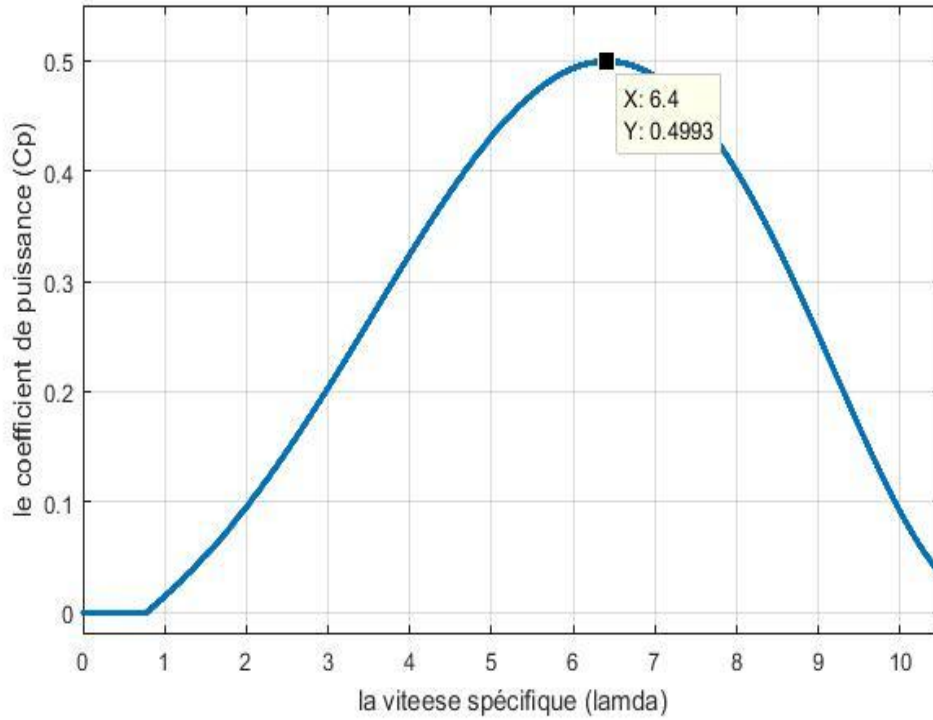


Figure III-5: Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique $C_p(\lambda)$.

On a vu déjà que la vitesse spécifique est donnée par :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v_{vent}} \quad (III.1)$$

Pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et réaliser ce qu'on appelle **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*), il faut assurer que la vitesse spécifique (λ) soit gardée pratiquement égale à sa valeur optimale, pour chaque vitesse de vent (v), exprimée par :

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_{tref}}{v_{vent}} \quad (III.2)$$

D'où la vitesse de référence de la MSAP:

Par conséquent la vitesse de la MSAP doit suivre sa valeur de référence donnée par :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} G v_{vent}}{R}. \quad (III.3)$$

Le schéma détaillé de la commande de CCM pour assurer MPPT est donné par la figure suivante. Ce schéma est basé l'utilisation des régulateurs PI pour la vitesse et pour les courants. La synthèse de ces régulateurs est faites dans les paragraphes suivants:



Le schéma fonctionnel de l'asservissement de la vitesse est présenté sur la figure suivante :


$$G_{on}(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \times \frac{1}{J.s+f} \quad (III.4)$$

$$G_{on}(p) = \frac{K_{in}}{p} \left(\frac{K_{pn} \cdot p}{K_{in}} \right) \left(\frac{1/f}{1+T_n \cdot p} \right) \quad \text{avec} \quad T_n = J/f \quad (III.6)$$

45

$$G_{fn}(p) = \frac{G_0(p)}{G_0(p)+1} \quad (III.7)$$

Avec l'utilisation de la méthode de compensation des pôles nous avons $\frac{K_{pn}}{f} = \frac{1}{f}$

alors : les fonctions de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée seront:

$$\begin{cases} G_{fn}(p) = \frac{G_{in}}{f \cdot p} \\ G_{fn}(p) = \frac{1}{\frac{f}{K_{in}} \cdot p + 1} \end{cases} \quad (III.8)$$

Les gains du régulateur **PI** de vitesse seront calculés en fonction des paramètres de la GSAP et le temps de réponse du système t_r .

$$t_r = 3 \cdot \tau_n \quad \text{Avec} \quad \tau_n = \frac{f}{k_{in}}$$

Donc les gains K_{in} et K_{pn} seront donnés par:

$$\begin{cases} K_{in} = \frac{3 \cdot f}{t_r} \\ K_{pn} = \frac{3 \cdot J}{t_r} \end{cases} \quad (III.9)$$

A la sortie du régulateur PI, nous obtenons la valeur de référence du couple électromagnétique de référence qui est exprimé pour une MSAP à pôles lisses comme suit:

$$C_{em} = 1.5P(i_q \varphi_{rm}) \quad (III.10)$$

Par conséquent on peut contrôler le couple électromagnétique à sa valeur de référence en agissant sur la composante i_q des courants statoriques:

$$i_{qref} = \frac{C_{emref}}{1.5P\varphi_{rm}} \quad (III.11)$$

L'autre composante des courants statoriques est prise égale à zéro afin de minimiser les pertes Jules dans la MSAP et maximiser le couple électromagnétique. Autrement dit, on choisit ($i_{dref}=0$).

III.4.2 Synthèse des régulateurs PI des courants (i_d et i_q)

Dans ce paragraphe, on va synthétiser des PI pour les courants (i_q et i_d) afin suivent leurs références exprimées par (i_{dref} et i_{qref}).

Rappelant le modèle mathématique de la MSAP dans le repère dq:

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - e_q \\ v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + e_d \end{cases} \quad (III.12)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_q = \omega_r L_q i_q \\ e_d = -\omega_r L_d i_d - \omega_r \varphi_{rm} \end{cases} \quad (III.13)$$

III.4.2.1 Régulateur PI du courant I_d

Sa boucle de la régulation est illustrée par la figure III.8.

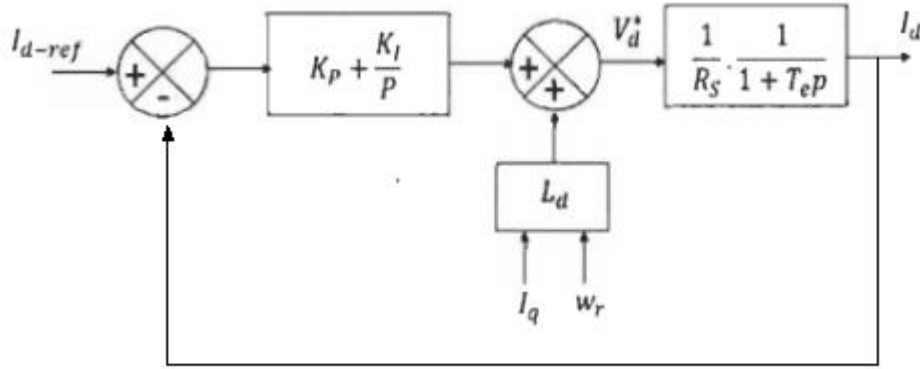


Figure III-8: Boucle de régulation du courant I_d .

Fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par:

$$G_0(p) = Kp + \frac{Ki}{p} \times \frac{1}{R_s p + L_d} \quad (III.14)$$

$$G_0(p) = Kp + \frac{Ki}{p} \times \frac{1}{R_s} \times \frac{1}{1 + \tau p} \quad (III.15)$$

Avec :

$$T_e = \frac{L_d}{R_s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée peut être écrite comme suit:

$$G_f(p) = \frac{G_0(p)}{G_0(p) + 1} \quad (III.16)$$

Utilisant la méthode de compensation des pôles en boucle ouverte, nous pouvons écrire :

$$\frac{Kp}{Ki} = \frac{L_d}{R_s} = T_e \quad (III.17)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient:

$$G_0(p) = \frac{K_i}{p \cdot R_s} \quad (III.18)$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera:

$$G_f(p) = \frac{1}{\frac{R_s}{p \cdot K_i} + 1} \quad (III.19)$$

Les coefficients K_{id} et K_p du régulateur **PI** peuvent être écrits en fonction des paramètres de la GSAP et du temps de réponse t_r du système qui nous permettront d'atteindre 95 % de la référence

$$\begin{cases} K_{id} = \frac{3 \cdot R_s}{t_r} \\ K_{pd} = \frac{3 \cdot L_d}{t_r} \end{cases} \quad (III.20)$$

Avec:

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

III.4.2.2 - Régulateur PI du courant I_q

La commande du courant I_q , est effectuée par deux boucles en cascade, la première pour avoir le couple référence C_{em-ref} généré par la régulation de l'erreur entre la vitesse référence et la vitesse mesurée directement du rotor, et la deuxième étant la régulation du courant I_{q-ref} pour avoir une tension $V_d - ref$.

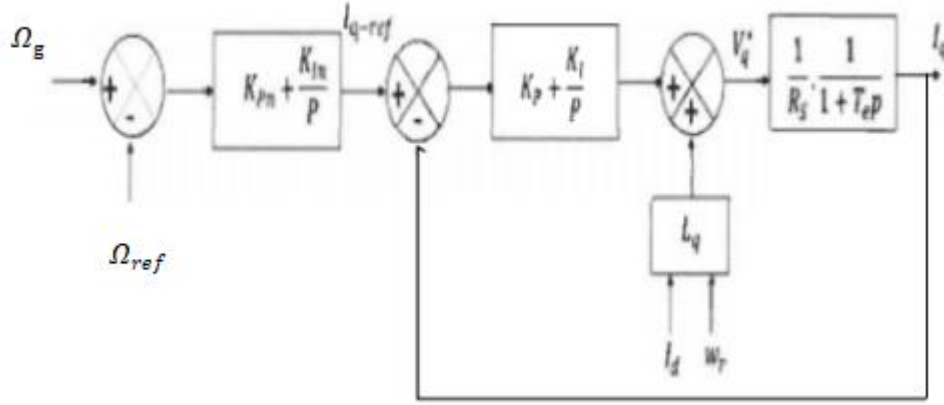


Figure III-9: Boucle de régulation du courant I_q

Selon la même méthode de calcul des paramètres du régulateur du courant I_d nous pouvons déterminer les paramètres K_{iq} et K_{pq} comme suit:

$$\begin{cases} K_{iq} = \frac{3 \cdot R_s}{t_r} \\ K_{pq} = \frac{3 \cdot L_q}{t_r} \end{cases} \quad (III.21)$$

Avec

$$t_r = \frac{3.R_s}{K_{iq}}$$

Pour tester les performances du système en boucle fermée en termes de fonctionnement en mode MPPT, nous avons appliqué une vitesse de vent sous la forme:

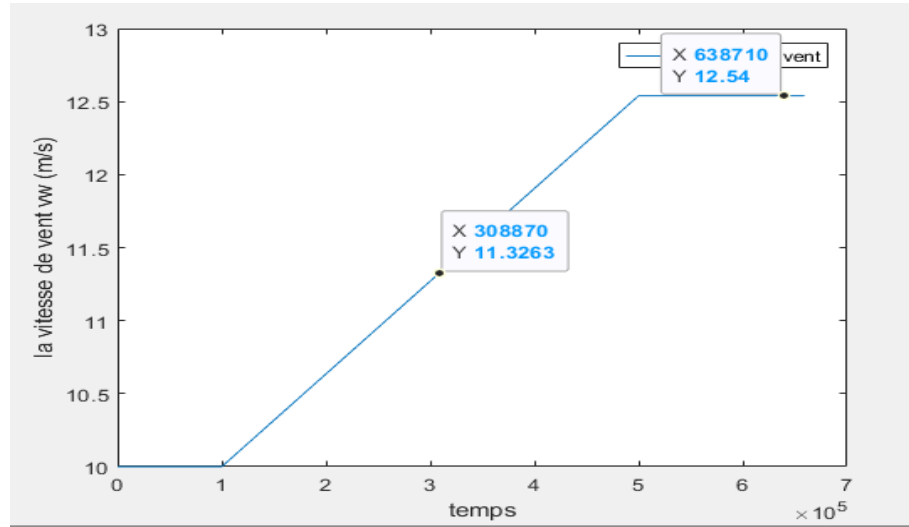


Figure III-10: Allure de la vitesse de vent

Les Figures (III (11-13)) illustrent les résultants de simulation obtenus.

D'après la Figure (III.11) la vitesse de la génératrice (Ω_g) poursuit la vitesse optimale de référence (Ω_{gref}) pour extraire le maximum de puissance et assurer le fonctionnement en mode MPPT. De plus, le coefficient de puissance C_P est resté proche de sa valeur optimale ($C_{Popt}=0.4993$) (voir figure III.12).

De même pour la vitesse spécifique qui est gardée autour de sa valeur optimale ($\lambda_{op}=6.4$) (voir figure III.13) durant tout le fonctionnement du système éolien.

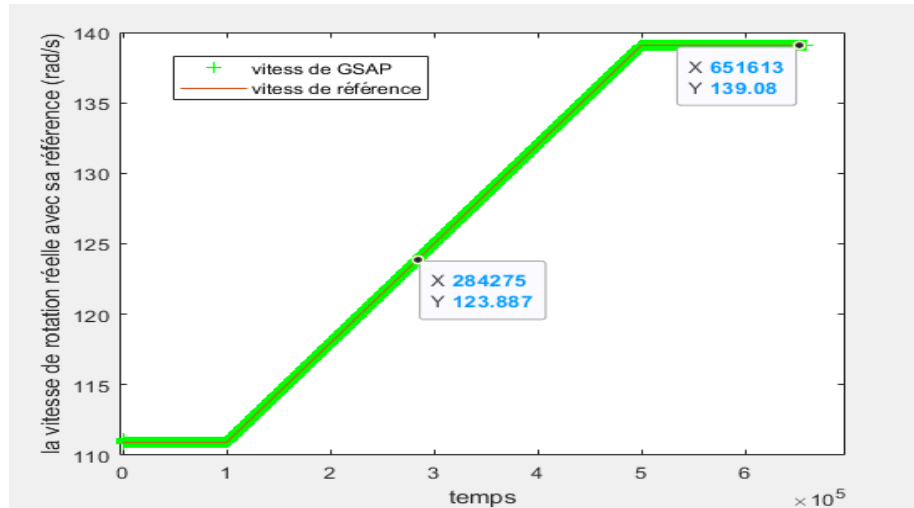


Figure III-11: Allure de la vitesse de rotation réelle avec sa référence (rad/s).

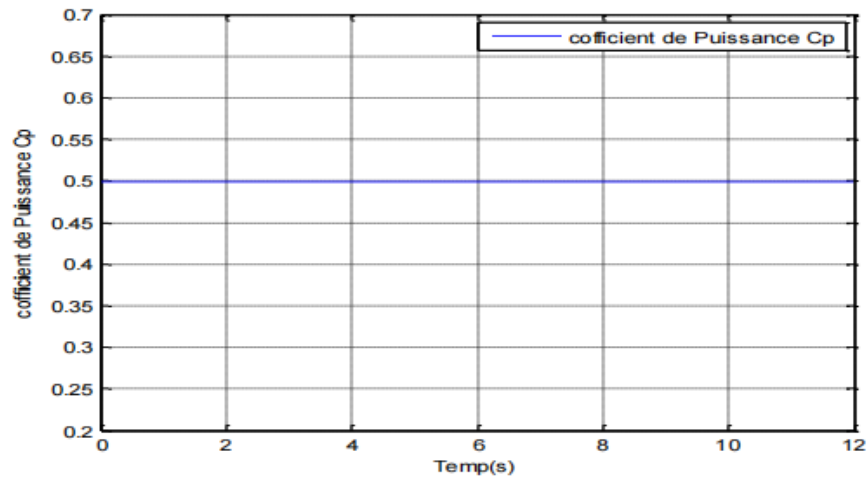


Figure III-12: Allure du coefficient de puissance (C_p).

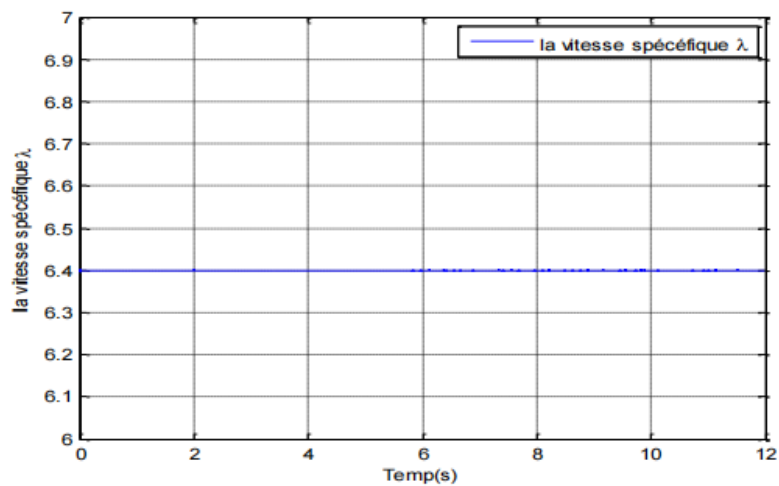


Figure III-13: Allure de la vitesse spécifique.

Les figures ci-dessous illustrent les autres résultats des grandeurs électriques pour le fonctionnement en mode MPPT.

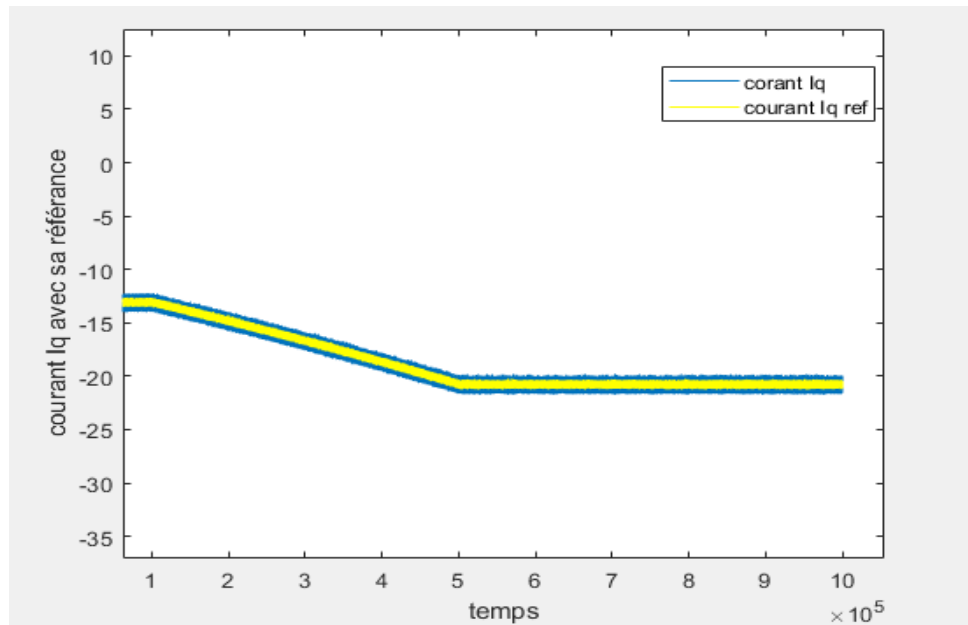


Figure III-14: Allure du courants référence i_q et sa référence (A) .

À travers la figure présentée Figure III.14), on voit que la valeur du courant i_q est négative signifiant ainsi que le couple électromagnétique est négatif et comme la vitesse de la MSAP est positive (voir figure III.11), alors la puissance électromagnétique est négative et par conséquent la MSAP fonctionne comme génératrice et véhicule la puissance active au bus continu . Par comparaison des figures III.11 et III.14, on remarque que le courant i_q augmente et diminue avec la vitesse de vent. De même, l'autre composante du courant statorique c'est à dire i_d suit aussi sa valeur de référence qui prise égale à zéro pour minimiser les pertes Jaules dans la machine d'une part et maximiser le couple électromagnétique d'autre part (voir Figure III.15).

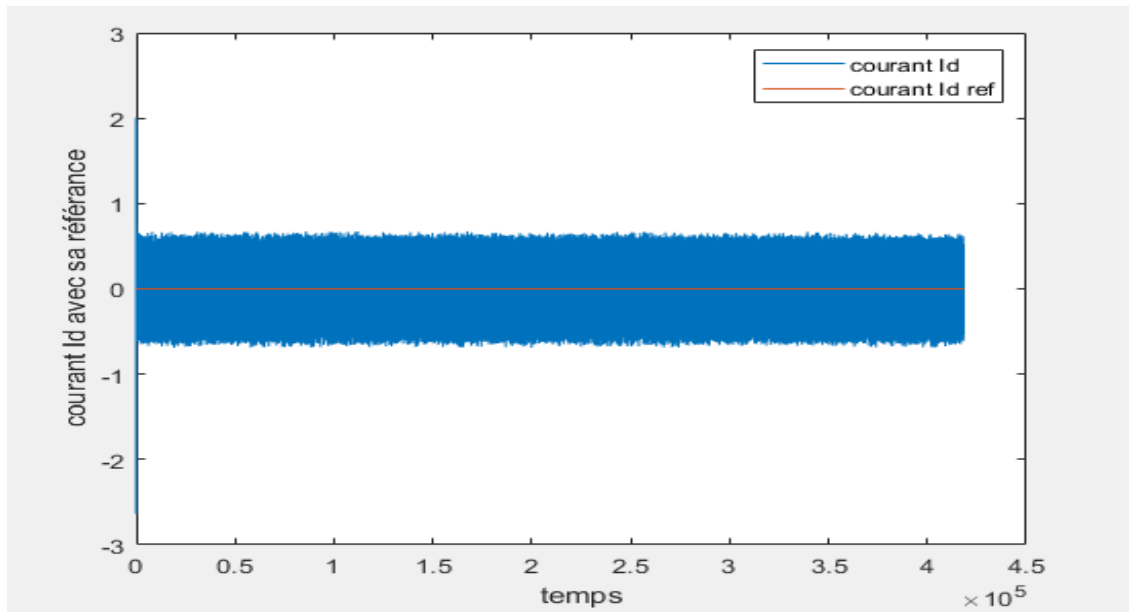


Figure III-15: Allure du courant id avec sa référence (idref)(A)

La Figure (III.16) et (III.17) présente les courants statoriques dans le repère abc . On remarque que les courants statoriques réels est augmente en fonction de la vitesse de vent

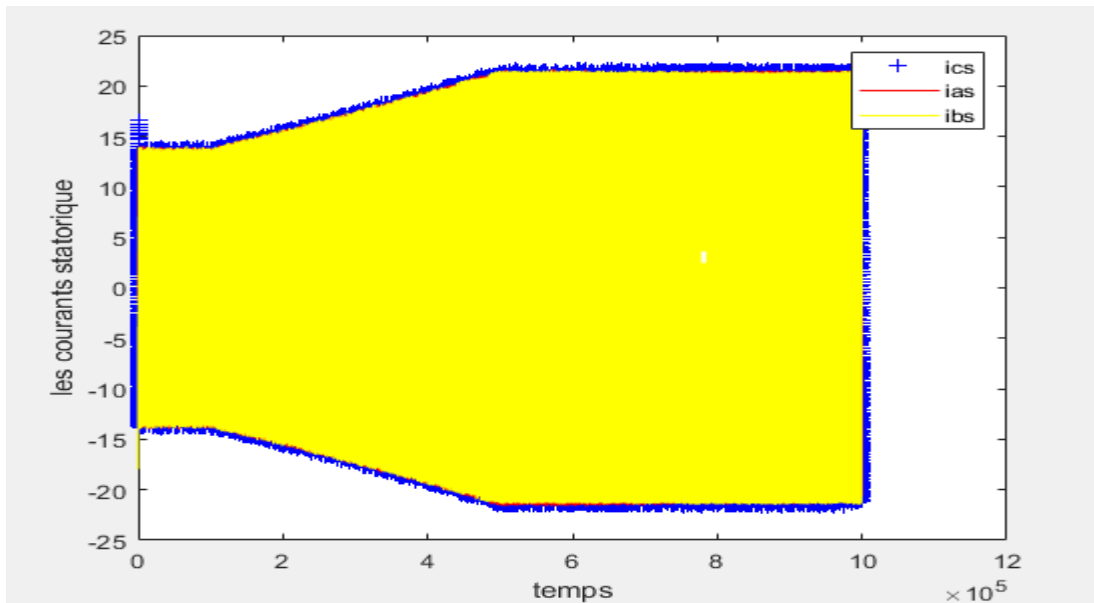


Figure III-16: Composantes réelles du courant statorique dans le repère abc.

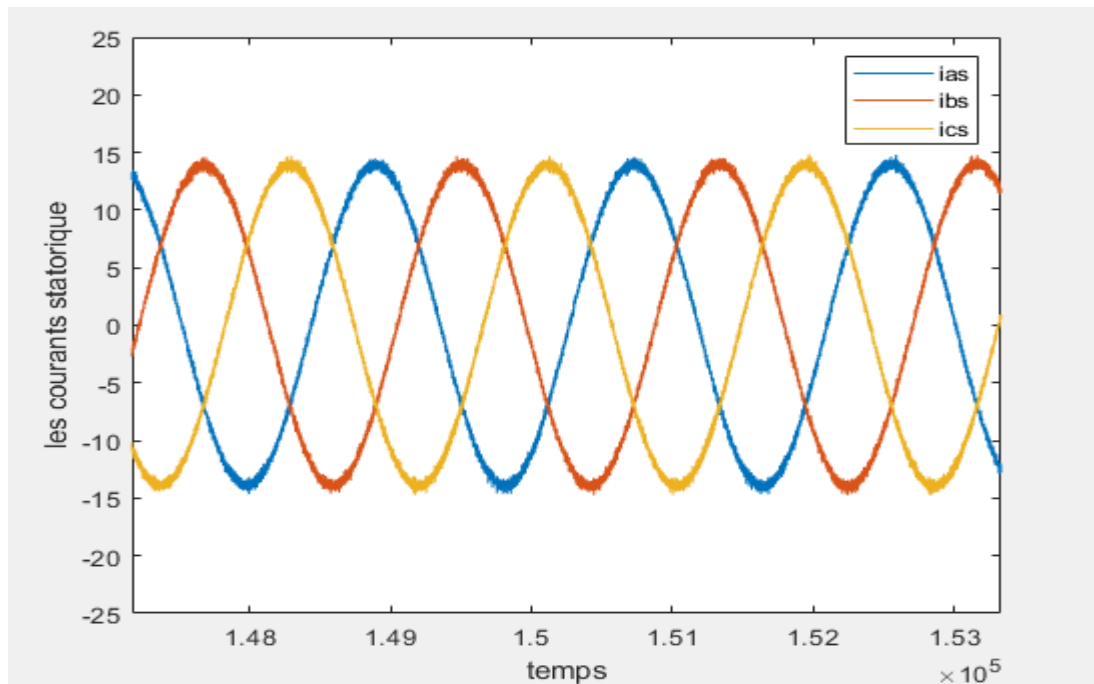


Figure III-17: Zoom des courant statoriques dans le repère abc.

III.4.3 Stratégies de commande appliquées au CCR

Ce convertisseur, modélisé auparavant, est commandée indépendamment du CCM de telle sorte que :

- La tension du bus continu soit gardée constante quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance au niveau du stator de la MSAP ;
- Une commande découplée du débit de puissance active et réactive entre le réseau et le bus continu soit assuré avec un facteur de puissance désiré.

Dans cette section , nous allons établir le schéma de commande du CCR. Pour ce faire, un régulateur PI sera synthétisé pour commander la tension du bus continu (V_{dc}) à sa valeur de référence (V_{dcref}) .

On se réfère au schéma de commande du convertisseur (CCR) (Figure III.18), les puissances active et réactive circulant dans la ligne triphasée, reliant le CCR et le réseau sont exprimées par :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2}(V_{dg}i_{dg} + V_{qg}i_{qg}) \\ Q_g = \frac{3}{2}(V_{qg}i_{dg} - V_{dg}i_{qg}) \end{cases} \quad (III.22)$$

L'orientation de la tension de réseau sur l'axe (d) du repère de Park mènera à :

$$\begin{aligned} V_{dg} &= U_s \\ V_{qg} &= 0 \end{aligned}$$

Par conséquent, les expressions donnant les puissances active et réactive (équation III.22) se simplifient et deviennent :

$$P_g = \frac{3}{2}U_s i_{dg} \quad (III.23)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2}U_s i_{qg} \quad (III.24)$$

A partir de ces dernières équations, on peut conclure que : a) La puissance active(P_g) peut être contrôlée, à sa valeur de référence(P_{gref}), en agissant sur la composante en quadrature (i_{dg}) du courant de la ligne et par conséquent la consigne de ce courant est exprimée par :

$$i_{dgref} = \frac{2}{3U_s} P_{gref} \quad (III.25)$$

la puissance réactive (Q_g) peut être régulée à sa valeur de référence (Q_{gref}) par la composante directe (i_{qg}) du courant de la ligne. D'où, on peut tirer le courant de référence par :

$$i_{qgref} = -\frac{2}{3U_s} Q_{gref} \quad (III.26)$$

D'autre part, la puissance moyenne à l'entrée de bus continu est égale à la puissance active échangée entre le CCR et le réseau aux pertes près. Par conséquent on peut écrire :

$$V_{dc}i_{red} \approx \frac{3}{2}U_s i_{dg} \approx V_{dc}i_{ond} \quad (III.27)$$

Où: i_{red} est la valeur moyenne du courant modulé du côté CCR; i_{ond} est la valeur moyenne du courant modulé du côté CCM. Par conséquent, la tension du bus continu (V_{dc}) peut être contrôlée en agissant sur la composante (i_{dg}).

Donc, on peut facilement établir le schéma de commande de ce convertisseur par un PI afin de réguler la tension du bus continu V_{dc} à sa valeur de référence ($V_{dc\text{ref}}$).

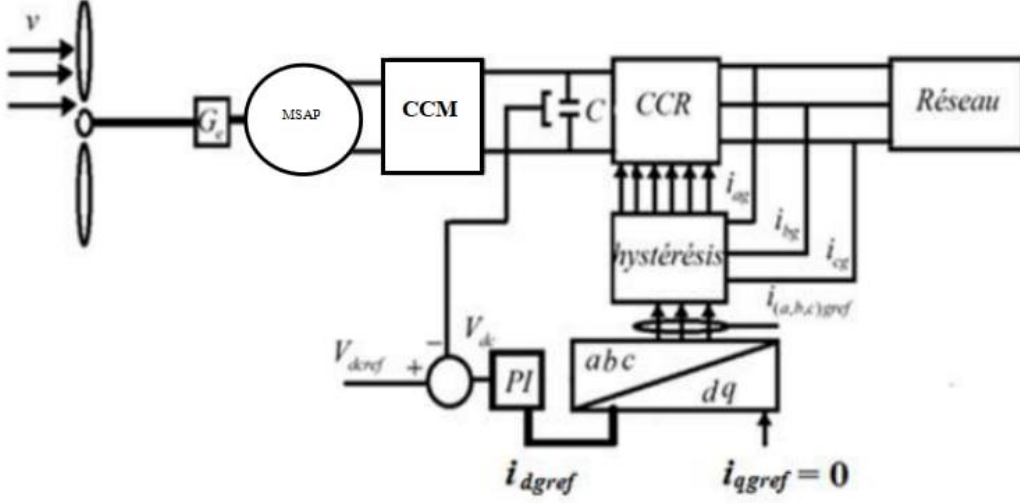


Figure III-18: Structure de la commande à hystérésis de courant du CCR.

Le schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu en utilisant un régulateur PI est illustré par la figure suivante :

III.4.4 Régulateur PI de la tension Vdc

Pour commander la tension du bus continu, plusieurs types de régulateurs peuvent être appliqués. Pour sa simplicité et son efficacité, on a choisi un régulateur PI linéaire comme le montre le schéma fonctionnement de régulation suivant:

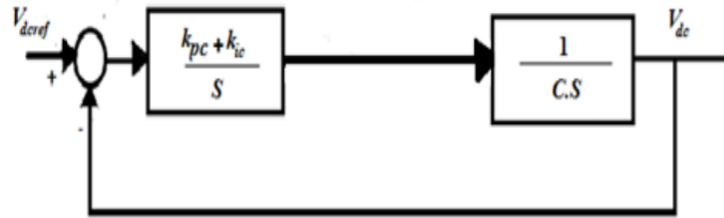


Figure III-19: Schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}).

En se basant sur un modèle de référence d'un système du deuxième ordre linéaire on peut calculer facilement les paramètres du régulateur PI de la manière suivante:

La fonction de transfert standard d'un régulateur PI est la suivante :

$$V_{dc\text{Reg}} = \frac{s.k_{pc} + k_{ic}}{s} \quad (III.28)$$

D'après la Figure (III.19), la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{oc}(s) = \left(\frac{s.k_{pc} + k_{ic}}{s} \right) \left(\frac{1}{C.s} \right) \quad (III.29)$$

Et par conséquent la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{fc}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dcref}} = \frac{s.k_{pc} + k_{ic}}{s^2 c + s k_{pc} + k_{ic}} \quad (III.30)$$

On remarque que la fonction de transfert en boucle fermée est de deuxième ordre. Son polynôme caractéristique est de la forme suivante :

$$p_1 = \frac{1}{w_0^2} s^2 + \frac{2\varepsilon}{w_0} s + 1 \quad (III.31)$$

Par comparaison de l'équation (III.31) et le dénominateur de l'équation (III.28), on trouve facilement les deux gains du régulateur PI comme suit :

$$k_{pc} = 2\varepsilon w_0 \quad \text{et} \quad k_{ic} = C w_0^2$$

L'allure de la tension du bus continu est présentée par la figure III.20 .

On remarque que la tension du bus continu (V_{dc}) est régulée à sa référence ($V_{dcref}=700$ V) grâce à la commande du CCR (Voir figure III.20).

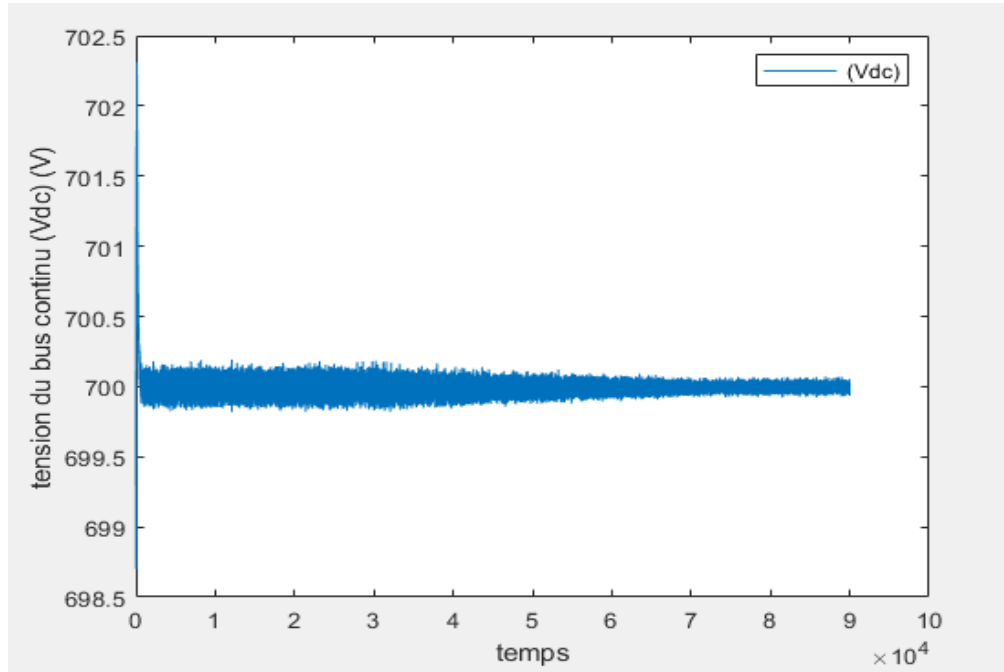


Figure III-20: Allure de la tension du bus continu (Vdc) (V)

Les courants circulant dans la ligne reliant le CCR au réseau électrique sont présentés sur la figure suivante:

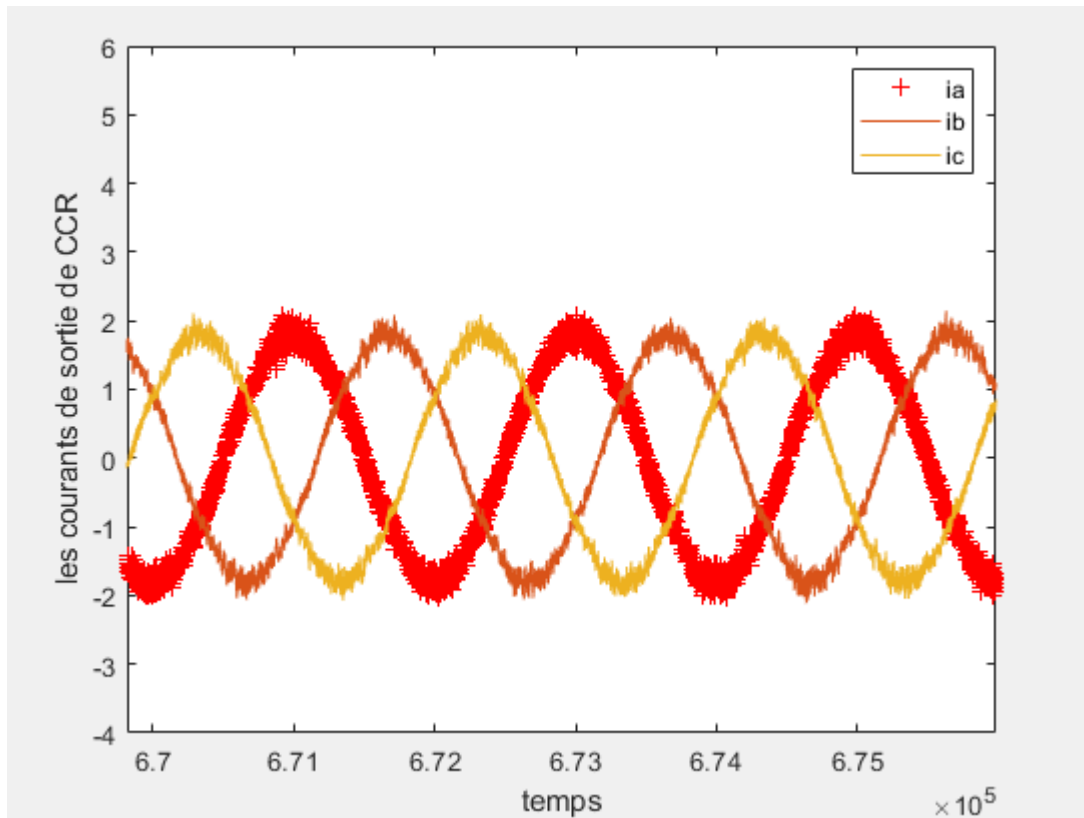


Figure III-21: Allure des courants de la ligne (i_{abc}) (A).

Le Zoom de la tension de la phase A du réseau avec son courant correspondant est présenté sur la figure suivante:

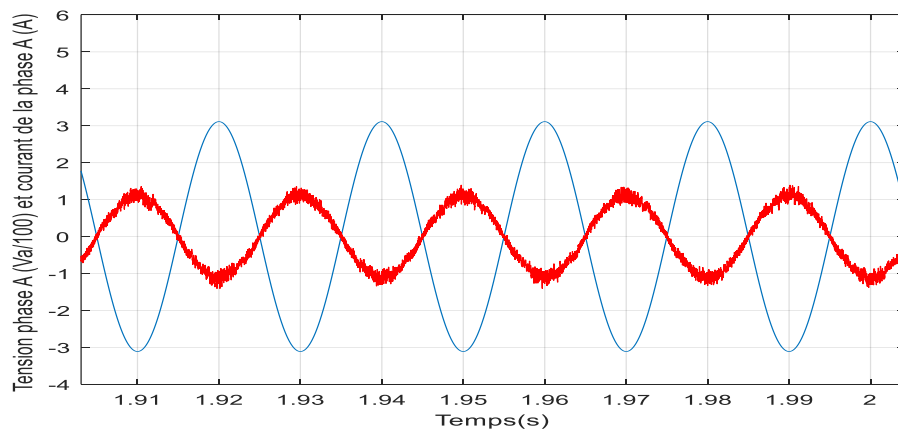


Figure III-22: Zoom de la tension de phase A ($V_{A/100}$) (V) et son courant correspondant (i_a) (A).

D'après la figure III.22, on remarque que la tension de phase et son courant correspondant sont en opposition de phase (déphasage égal à π). autrement dit, le système éolien injecte de puissance active au réseau avec un facteur de puissance unitaire.

La figure suivante illustre les puissances active et réactive injectées au réseau. D'après le résultat, on remarque que la puissance réactive est nulle et la puissance active est

négative. Autrement dit, le système éolien injecte de puissance active dans le réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire.

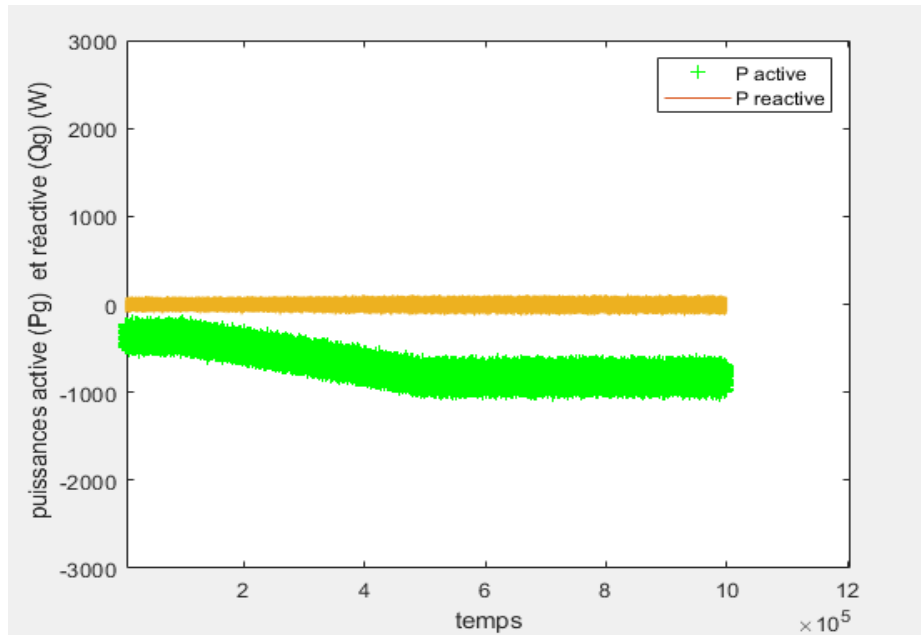


Figure III-23: Allures des puissances active (Pg) (W) et réactive (Qg) (Var)

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré principalement à la commande des convertisseurs (CCM et CCR) du système éolien pour satisfaire des performances désirées. En effet, le CCM a été commandé par deux régulateur PI simple pour assurer le fonctionnement en mode MPPT (L'un pour la vitesse et l'autre pour les courants statoriques). Des résultats de simulation satisfaisants ont été obtenus. Effectivement, la vitesse de la génératrice (MSAP) et ses courants statoriques ont suivi leurs valeurs de référence pour achever le mode de fonctionnement en MPPT. Le coefficient de puissance et la vitesse spécifique ont suivi leurs valeurs optimales.

De même pour le convertisseur du côté réseau (CCR) qui a été contrôlé par un autre régulateur PI pour assure l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}) et un régulateur à courant d'hystérésis. D'après le graphe illustrant (V_{dc}), cette dernière a été réglée convenablement à sa valeur de référence ($V_{dcref} = 700V$). Le contrôle de la tension du bus continu et la puissance réactive ont permis l'injection de la totalité de la puissance éolienne au réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce projet est l'étude et le contrôle d'un système de production d'énergie éolienne basé sur une (machine synchrone à aimants permanents). En effet, dans cette étude, une chaîne de conversion d'éolienne constituée d'une turbine associée à un alternateur dont le stator est connecté à un réseau électrique via un dispositif d'électronique de puissance a été examinée. Ce dernier est constitué de deux convertisseurs (CCM et CCR). L'objectif initial du contrôle est de capter et de transmettre le maximum de l'énergie produite par le vent au réseau via la chaîne de conversion. Cet objectif a été atteint en contrôlant le (CCM) basé sur la méthode du signal MLI et des régulateurs PI. un autre régulateur PI associé à un régulateur à hystérésis du courant ont été utilisés pour réguler la tension V_{dc} afin d'assurer le transfert de la totalité de la puissance active au réseau au pertes près et avec un facteur de puissance unitaire. Les résultats obtenus ont montré que les performances désirées ont été atteintes en boucle fermée en termes d' MPPT et le transfert de la puissance active au réseau avec facteur de puissance unitaire.

Pour une suite fructueuse à ce travail, nous avançons quelques perspectives:

- Utiliser d'autre types de régulateurs (mode glissant, flou, ...);
- Faire fonctionner le système avec un facteur de puissance différent de zéro;
- Faire participer le système éolien à la compensation des harmoniques des courants dans le réseau;
- Faire fonctionner le système en autonomie.

- [1] **LAHRECHE SAID-MOUDJAHED FAROUK**. Commande dun système éolien basé sur une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation, université de Amar Telidji Laghouat. 2017.
- [2] **Mr ADDOUR Miloud-Mr ALLOUTI Lyes**. Etude et maximisation d'un système éolien, Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa 2013.
- [3] **KERROUM AYOUB-GUEFFAF ABDELJALIL**. Commande d'un système éolien à base d'un générateur à courant continu connecté au réseau Électrique, université de Amar Telidji Laghouat. 2020
- [4] **CHEIKH RIDHA**. Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, université Mohamed khider-Biskra 2018
- [5] : **BENAKCHA Meryem**. Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE'. Université Mohamed Boudiaf-M'sila 2019
- [6] **N. Kasbadji Merzouk**. "Wind Energy Potential of Algeria". Inter. J. Renewable Energy. Vol. 21/3-4. pp. 553-562. (2000).
- [7]: **Mr BENGMAIH**. Redressement triphasé commandé_prof , [https://mcours.net/cours/pdf/scien1/Redressement triphase commande fgvrt.pdf](https://mcours.net/cours/pdf/scien1/Redressement%20triphase%20commande%20fgvrt.pdf)
- [8]: **MR KOUDAIR BOUBKER**. les onduleur autoomes ,CPGE Réda Slaoui Agadir , 2017, <https://rtc.ma/pdfs/TSI/specrs/ge/Les%20onduleurs%20autonomes.pdf>
- [9] : **ziraoui salah elddine**. Modélisation Et Étude d'Un Système d'Énergie Éolienne Relié Au Réseau, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA 2017
- [10] : **Mukund R. Patel**. Wind and Solar Power Systems Second Edition ,U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, U.S.A 200
- [11] : **CHERFIA NAÏM**. "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens", Université Mentouri Constantine Algérie. pp 9-10. (2010)

[12] : **METATLA SAMIR.** "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA " mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger.(2009).

[13] : **A. Ferroudj.** "Commande Non Linéaire De La MSAP Sans Capteur De Vitesse. Apporte Des Méthode De l'Intelligence Artificielle " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2011.

Paramètre du système éolien étudié :

Paramètre	Valeur
Tension nominale	$V_s = 220 \text{ v}$
Résistance statorique	$R_s = 1.4 \Omega$
Rayon	$R = 1.05 \text{ m}$
Nombre de paires de poles	$p = 3$
Coefficient de frottement visqueux	$f_r = 0.00038818 \text{ N.m.s/rad}$
Puissance nominale	$P_n = 1.5 \text{ kw}$
Courant nominale	$I_n = 30 \text{ A}$
Masse volumique de l'air	$\rho = 1.225$
Inductance statorique directe	$L_d = \mathbf{0.0066 \text{ mh}}$
Inductance statorique quadratique	$L_q = \mathbf{0.0058 \text{ mh}}$
Flux des aimants	$\varphi_f = 0.12 \text{ wb}$
Moment d'inertie du générateur	$J_{mach} = 11.10^{-5} \text{ N.m.s}^2/\text{rad}$
Fréquence	$f = 50 \text{ hz}$