

7/62.1.908

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Protection et Contrôle des Réseaux
Electriques

Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Contrôle d'une chaine de conversion éolienne à base d'une
génératrice synchrone à aimants permanents

Présenté par :
- HAMMOUD Khaled
- LARRIBI, ABD el Madjid

Sous la direction de : M. MENDACI Sofiane

Jun 2016

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir armé de courage et de patience pour entamer ce travail et l'achever.

J'ai l'honneur et le plaisir de présenter ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de recherche Monsieur « MENDACI SOFIAN », sa disponibilité et l'attention qu'il a consacré à ce travail, je suis extrêmement fière d'avoir travaillé avec lui.

Mes remerciements les plus sincères et les plus profondes vont également aux membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer mon travail.

Un grand remerciement va à tous les enseignants qui m'ont suivie durant ma formation primaire jusqu'à cycle universitaire à tous ceux qui m'ont aidé à cueillir le savoir.

Un très grand merci à tous.

Dédicace

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

A mon cher père qui Que dieu les garde et les protège

*A toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de
loin à la réalisation de ce travail et surtout rim*

Sommaire

Introduction général..... 1

Chapitre I : Chaines de conversion utilisées dans les éoliennes.....3

1. Introduction	3
2. Généralités sur les éoliennes	3
2.1 Fonctionnement de l'éolienne.....	5
2.2 Les différents types d'éoliennes.....	5
2.2.1 Classement des Turbines Eoliennes	5
2.2.1.a) Les éoliennes à axe horizontal.....	5
2.2.1.b) Les éoliennes à axe vertical.....	6
2.3 La structure des éoliennes.....	8
2.3.a) Les fondations	9
2.3.b) Le mât.....	9
2.3.c) La nacelle.....	9
2.3.d) Le rotor	9
2.3.e) Le dispositif d'orientation	10
2.3.f) Le système de freinage.....	10
2.3.g) L'arbre principal (ou axe principal)	10
2.3.h) la génératrice	10
3. Généralités sur les chaines de conversion	11
3.1 Génératrice asynchrone	11
3.1.a) Avantages	12
3.1.b) Inconvénients.....	12

3.2 Génératrice asynchrone à double alimentation.....	12
3.2.a) Modes de fonctionnement	13
3.2.b) Avantages de la MADA	13
3.3 Génératrice synchrone	14
3.3.a) Génératrice Synchrone à Rotor Bobiné (WRSG).....	14
3.3.b) Génératrice à aimants permanents	15
3.3.c) Avantages	15
3.3.d) Inconvénients	16
4. Chaines de conversion pour le petit éolien utilisant la MSAP	16
4.1 Chaîne de conversion éolienne avec redresseur à diodes et onduleur ...	16
4.2 Chaîne de conversion avec redresseur à diode, Hacheur et onduleur ...	17
4.3 Chaîne de conversion avec redresseur MLI et un onduleur	17
4.4 Chaîne de conversion avec deux convertisseurs à 4 interrupteurs	18
4.5 Chaîne de conversion éolienne avec convertisseur matriciel.....	19
4.6 Chaîne de conversion éolienne avec chargeur de batteries	19
5. Conclusion	20

Chapitre II : Modélisation d'une chaîne de conversion à base d'une MSAP.....21

1. Introduction.....	21
2. Présentation et modélisation d'une chaîne de conversion à base d'une MSAP	21
2.1 Présentation de la chaîne	21
2.2 Modélisation de la turbine éolienne	22
2.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	24
2.3.1 Hypothèses simplificatrices	24
2.3.2 Equations de tensions et flux	25

2.3.3 Modèle de Park de la Machine synchrone à aimants permanents	26
2.3.3.a) Application aux équations des tensions.....	28
2.3.3.b) Expression du couple électromagnétique.....	28
2.3.4 Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP	29
2.3.5 Simulation de la GSAP	30
2.3.5.a) À vide	30
2.3.5.b) GSAP avec une charge triphasée	31
2.4 Modélisation du redresseur à commande MLI	32
2.5 Modélisation du filtre et de la charge de la partie continue	33
3. Conclusion	34

Chapitre III : Commande de la chaîne de conversion éolienne.....35

1. Introduction.....	35
2. Stratégies de commande de la turbine éolienne	35
3. Méthodes de recherche du point maximum de puissance	37
3.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne	38
3.1.a) Présentation de MPPT avec asservissement de vitesse.....	38
3.1.b) Résultats de simulation	39
4. Contrôle du couple de la GSAP par la commande vectorielle	42
5. Conclusion	46
Conclusion générale	47
Bibliographie	
Annexe	

LA LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Chaines de conversion utilisées dans Les éoliennes

- **Figure I.1** : Production mondiale de l'énergie éolienne entre 2004 et 2014
- **Figure I.2** : Top 10 des pays utilisant l'énergie éolienne en 2013
- **Figure I.3** : Top 10 des pays en termes de nouvelles capacités installées en 2013
- **Figure I.4** : Eoliennes à axe horizontal
- **Figure I.5** : Eoliennes à axe vertical
- **Figure I.6** : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus
- **Figure I.7** : structure d'une éolienne à axe horizontal
- **Figure I.8** : chaîne de conversion utilisant une MAS
- **Figure I.9** : chaîne de conversion utilisant une machine asynchrone à double alimentation milieu urbain
- **Figure I.10** : a) Mode hypersynchrone b) Mode hyposynchrone
- **Figure I.11** : Chaîne de conversion utilisant une machine synchrone à rotor bobiné.
- **Figure I.12** : Chaîne utilisant un redresseur à diode, un condensateur et un onduleur.
- **Figure I.13** : Chaîne utilisant un redresseur à diode, un hacheur et un onduleur.
- **Figure I.14** : Chaîne utilisant un redresseur à thyristor et un onduleur.

- **Figure I.15** : Chaîne utilisant deux convertisseurs de puissance à 4 interrupteurs.
- **Figure I.16** : Chaîne utilisant un convertisseur matriciel.
- **Figure I.17** : Chaîne utilisant un sous-système de stockage.

➤ **Chapitre II : Modélisation d'une chaîne de conversion à base d'une MSAP.**

- **Figure II.1** : chaîne de conversion étudiée
- **Figure II.2** : variation de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine et du vent
- **Figure II.3** : Transformation de Park
- **Figure II.4** : schéma bloc de la GSAP sous Simulink
- **Figure II.4** : résultats de simulation sous Simulink de la GSAP à vide
- **Figure II.5** : résultats de simulation sous Simulink de la GSAP à vide
- **Figure II.6** : résultats de simulation sous Simulink de GSAP en charge
- **Figure II.7** : structure du redresseur à commande MLI relié à la GSAP

➤ **Chapitre III : Commande de la chaîne de conversion éolienne**

- **Figure III.1** : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent
- **Figure III.2** : Limitation de puissance éolienne a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse de rotation variable

- **Figure III. 3** : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse rotation
- **Figure III.4** : schéma bloc pour simuler la MPPT avec asservissement de vitesse
- **Figure III. 5** : schéma bloc de la turbine et de la partie mécanique
- **Figure III. 6** : évolution de la vitesse du vent
- **Figure III. 7** : évolution des vitesses pour un correcteur PI
- **Figure III.8** : évolution de la puissance mécanique fournie par la turbine (cas PI)
- **Figure III.9** : structure du correcteur IP utilisé
- **Figure III.10** : évolution des vitesses pour un correcteur IP
- **Figure III.11** : évolution de la puissance mécanique fournie par la turbine (cas IP)
- **Figure III.12** : structure globale de contrôle de la GSAP
- **Figure III. 13** : modèle du redresseur et sa commande MLI à hystérésis
- **Figure III.14** : schéma bloc Simulink de la commande vectorielle de la GSAP
- **Figure III.15** : évolution de la vitesse de la turbine par rapport à sa référence
- **Figure II.16** : évolution du couple de la GSAP et sa référence
- **Figure II.17** : évolution de la puissance mécanique de la turbine
- **Figure II.18** :

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles. Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire [1].

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leur est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires.

L'option du recours aux énergies renouvelables a pris aussi un essor certain en Algérie, elle reste à être matérialisée par des projets importants et concrets.

C'est dans ce contexte général que vient s'inscrire notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement actuellement qui est l'énergie éolienne. En effet, notre objectif est de faire une étude via la modélisation et la simulation sous MATLAB/SIMULINK d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Pour mener à bien cette étude, nous avons adopté le plan suivant :

Dans le premier chapitre, nous commençons par une présentation rapide des éoliennes les plus utilisées ainsi que leur structure. Ensuite, nous terminerons ce chapitre par une présentation non exhaustive des différentes chaînes de conversion utilisées dans les éoliennes de grandes et de petites puissances. L'accent sera mis sur les chaînes utilisant la génératrice synchrone à aimants permanents.

Le second chapitre est consacré à la modélisation mathématique de tous les composants de la chaîne de conversion, à savoir : la turbine, la GSAP, le redresseur à commande MLI et la charge du côté continu.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter au début les stratégies de commande des éoliennes et une technique de commande MPPT « Maximum Power Point

Tracking » qui permet d'assurer une exploitation optimale de l'énergie du vent disponible. Des résultats de simulation seront présentés pour montrer l'efficacité de la MPPT proposée. Ce chapitre sera terminé par une présentation, à travers un exemple de simulation, de la commande vectorielle de la GSAP qui permet de contrôler le couple électromagnétique développé par la génératrice, ce qui permet ensuite de régler la vitesse de l'éolienne pour assurer l'extraction de la puissance maximale.

Ce travail sera terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I :

Chaines de conversion utilisées dans les éoliennes

1. Introduction

A côté des grandes centrales éoliennes terrestres et de parcs éoliens offshore, les fermes éoliennes de proximité, de faible puissance et moyenne puissance, isolées ou non, constituent une voie à ne pas négliger pour le développement de l'énergie éolienne. A l'inverse des éoliennes de fortes puissances qui utilisent généralement les génératrices asynchrones à double alimentation GADA, les éoliennes de petites et moyennes puissances utilisent le plus souvent des génératrices synchrones à aimant permanent [1].

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation rapide des éoliennes les plus utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ensuite, nous terminerons ce chapitre par une présentation non exhaustive des différentes chaines de conversion utilisées dans les éoliennes de grandes et de petites puissances.

2. Généralités sur les éoliennes

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement.

Exploitée depuis l'antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient un taux de croissance de 30% par an depuis une dizaine d'années. Selon le dernier rapport annuel du GWEC (The Global Wind Energy Council) [2,3], la capacité éolienne mondiale est de 370 Giga Watts (GW) fin 2014, sept ans après avoir passé les 100 GW. En dix ans, la capacité de production a été presque multipliée par 8 (48 GW en 2004 contre 370 GW en 2014), figure I.1.

Wind Power Global Capacity, 2004–2014



REN21 *Renewables 2015 Global Status Report*



Figure I.1 : Production mondiale de l'énergie éolienne entre 2004 et 2014

L'Europe cumule plus d'un tiers de cette capacité, figure I.2, mais c'est la Chine qui est le pays le plus dynamique (91,4 GW) de capacité installée, en 1ère place, devant les USA (61,1 GW), l'Allemagne (34,2 GW), l'Espagne (23,0 GW), l'Inde (20,1 GW), la Grande-Bretagne (10,5 GW), l'Italie (8,6 GW) et la France (8,3 GW) qui est sortie du top 10 mondial des nouvelles productions installées en 2013, figure I.3, tout comme l'Espagne [2].

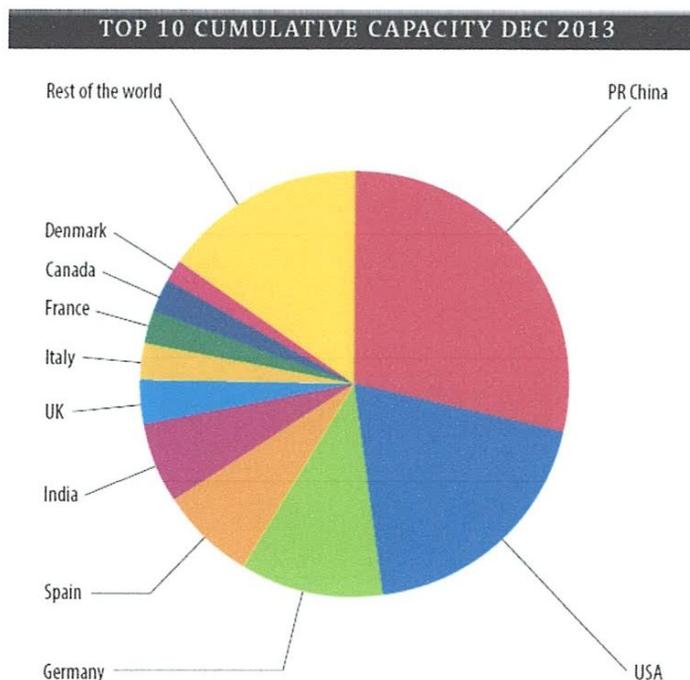


Figure I.2 : Top 10 des pays utilisant l'énergie éolienne fin 2013, [2]

TOP 10 NEW INSTALLED CAPACITY JAN-DEC 2013

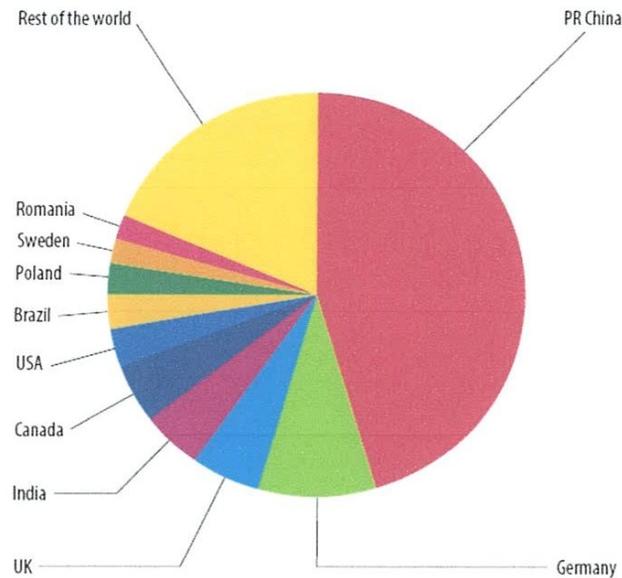


Figure I.3 : Top 10 des pays en termes de nouvelles capacités installées en 2013, [2]

2.1 Fonctionnement de l'éolienne :

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est similaire à celui d'un moulin à vent. Le vent fait tourner les pales reliées à un axe. A l'aide d'un système de multiplication, il entraîne le rotor d'une génératrice qui produit de l'électricité. Ce rotor est semblable à la dynamo qui, entraînée par la roue d'un vélo, alimente son phare, [1, 4, 5].

2.2 Les différents types d'éoliennes :

2.2.1 Classement des Turbines Eoliennes :

Après ses premières utilisations à l'époque de la Perse Antique, la technologie qui permet de profiter de l'énergie du vent a évolué sous diverses formes et types de machines.

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical, [1, 4, 5].

a. Les éoliennes à axe horizontal :

Pourvues de deux, trois pales ou plus, les éoliennes à axe horizontal sont les éoliennes les plus utilisées pour la production d'électricité en sites isolés ou pour alimenter le réseau électrique.

En forme d'hélice, elle utilise, comme les avions pour voler, la force de portance du vent. La hauteur de la nacelle permet de profiter de vents plus forts et plus constants.

Les turbines à trois pales sont pratiquement les plus utilisées pour les fortes et moyennes puissances à vitesse du vent élevée, par contre les multi-pales, sont bien adaptées aux vents de faible vitesse (entre 3 et 7 m/s), et servent surtout pour fournir de l'énergie mécanique et alimenter des machines relativement lentes. Aujourd'hui, on les utilise pour le pompage, figure I.4.



Figure I.4 : éoliennes à axe horizontal

Les modèles puissants sont dotés d'une hélice à pas variable, qui permet d'incliner les pales en fonction du vent. Elles conservent ainsi en toute occasion un rendement élevé. On peut aussi, sur certains modèles, orienter le rotor grâce à un moteur électrique. Ainsi, si le vent a tourné, on peut changer l'orientation de l'hélice. Généralement, ce système d'orientation par moteur électrique est réservé aux éoliennes de grandes et moyennes puissances.

b. Les éoliennes à axe vertical :

Ces éoliennes à axe vertical ont été conçues pour répondre au mieux aux contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Grâce à leur design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins soumises à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer à l'architecture des bâtiments.

Leur faiblesse réside principalement dans leur faible rendement et dans la faible maturité du marché qui engendre alors des coûts d'investissement importants. En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible mais s'adapte bien aux besoins des consommateurs individuels.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables. On les doit aux inventeurs **Savonius** et **Darrieus**.

L'éolienne **Savonius** comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre, figure I.5. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français **Darrius** est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs, figures I.5. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et quelle que soit leur direction.

Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile, en effet le poids du rotor pèse sur son socle, générant des frottements. On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor cylindrique - deux profils disposés de part et d'autre de l'axe - jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical, figure I.6.

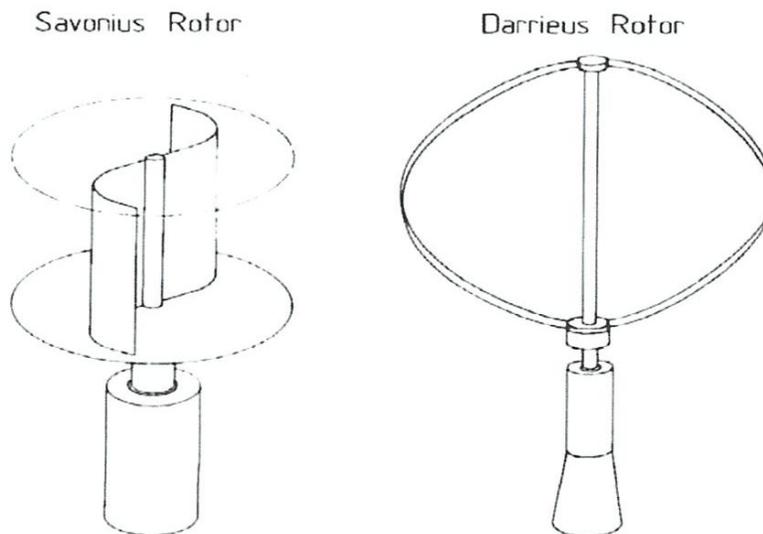


Figure I.5 : éoliennes à axe vertical

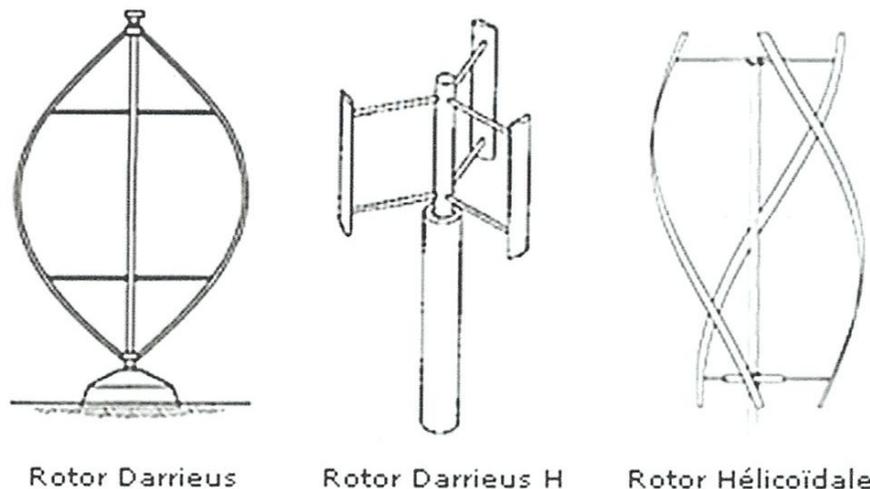


Figure I.6 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrius

Malgré le fait que la technologie n'est pas encore mûre, les éoliennes à axe vertical font l'objet d'intenses recherches, et de nombreux nouveaux modèles apparaissent régulièrement sur le marché. Celles-ci présentent en effet plusieurs atouts :

- Elles sont généralement moins bruyantes que les éoliennes à axe horizontal. Elles supportent des vents plus forts (jusqu'à 40m/s).
- Elles captent les vents de toutes directions, notamment les vents turbulents, étant ainsi plus appropriés en milieu urbain.
- Elles sont souvent jugées plus esthétiques et entraînent dès lors un impact visuel moindre.

2.3 La structure des éoliennes :

Dans cette présentation rapide de la structure de l'éolienne, nous nous basons sur la structure à axe horizontale qui est la plus utilisée, [1,4,5].

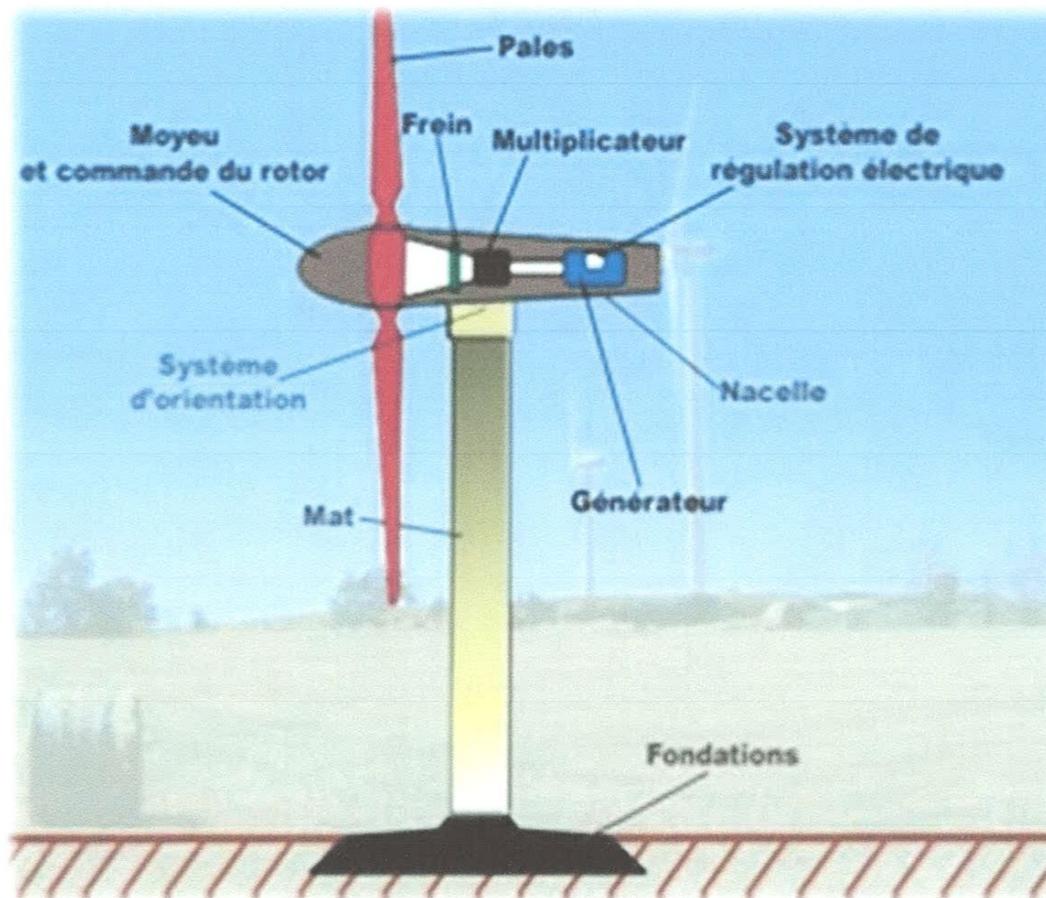


Figure I.7 : structure d'une éolienne à axe horizontal

La figure I.7, présente les différentes parties de l'éolien, on distingue :

a. les fondations :

Composées d'épais blocs de béton armé (béton renforcé par une structure métallique).

b. Le mât :

Il est composé généralement de trois parties (permettant un transport plus simple pour les grandes éoliennes) et il se fixe sur la partie supérieure des fondations prévues à cet effet. Il doit être conçu pour supporter le poids de l'éolienne et les forces du vent.

c. la nacelle :

La nacelle vient se placer sur le mât, elle contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle.

A l'intérieur, se trouvent :

- La boîte de vitesse.
- La génératrice.
- Les systèmes de contrôles.
- Le capteur de température (huile de la boîte de vitesse afin de distinguer une usure prématurée).
- Le capteur de vibration et le capteur de vitesse (une éolienne commence à tourner à partir de 20 km/h « 5 m/s », est à sa pleine puissance à 60 km/h « 16 m/s », et les pales arrêtent de tourner lorsque le vent dépasse 90 km/h « 25 m/s »).

d. Le rotor :

Il est constitué des pales et du nez (ou moyeu), ainsi que les nombreux dispositifs de commande situés dans le nez.

De nombreuses études en souffleries ont été réalisées afin de déterminer le nombre optimal de pales pour le fonctionnement de l'éolienne. On a démontré que :

- Moins les pales sont nombreuses, plus l'éolienne met du temps pour démarrer et inversement.
- De plus, lorsque l'éolienne a deux pales, les vibrations sont très fortes et rendent ainsi l'éolienne fragile. Lorsqu'elle en possède plus de trois, les pales sont perturbées par l'air déplacé par la pale précédente. Le rendement s'en trouve ainsi réduit.

Ainsi le nombre optimal de pales pour le fonctionnement d'une éolienne est de trois. Les pales sont torsadées afin d'offrir plus de surface au vent et peuvent aussi s'orienter.

L'ensemble des éléments du rotor qui est reliée au multiplicateur par l'arbre principal est toujours orientée de façon à être face au vent grâce à la girouette et à l'anémomètre.

e. Le dispositif d'orientation :

Le dispositif d'orientation de l'éolienne est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la **girouette (direction du vent)** et l'**anémomètre (vitesse du vent)**. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne.

f. Le système de freinage :

Un système de freinage est très important dans une éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les ingénieurs lors des débuts des éoliennes.

Pour des vents trop forts le générateur « s'emballe » et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassant les 90 km/h il permet alors d'empêcher le rotor de tourner.

g. L'arbre principal (ou axe principal) :

Cet axe est directement entraîné par le rotor (principalement par les pales), il tourne à basse vitesse mais avec beaucoup de force (couple fort). Il est relié ensuite à un multiplicateur. L'arbre rapide en sortie du multiplicateur est relié à la génératrice. Sa rotation est donc beaucoup plus rapide (environ 1500 tr/min), mais sa force est bien plus faible.

h. La génératrice :

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites (< 100 kW) et moyennes (entre 100 et 250 kW) puissances, la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 10 MW environ, le générateur asynchrone à double alimentation est plus courant et économique.

3. Généralités sur les chaînes de conversion

Les structures des chaînes de conversion utilisées dans les éoliennes sont liées au type de la génératrice utilisée. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites et moyennes puissances, la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, le générateur asynchrone est plus courant.

Pour cette raison, nous présenterons dans cette partie les machines électriques et les chaînes de conversions qui leur conviennent, [1,4,5,6,7].

3.1 Génératrice asynchrone :

La Machine Asynchrone (MAS) est utilisée dans la plupart des cas, car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales.

La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateurs pour la fourniture d'énergie réactive. La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide), figure I.8.

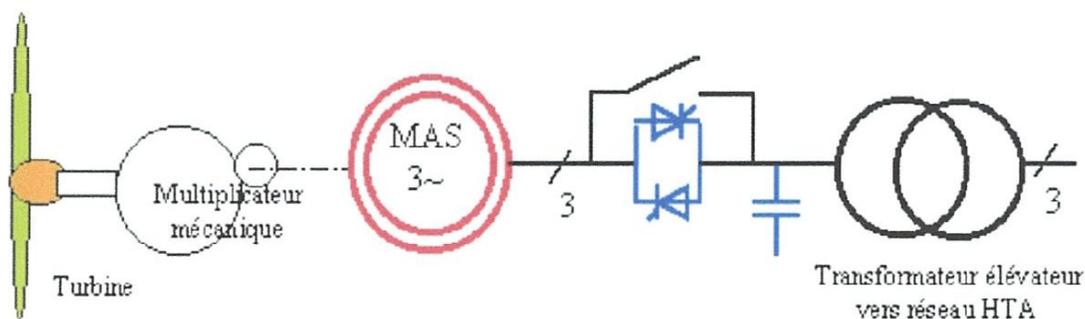


Figure I.8 chaîne de conversion utilisant une MAS

Cette chaîne cinétique implique des forces de frottements qui empêchent la rotation du rotor pour des vents faibles, il faut donc vaincre ces forces d'inertie au démarrage grâce à un coup de vent plus important.

La génératrice asynchrone peut être :

- A **rotor bobiné ou à bagues**. Les enroulements du rotor couplés en étoile sont reliés à un système de bagues/balais permettant ainsi l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor.
- A **cage d'écureuil**. Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements rotoriques ne sont alors pas accessibles.

On peut reconnaître une éolienne utilisant une génératrice asynchrone par la forme allongée de la nacelle, qui abrite la chaîne cinétique.

a. Avantages :

- système simple et utilisé depuis longtemps
- économiquement plus intéressant.

b. Inconvénients :

- pertes d'énergie dues au multiplicateur
- vibrations et bruit plus importants
- usure des pièces plus importante (maintenance plus importante)
- fuite d'huile du multiplicateur
- risque d'incendie plus élevé
- l'énergie électrique produite est de moindre qualité et entraîne des perturbations sur le réseau.

3.2 Génératrice asynchrone à double alimentation :

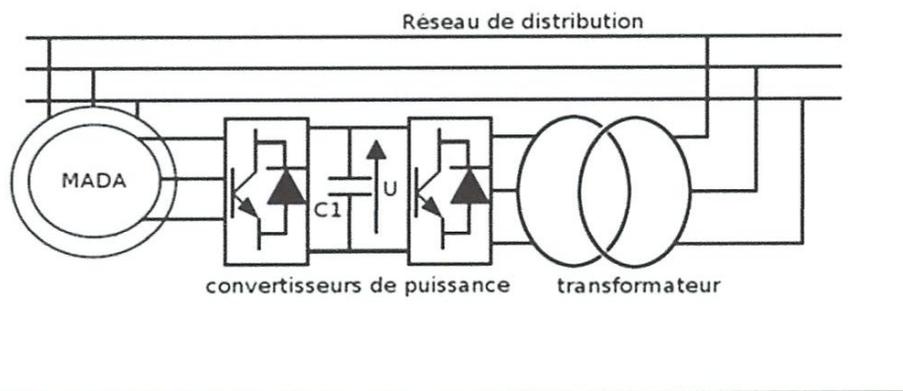


Figure I.9 chaîne de conversion utilisant une machine asynchrone à double alimentation

La MADA est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé de distribution alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant, figure I.9 : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le mode de fonctionnement. Le condensateur C1 entre les deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [6,7].

a. Modes de fonctionnement :

Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent, en effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice **hyposynchrone** (vitesse de rotation inférieur à la vitesse de synchronisme) et **hypersynchrone** (vitesse de rotation supérieure à la vitesse de synchronisme). On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. La vitesse variable permet à l'éolienne de fonctionner sur une plus large plage de vitesses de vent et de pouvoir tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent.

A la différence de certaines machines synchrones ou asynchrones, qui utilisent des convertisseurs traversés par la totalité de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent donc moins chers, sont moins encombrants et permettent également de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. Le module qui alimente le rotor est réversible en courant (P_r traverse le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hypersynchrone, et dans le sens opposé pour un fonctionnement hyposynchrone).



Figure I.10 a) Mode hypersynchrone

b) Mode hyposynchrone

b. Avantages de la MADA :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.

- elle peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- elle est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau.
- fonctionnement à vitesse variable sur une large plage.
- transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- le convertisseur rotorique est de plus faible puissance.

c. Inconvénients :

- Présence obligatoire de bagues et balais qui augmentent le poids et le volume de la nacelle.
- Problème d'usure et de maintenance des systèmes bagues balais.

3.3 Génératrice synchrone :

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, *sans utiliser de multiplicateur*. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure.

Le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. Cette technologie est privilégiée dans le cas des éoliennes offshore car la maintenance est réduite par rapport à une technologie utilisant une boîte de vitesse.

a. Génératrice Synchrone à Rotor Bobiné (WRSG) :

La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système, figure I.11.

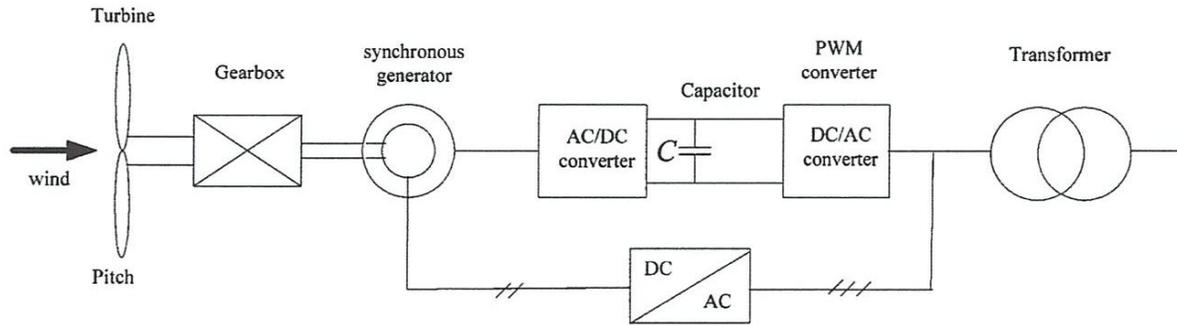


Figure I.11 Chaîne de conversion utilisant une machine synchrone à rotor bobiné.

b. Génératrice à aimants permanents :

Le rotor est constitué d'aimants permanents ou **MSAP** (générant donc un champ constant), dans ce cas la tension délivrée par la machine n'est pas réglable (si on ne tient pas compte des pertes dans les conducteurs). Les alternateurs à aimants permanents produisent un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation donc à la vitesse du vent. La source d'excitation du rotor est indépendante du réseau contrairement à la machine synchrone à électroaimant. Ce type de machine tend à être de plus en plus utilisé par les constructeurs d'éoliennes car elle peut fonctionner en mode autonome et sont beaucoup plus légères que les autres types de générateurs. *Ce type de génératrice est très fréquemment utilisé dans le petit éolien.*

Les génératrices à aimants permanents ont l'inconvénient de toujours produire la même densité de flux magnétique quel que soit la vitesse de rotation du rotor. Le rotor est donc difficile à démarrer car la résistance au mouvement est importante (couple de détente), son démarrage nécessite un vent relativement important. La construction de ces aimants est particulièrement gourmande en terres rares (lanthanides) notamment ceux à base de néodyme peuvent nécessiter jusqu'à 600 kg pour une éolienne de 3,5 mégawatts [1, 4, 5].

c. Avantages :

- Gain important en poids (pas de multiplicateur)
- Réduction du nombre de pièces en rotation
 - moins de bruit
 - réduction de la charge
 - augmentation de la durée de vie de la machine
 - diminution de la maintenance
- coûts de maintenance relativement faibles

- les aimants étaient beaucoup moins chers que les bobinages de cuivre, mais le prix des aimants a récemment explosé !
- bon rendement

d. Inconvénients:

- Nécessite une conversion électrique afin de garder une fréquence constante (Courant alternatif → Courant continu → Courant alternatif)
- La construction de la génératrice requière des aimants permanents particulièrement gourmands en terres rares (lanthanides)

4. Chaines de conversion pour le petit éolien utilisant la MSAP

Dans ce qui suit, nous présentons différentes chaines de conversions adaptées pour les génératrices synchrones à aimants permanents (MSAP).

4.1 Chaîne de conversion éolienne avec redresseur à diodes et onduleur

La Figure I.12 montre une chaîne de conversion électromécanique de l'énergie éolienne, utilisant un redresseur à diodes et un onduleur. Cette chaîne est très utilisée à cause de sa simplicité, sa fiabilité et de son coût. La commande de la puissance au niveau de l'onduleur se fait par le contrôle de l'amplitude et la fréquence fondamentale du courant et du déphasage entre le courant et la tension. L'inconvénient majeur de cette configuration réside dans le besoin d'une compensation active pour répondre à la demande de la puissance réactive du réseau en plus la commande de l'onduleur est très délicate à cause de la variation de la tension du bus continu entre le redresseur et l'onduleur, [6,7].

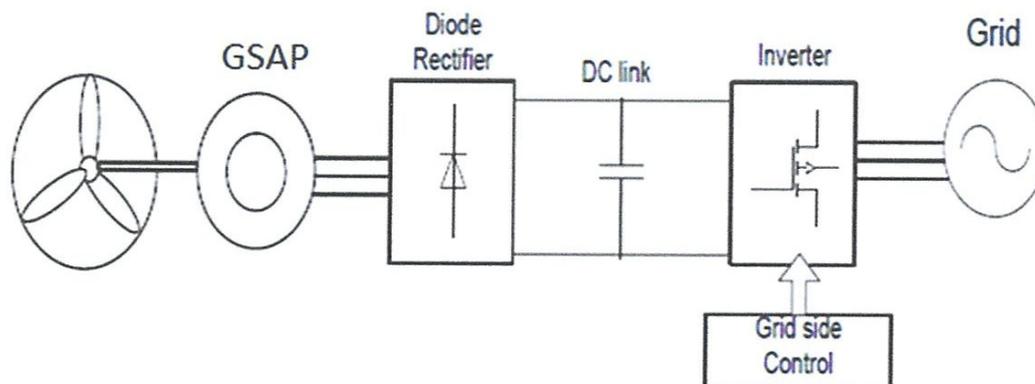


Figure I.12 Chaîne utilisant un redresseur à diode, un condensateur et un onduleur.

4.2 Chaîne de conversion avec redresseur à diode, Hacheur et onduleur

L'utilisation d'un hacheur à la place du condensateur, figure I.13, permet un réglage efficace de la tension de sortie du redresseur et donc l'onduleur contrôle seulement la tension du côté alternatif, ce qui simplifie sa commande. Mais la présence d'un nouvel étage (le hacheur) augmente le prix de l'éolienne et diminue sa fiabilité.

Dans le cas où le réseau est un bus continu, l'onduleur est supprimé ce qui simplifie énormément la structure et la commande et diminue le coût [9, 10].

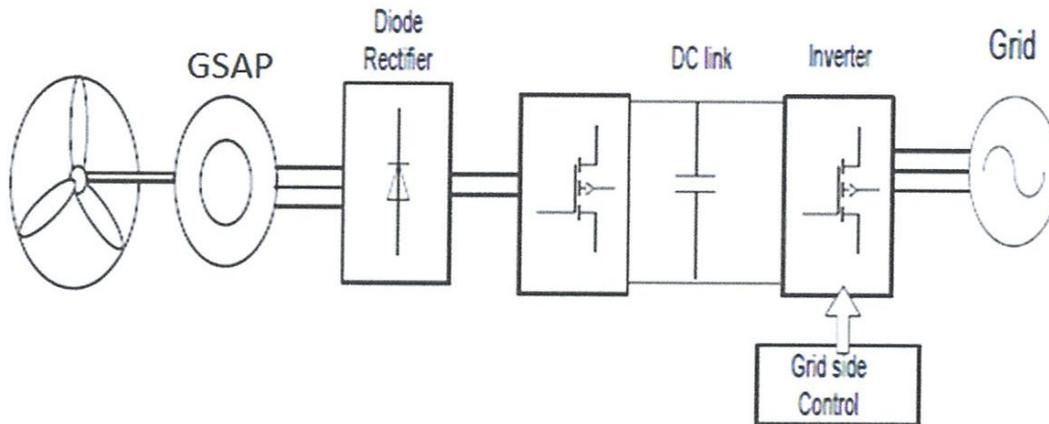


Figure I.13 Chaîne utilisant un redresseur à diode, un hacheur et un onduleur.

4.3 Chaîne de conversion avec redresseur MLI et un onduleur

La Figure I.14 présente une configuration qui utilise deux convertisseurs de puissance à six interrupteurs chacun, un redresseur à commande MLI et un onduleur. La commande du redresseur est assurée par un régulateur PI en appliquant un contrôle vectoriel de la machine.

Une méthode MPPT est utilisée pour déterminer la vitesse de rotation optimale, correspondant à chaque vitesse de vent. La tension du bus continu est aussi régulée par un contrôleur PI via l'onduleur [6,7].

Cette structure est la plus populaire actuellement, appelée aussi « Back to Back convertir ». Ces avantages sont :

- Transfert de l'énergie dans les deux sens du convertisseur Back to Back.
- Permet le réglage de tension continue du bus continu. Ce qui permet de connecter des batteries de stockage facilement.
- Réglage séparé des deux convertisseurs : le convertisseur coté générateur assure le réglage de la vitesse de rotation et le convertisseur coté réseau assure le réglage des puissances (donc du facteur de puissance) et de la tension du bus continu.

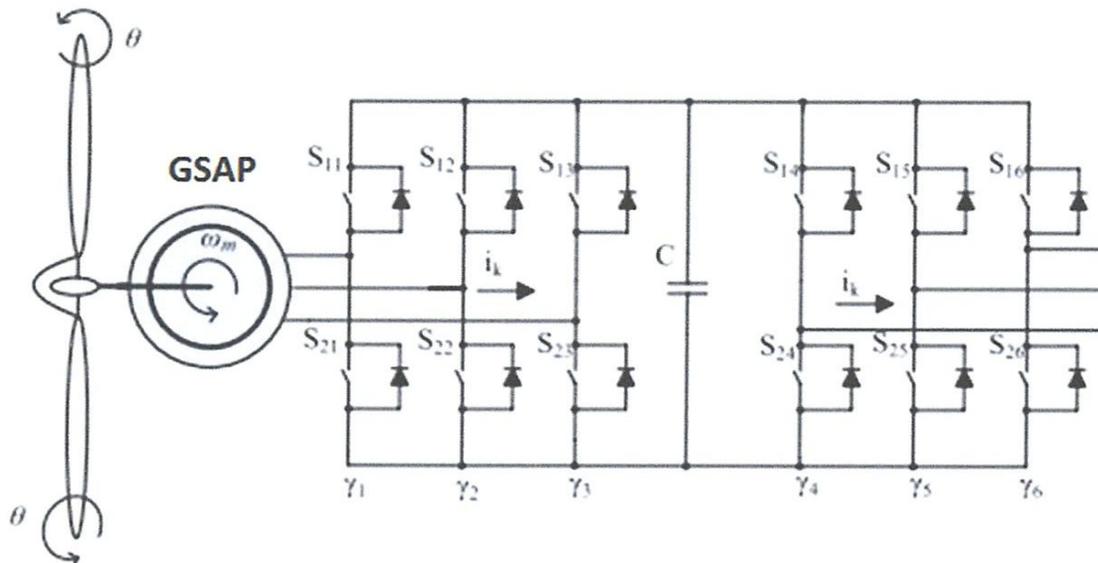


Figure I.14 Chaîne utilisant un redresseur MLI et un onduleur.

4.4 Chaîne de conversion avec deux convertisseurs à 4 interrupteurs

La Figure I.15 présente une configuration composée de deux convertisseurs à quatre interrupteurs chacun et deux condensateurs de ligne. Encore une fois, une méthode MPPT est employée, elle calcule la puissance produite en mesurant le courant et la tension de ligne, et agit sur l'amplitude du courant pour obtenir le fonctionnement optimal.

Bien qu'elle réduit le nombre des interrupteurs par rapport à la dernière configuration, cette configuration nécessite cependant deux mesures pour appliquer la méthode de commande, ce qui augmente la complexité de la commande et, implicitement, le coût du système.

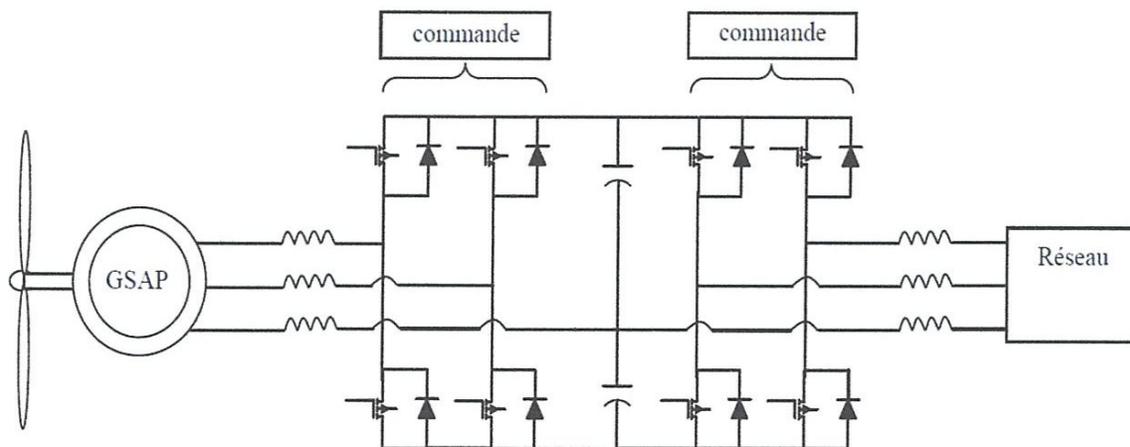


Figure I.15 Chaîne utilisant deux convertisseurs de puissance à 4 interrupteurs.

4.5 Chaîne de conversion éolienne avec convertisseur matriciel.

Le convertisseur matriciel permet de générer des tensions avec un faible taux d'harmoniques figure I.16, [8].

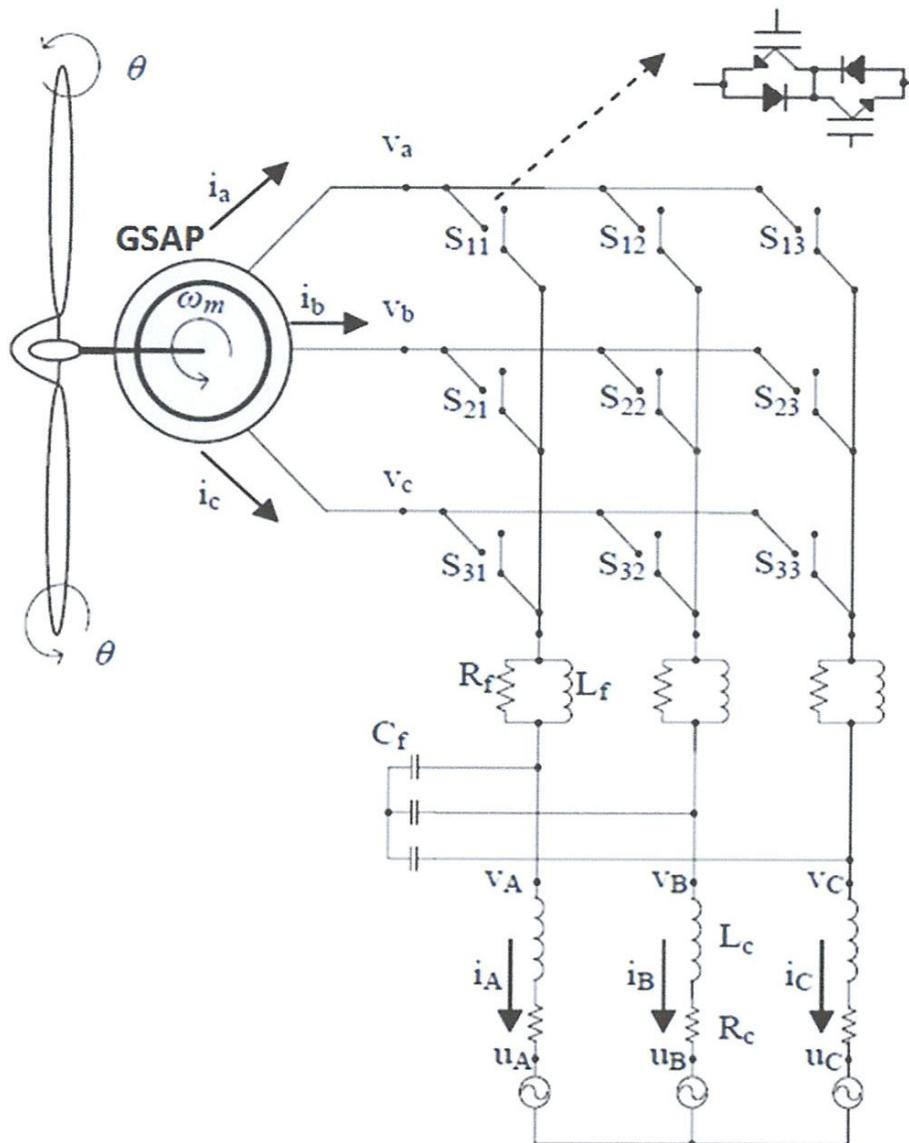


Figure I.16 Chaîne utilisant un convertisseur matriciel.

4.6 Chaîne de conversion éolienne avec chargeur de batteries.

A cause de la nature intermittente de l'énergie éolienne, le recours au stockage de l'énergie dans des batteries est une solution très utilisée notamment pour les éoliennes isolées (non raccordée au réseau électrique). Figure I.17.

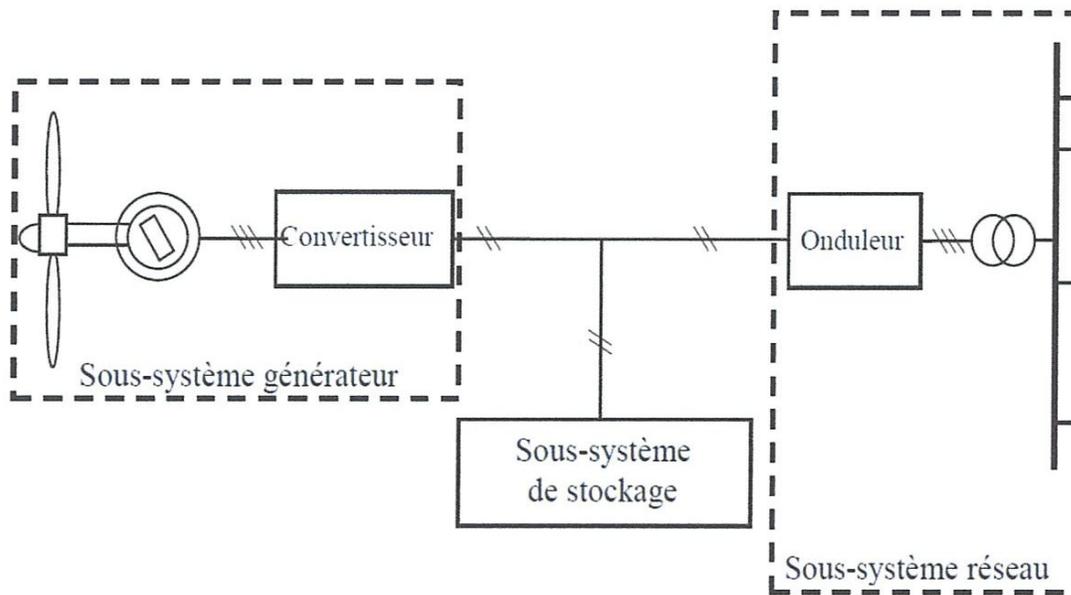


Figure I.17 Chaîne utilisant un sous-système de stockage.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation rapide de l'exploitation mondiale de l'énergie éolienne entre 2004 et 2014, ensuite,

nous avons présenté les différents éléments importants d'une éolienne classique à trois pales et à axe verticale.

Ce chapitre a été terminé par une présentation non exhaustive des différentes chaînes de conversion utilisées dans les éoliennes. L'accent a été mis sur les éoliennes utilisant la machine synchrone à aimant permanent.

Chapitre II :

Modélisation d'une chaîne de conversion à base d'une MSAP

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation mathématique de tous les éléments d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une MSAP.

En effet, après la présentation de la chaîne qui fait l'objet de cette étude, nous développons les modèles mathématiques des éléments suivants :

- La turbine et la partie mécanique
- La génératrice synchrone à aimants permanents,
- Le redresseur MLI,
- La charge alimentée par l'éolienne.

2. Présentation et modélisation d'une chaîne de conversion à base d'une MSAP

2.1 Présentation de la chaîne :

La chaîne de conversion que nous allons étudier et modéliser est donnée par la figure II.1. Sur cette chaîne, on trouve les éléments suivants [9] :

- une turbine à trois pales,
- un génératrice synchrone à aimant permanent couplée directement à la turbine,
- un redresseur à commande MLI,
- un condensateur de filtrage et une charge alimentée par l'éolienne.

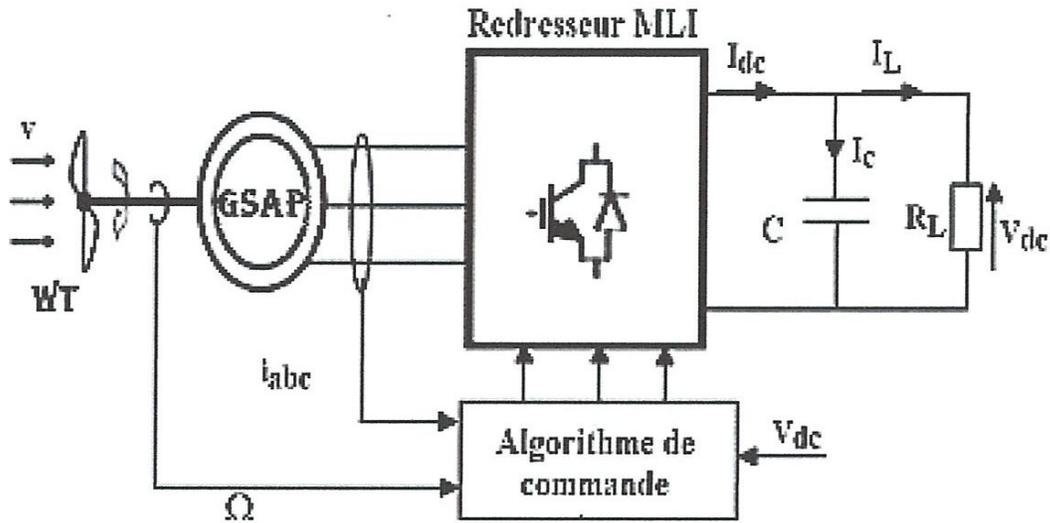


Figure II.1 : chaîne de conversion étudiée

2.2 Modélisation de la turbine éolienne

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure (surface balayée par les pales), la puissance de la masse d'air qui traverse la surface théorique active S de l'éolienne est donnée par [1,5,6,10,11,12] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v_v^3 \quad (\text{II.1})$$

Où :

ρ : la masse volumique de l'air (1.225 kg/m^3 à la pression atmosphérique).

S : la surface balayée par les pales de la turbine [m^2]

v_v : la vitesse du vent supposée homogène sur la longueur des pales [m/s]

Cependant, dans un système éolien, à cause des différentes pertes, la puissance extraite disponible sur le rotor de la turbine, est inférieure à la puissance incidente. La puissance extraite P_m s'exprime par [9-11] :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p(\beta, \lambda) v_v^3 \quad (\text{II.2})$$

avec

$$C_p(\beta, \lambda) = \frac{P_m}{P_v} \quad (\text{II.3})$$

$C_p(\beta, \lambda)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ appelé TSR (Tip Speed Ratio), qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β .

Le ratio λ peut être exprimé par la relation suivante [9-11] :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v_v} \quad (\text{II.4})$$

Où :

R : le rayon de la turbine (longueur d'une pale).

Ω_t : la vitesse de la turbine.

Le maximum du coefficient de puissance $C_p(\beta, \lambda)$ a été déterminé par Albert Betz (1920) comme suit :

$$C_p^{max}(\beta, \lambda) = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient de puissance est intrinsèque à la constitution de l'éolienne et dépend des profils des pales.

Les courbes essentielles caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par la variation de la puissance mécanique P_m ou du coefficient de puissance $C_p(\beta, \lambda)$ (ou bien du coefficient du couple C_c , équation II.5), en fonction de la vitesse spécifique λ ou de la vitesse de la turbine.

$$C_c(\beta, \lambda) = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{II.5})$$

Exemple d'éolienne de faible puissance dont le rayon R est de 1.25 m et le coefficient de puissance est donnée par :

$$C_p(t) = -3.39 * 10^{-8} \lambda^7 - 4.21 * 10^{-6} \lambda^6 + 2.1 * 10^{-4} \lambda^5 - 3.1 * 10^{-3} \lambda^4 + 1.64 * 10^{-2} \lambda^3 - 1.76 * 10^{-2} \lambda^2 + 1.74 * 10^{-2} \lambda + 1.93 * 10^{-3}$$

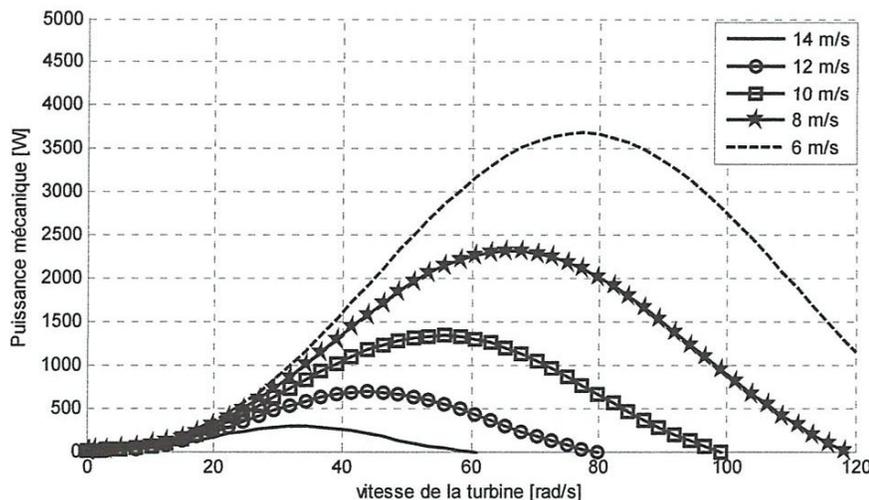


Figure II.2 : variation de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine et du vent

D'après cette figure, on voit bien que pour chaque vitesse du vent il y a une vitesse optimale de la turbine qui donne le maximum de puissance.

L'équation mécanique de la partie tournante du système (éolienne + rotor de la MSAP) est exprimée par l'équation II.

$$(J_t + J_g) \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_g - (f_t + f_g)\Omega \quad (\text{II.6})$$

où

J_t et J_g sont respectivement le moment d'inertie de la turbine et celui du générateur ;

f_t et f_g sont respectivement le coefficient des frottements visqueux de la turbine et du générateur.

Ω_g est la vitesse de rotation du générateur.

Le couple mécanique de la turbine C_t est obtenu à partir de la puissance mécanique par l'équation suivante :

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} \quad (\text{II.7})$$

2.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation mathématique. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

Les lois modernes de commande de plus en plus performantes permettent un meilleur contrôle des régimes transitoires tout en assurant, dans une grande plage de fonctionnement, un asservissement précis de la vitesse. Tous ces perfectionnements demandent une bonne connaissance de la machine et de son convertisseur, notamment en régime transitoire.

Dans ce qui suit nous présenterons un modèle analytique assez précis pour répondre aux exigences citées précédemment. Ce modèle est basé sur la transformation de PARK, [10,11].

2.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement d'un système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle. Cela permet une étude et une exploitation plus aisées.

Dans les problèmes de commande des machines électriques, on adopte généralement les

suppositions suivantes :

- La saturation est négligée, il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements ;
- Les f.m.m. sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine, il y a une symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements ;
- L'effet d'encoche est négligé ;
- On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques.

L'excitation étant faite par un aimant permanent, telle que le flux d'excitation est considéré comme constant, par ailleurs, l'aimant est considéré comme un enroulement sans résistance ni inductance propre et mutuelle, mais comme source de flux [10,11].

2.3.2 Equations de tensions et flux

Les équations des tensions statoriques, écrites dans un référentiel stationnaire (a,b,c) lié au stator, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II.8})$$

où :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

Et :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\Phi_s] = [l_{ss}] \cdot [I_s] + [\Phi_f] \quad (\text{II.9})$$

Où :

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

Notons que :

Φ_{sf} est la valeur crête (constante) du flux créé par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques.

θ est la position du rotor en degré électrique.

$[l_{ss}]$ Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propres statorique $[L_{ss}]$ est fonction de la position. Elle contient deux termes : $[L_{s0}]$ qui est constant, et $[L_{s2}(\theta)]$ qui est fonction de l'angle électrique θ . On a donc :

$$[L_{ss}] = [l_{s0}] + [l_{s2}(\theta)] \quad (\text{II.10})$$

$[L_{s0}]$ et $[L_{s2}(\theta)]$ sont données par les matrices suivantes :

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

$$[l_{s2}(\theta)] = l_{s2} \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \cos(2\theta - 2\pi/3) & \cos(2\theta - 4\pi/3) \\ \cos(2\theta - 2\pi/3) & \cos(2\theta - 4\pi/3) & \cos 2\theta \\ \cos(2\theta - 4\pi/3) & \cos 2\theta & \cos(2\theta - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

On remarque d'après les équations précédentes que ce modèle est fortement non linéaire et couplé. Pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système. Dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park, qui consiste à transformer les enroulements immobiles (a, b, c) par des enroulements (d, q) fixe ou tournant avec le rotor.

2.3.3 Modèle de Park de la Machine synchrone à aimants permanents

Afin d'obtenir des coefficients constants dans les équations différentielles, la transformation de Park est utilisée. Cette transformation est ancienne (1929) et si elle revient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel.

Physiquement, on peut la comprendre comme une transformation des trois enroulements de la MAS à seulement deux enroulements, comme la montre la figure (II.3) :

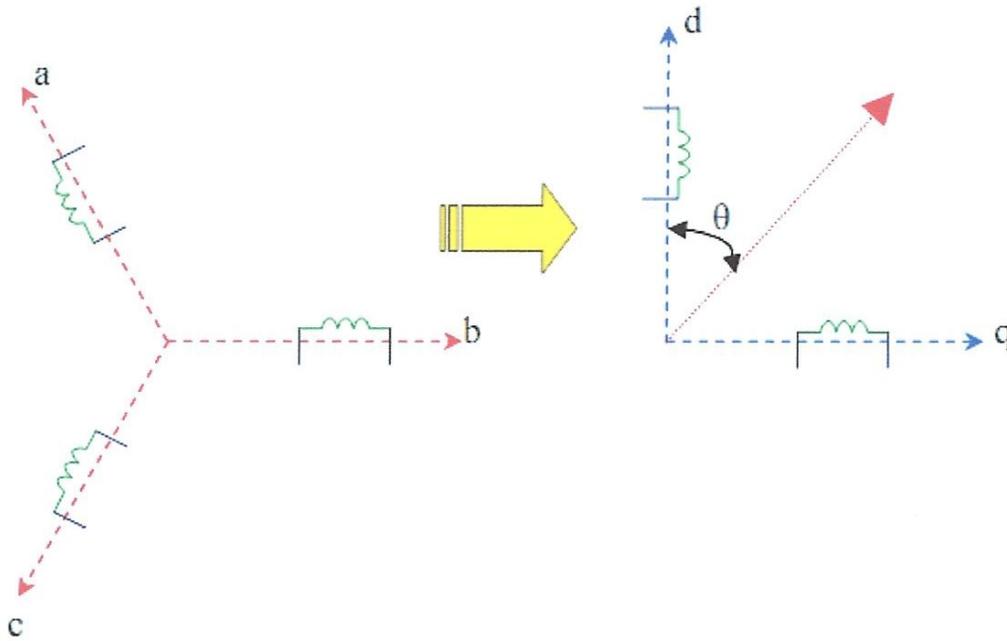


Figure II.3 : Transformation de Park

Les amplitudes directe (d) et en quadrature (q) des grandeurs statoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase (a,b,c) sont comme suit:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \tag{II.11}$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

où : X Grandeur physique (tension, courant ou flux).

A Matrice de Park normalisée donnée par :

$$A = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

A^{-1} est la matrice inverse de Park donnée par :

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

θ_s Angle de rotation du repère (d,q).

Le coefficient 2/3 de cette transformation normalisée est choisi en se basant sur le principe de l'égalité des amplitudes.

Les équations précédentes peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les tensions, les courants et les flux.

a) Application aux équations des tensions :

L'application de la transformation de Park au système donné par les équations (II.8) donne lieu au système suivant :

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

avec :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_d I_{ds} + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = l_q I_{qs} \end{cases} \quad (II.16)$$

b) Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut être calculé à partir de l'expression de la puissance instantanée :

$$P_e = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad (II.17)$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions dans (II.17), on trouve que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique, ces puissances sont donnée par :

$$P_j = \frac{3}{2} R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \quad (\text{II.18})$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} (I_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt}) \quad (\text{II.19})$$

$$P_{mec} = \frac{3}{2} \omega (I_{qs} \Phi_{ds} - I_{ds} \Phi_{qs}) \quad (\text{II.20})$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivante :

$$C_g = \frac{P_{mec}}{\Omega_g} = p \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (\text{II.21})$$

En tenant compte des expressions (II.16) et (II.20), le couple électromagnétique sera donné par

$$C_g = \frac{3}{2} p \left((l_d - l_q) I_{qs} I_{ds} + \Phi_f I_{qs} \right) \quad (\text{II.22})$$

Avec

p : nombre de pair de pôles

l_d et l_q : sont respectivement les inductances cycliques des axes d et q.

Pour une machine à pôles lisses $l_d = l_q$, dans ce cas l'expression du couple devient :

$$C_g = \frac{3}{2} p \Phi_f I_{qs} \quad (\text{II.23})$$

2.3.4 Schéma bloc de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega L_d I_d + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

GSAP 1 : $R_s=2.875\Omega$; $L_d=L_q=0.0085H$; $J_g = 0.008Kg.m^2$; $f=0Nm/rd/s$; $P=4$; $\Phi_f=0.175Wb$

b) GSAP avec une charge triphasée

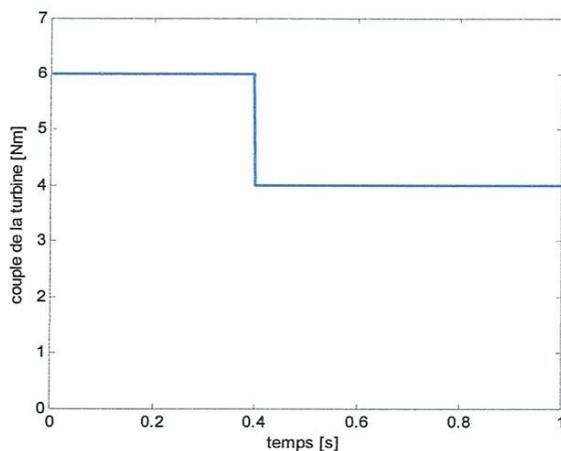
La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique triphasée de type (R_{ch}, L_{ch}) . Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique la transformation de Park sur les équations (a,b,c) de la charge ce qui donne :

$$\begin{cases} V_d = R_{ch}I_d - L_{ch}\frac{dI_d}{dt} - \omega L_{ch}I_q \\ V_q = R_{ch}I_q - L_{ch}\frac{dI_q}{dt} - \omega L_{ch}I_d \end{cases} \quad (II.25)$$

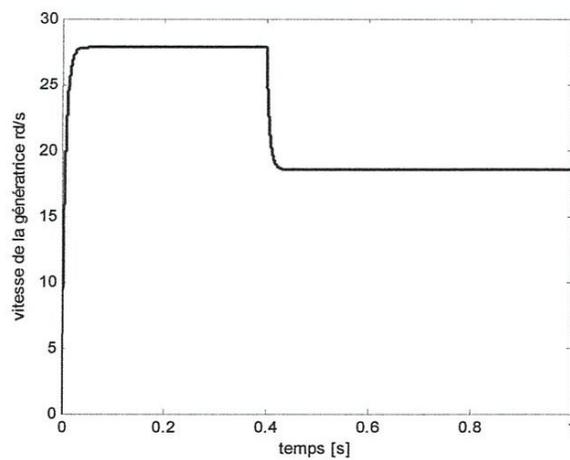
Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents de la turbine sont appliqués (Figure II.6-a). On commence par un couple de 6 Nm pendant 0.4 s puis on diminue le couple à 4 Nm. Sur la figure II.6-b, on voit que la vitesse de la génératrice suit la variation du couple moteur, elle varie de 0 à 27.8 rd/s puis elle descend à 18.5 rd/s.

La figure II.6-c montre que le couple électromagnétique développé par la génératrice a tendance à suivre l'évolution du couple moteur de la turbine.

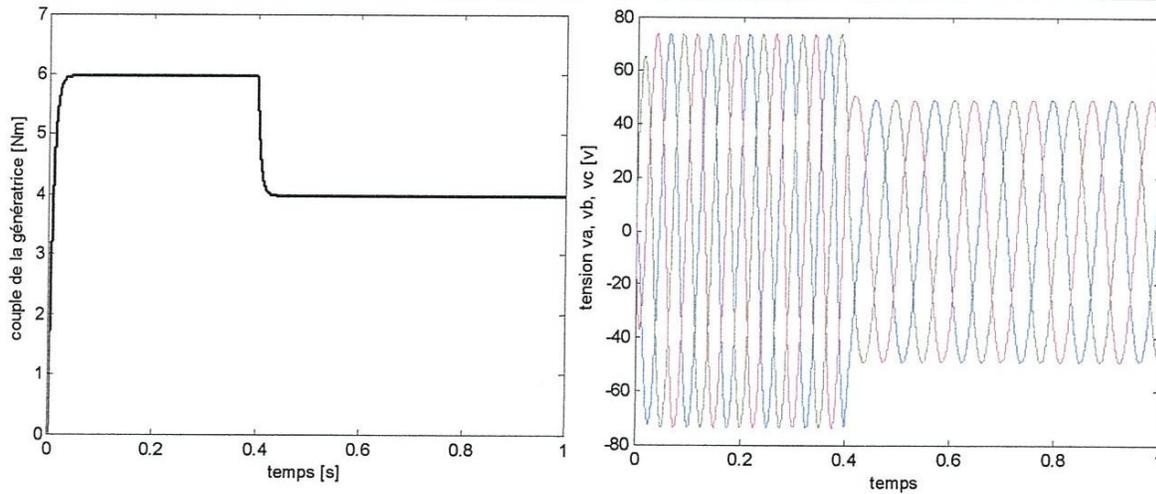
Sur la figure II.6-b, on voit que la tension aux bornes de la génératrice varie en amplitude et en fréquence proportionnellement au variation du couple moteur. Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.



a) Couple de la turbine



b) vitesse de la GSAP



c) Couple de la GSAP

d) tension Va, Vb et Vc de la GSAP

Figure II.6 : résultats de simulation sous Simulink de GSAP en charge

GSAP 2: $R_s=0.895\Omega$; $L_d=0.012H$; $L_q=0.0211H$; $J_g=0.00141Kg.m^2$; $f=0.001Nm/rd/s$;
 $P=3$; $\Phi_f=0.9Wb$; $R_{ch}=50\Omega$; $L_{ch}=0.002H$

2.4 Modélisation du redresseur à commande MLI

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation constituées d'une diode et d'un transistor en antiparallèle. Cette structure permet de passer le courant dans les deux sens.

Le schéma représentatif d'une association GSAP-machine peut être donné par la figure II.7 [10,11,12].

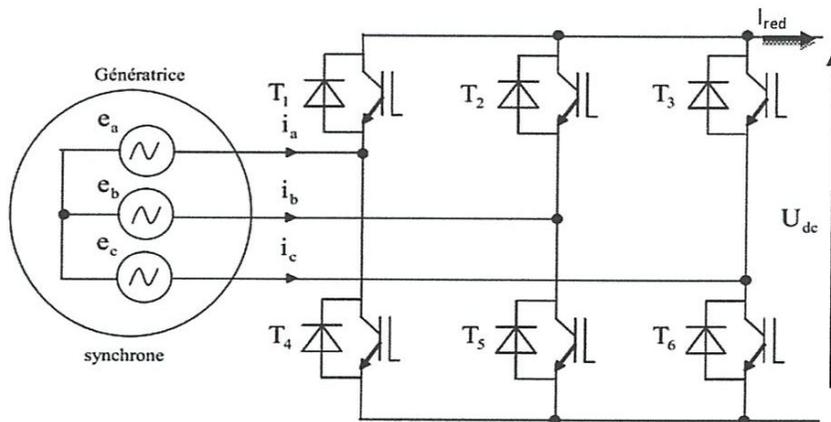


Figure II.7 : structure du redresseur à commande MLI relié à la GSAP

Les transistors (généralement des IGBTs) et les diodes constituant le pont sont supposés idéaux. Les commutations sont supposés instantanées et les pertes par conductions et par commutation sont négligées. L'état des interrupteurs peut être représenté par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j = a, b, c$) telles que :

$$S_j = 1 \quad \text{si l'interrupteur du haut est fermé et celui d'en bas est ouvert.}$$

$$S_j = 0 \quad \text{si l'interrupteur du haut est ouvert et celui d'en bas est fermé.}$$

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

$$\begin{cases} U_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ U_{ac} = (S_a - S_c)U_{dc} \\ U_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \end{cases} \quad (II.26)$$

Les tensions et les courant sont supposés équilibrés, donc :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (II.27)$$

La combinaison entre les équations précédentes (II.26) et (II.27), donne les tensions simples (par rapport au neutre de la source) à l'entrée du redresseur en fonction des signaux de commande PWM :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

De même, on peut exprimer le courant de sortie I_{red} en fonction des courants d'entrée par la relation suivante :

$$I_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

2.5 Modélisation du filtre et de la charge de la partie continue

Ce bloc est composé d'une capacité C en parallèle avec une charge qui peut être de différentes nature, figure II.8.

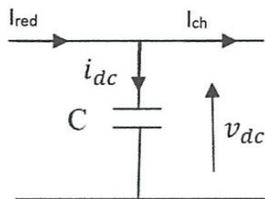


Figure II.8 : bus continu

La tension V_{dc} aux bornes de la charge est donnée à partir de la loi des nœuds par l'équation suivante :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{I_{red} - I_{ch}}{C} \quad (II.30)$$

Le courant absorbé par la charge I_{ch} , dépend de la nature de celle-ci.

- à vide :

$$I_{ch} = 0 \quad (II.31)$$

- Pour une charge résistive R_{ch} :

$$I_{ch} = \frac{v_{dc}}{R_{ch}} \quad (II.32)$$

- Pour une charge résistive inductive (L_{ch}, R_{ch}):

$$\frac{dI_{ch}}{dt} = \frac{v_{dc} - R_{ch}I_{ch}}{L_{ch}} \quad (II.33)$$

- Pour une charge active (L_{ch}, R_{ch}, E):

$$\frac{dI_{ch}}{dt} = \frac{v_{dc} - R_{ch}I_{ch} - E}{L_{ch}} \quad (II.34)$$

3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de tous les éléments d'une chaîne de conversion éolienne isolée (connectée à une charge) à base d'une génératrice à aimants permanents GSAP.

Après la présentation de la chaîne qui fait l'objet de cette étude, nous avons développé les modèles mathématiques des éléments suivants :

- La turbine et la partie mécanique
- La génératrice synchrone à aimants permanents,
- Le redresseur MLI,
- La charge alimentée par l'éolienne.

Des résultats de simulation du fonctionnement de la GSAP à vide et en charge ont été aussi présentés.

Chapitre III :

Commande de la chaine de conversion éolienne

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter au début les stratégies de commande des éoliennes, ensuite, nous étudierons une technique de commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » qui permet d'assurer une exploitation optimale de l'énergie du vent disponible. Des résultats de simulation seront présentés pour montrer l'efficacité de la MPPT proposée.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons une commande vectorielle de la GSAP qui permet de contrôler le couple électromagnétique développé la génératrice ce qui permet ensuite de régler la vitesse de l'éolienne pour assurer l'extraction de la puissance maximale.

2. Stratégies de commande de la turbine éolienne

La figure III.1, donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

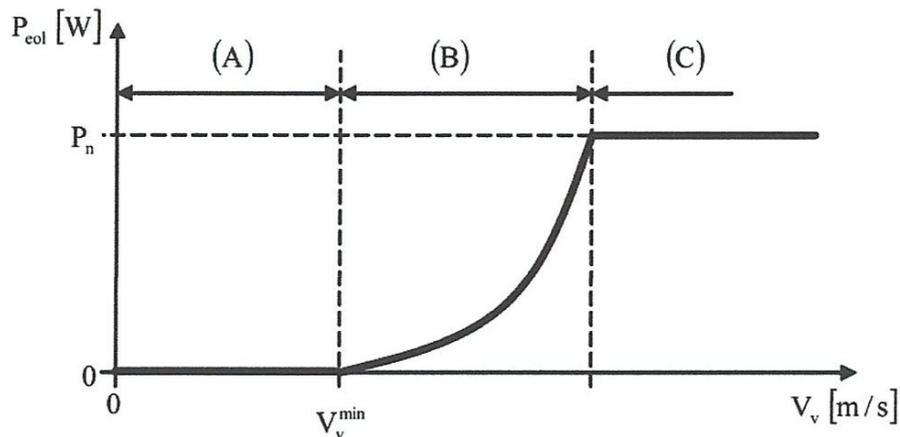


Figure III.1 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [11]

Après une partie (A) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage V_{\min}^v , une section de fonctionnement normal (B) existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (MPPT), celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent. Quand la puissance nominale P_n est atteinte, région (C), elle doit être limitée. Au-delà de la vitesse du vent nominale qui correspond à la puissance nominale, il y a une certaine vitesse du vent limite ou on doit arrêter la turbine pour des raisons de sécurité [11].

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent, figure III.2, [10, 11]. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch control » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La seconde technique est passive « stall control ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent.

Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

La dernière famille qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation de la turbine par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité.

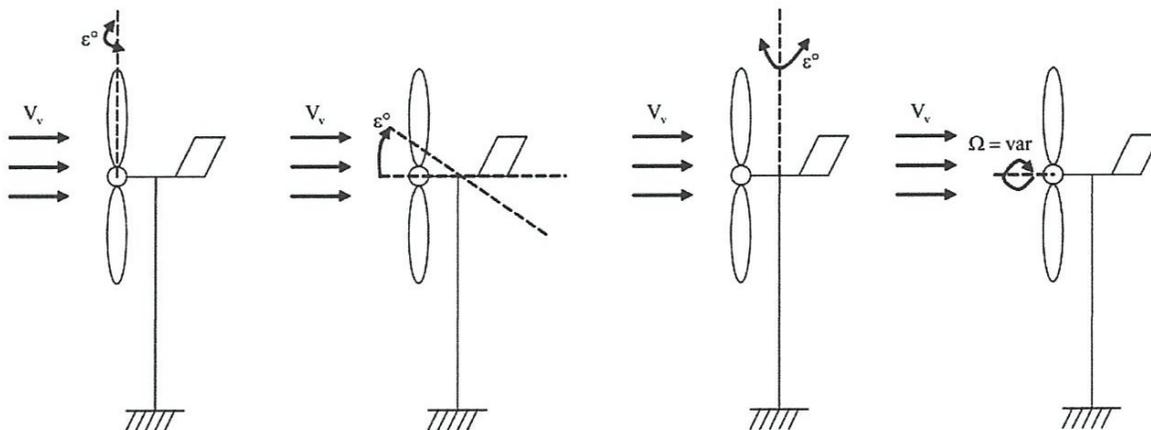


Figure III.2 Limitation de puissance éolienne a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse de rotation variable

3. Méthodes de recherche du point maximum de puissance

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu sur la figure II. 2, que la caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche » [9-11,13]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

Un autre exemple est donné par la figure III.3. Il montre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine pour plusieurs vitesses du vent.

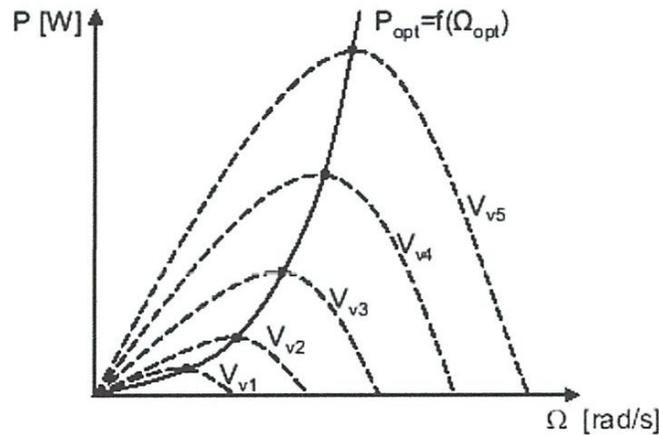


Figure III.3 : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \rho S C_p^{opt}(\beta, \lambda_{opt}) v_v^3 \quad (\text{III.1})$$

Un fonctionnement idéal du système éolien dans la région (B), figure III.1, nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) doit être utilisée.

La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles [10] :

- La première approche, la moins classique, considère que la caractéristique $C_p(\beta, \lambda)$ n'est pas connue.

Le bloc bleu qui représente la turbine, calcule la puissance, le couple et la vitesse de la turbine. Les entrées sont la vitesse du vent et le couple électromagnétique développé par la GSAP (dans cette figure il est supposé égale au couple de référence). Le contenu de ce bloc est donné par la figure III.5.

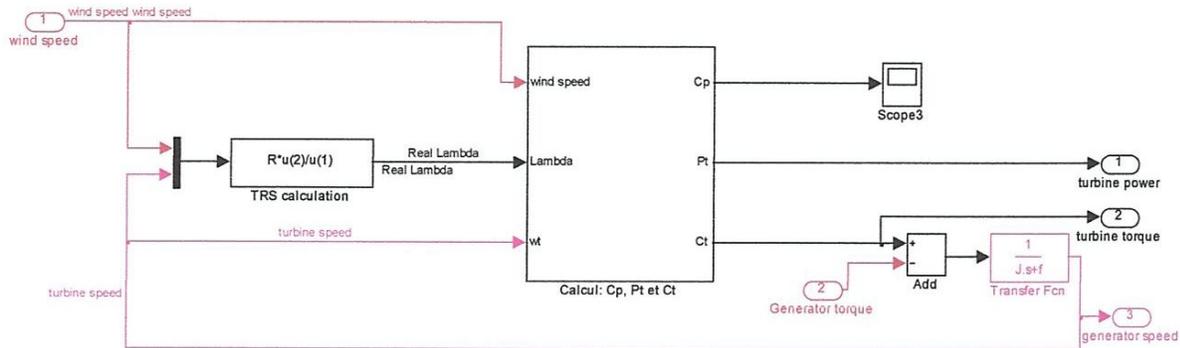


Figure III.5 : schéma bloc de la turbine et de la partie mécanique

Le fonctionnement de cette technique MPPT est le suivant :

- On compare la vitesse de la turbine à la vitesse de référence qui correspond au coefficient de puissance optimal (donc puissance optimale),
- La différence de ces deux vitesses est minimisée par un correcteur, de type PI ou IP pour notre cas.
- La sortie du correcteur constitue le couple de référence que doit développer la GSAP pour régler la vitesse à sa référence.

b) Résultats de simulation

La variation du vent considérée pour cette simulation est modélisée par l'équation suivante :

$$v_v(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (III.2)$$

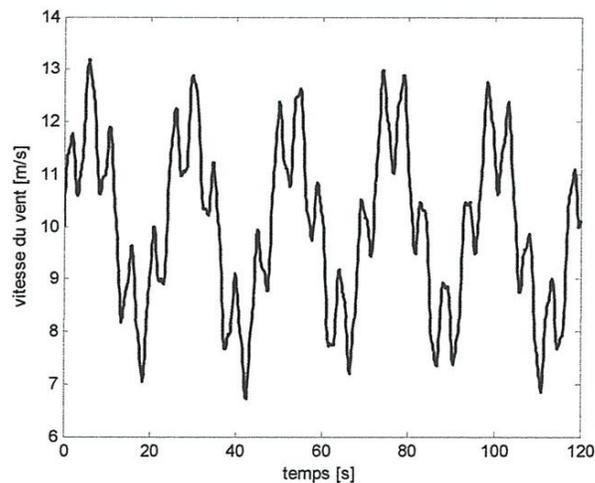


Figure III.6 : évolution de la vitesse du vent

- Correcteur PI :

Le premier correcteur que nous avons utilisé est un correcteur PI, équation III.3 :

$$C_{PI} = \frac{K(T_i s + 1)}{s} \quad (III.3)$$

Les paramètres de ce correcteur sont :

$$K = -10/(f_g + f_t) \quad \text{et} \quad T_i = (J_g + J_t) / (f_g + f_t)$$

La figure III.7, montre l'évolution de la vitesse de la turbine et sa référence qui donne le maximum de puissance pour chaque vitesse du vent. On voit bien que les deux vitesses évoluent de la même façon avec une petite erreur ce qui montre le bon réglage du système.

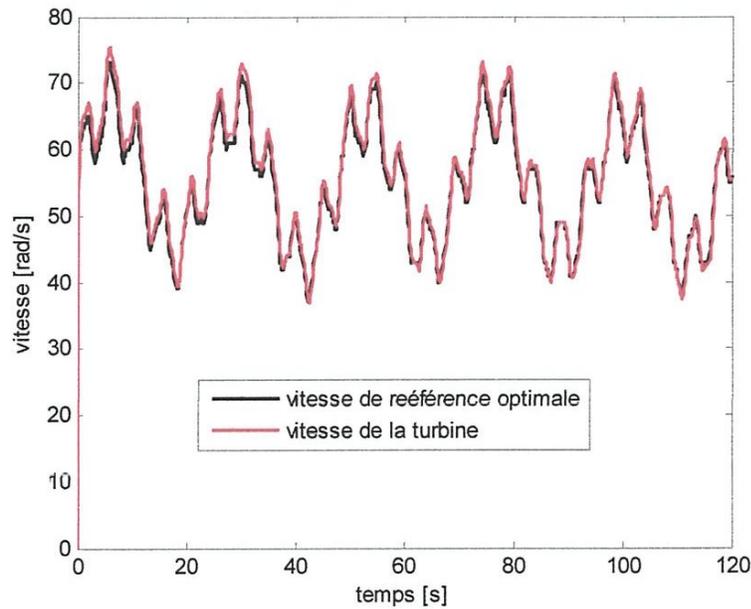


Figure III.7 : évolution des vitesses pour un correcteur PI

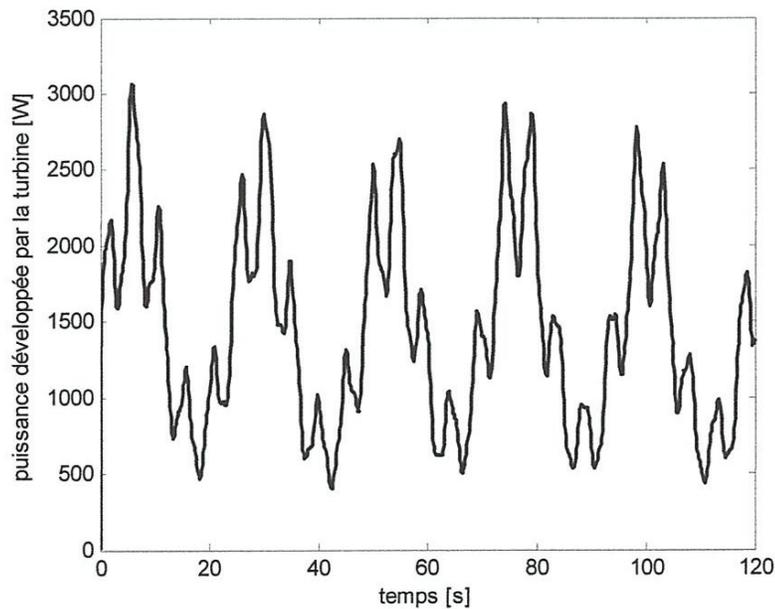


Figure III.8 : évolution de la puissance mécanique fournie par la turbine (cas PI)

La figure III.8, montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine. On voit bien qu'elle suit les variations du vent.

- Correcteur IP :

Pour améliorer les performances de la commande MPPT, nous avons remplacé le correcteur PI par un correcteur de type IP, figure III.9.

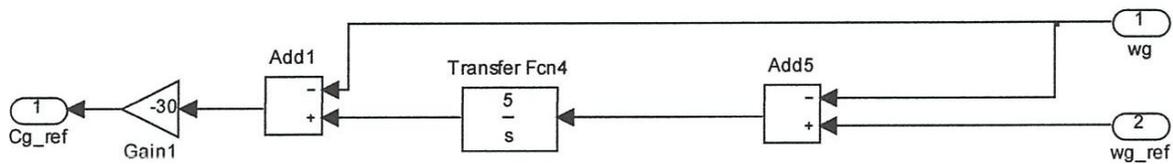


Figure III.9 : structure du correcteur IP utilisé

Les paramètres de ce correcteur sont :

$$K = -30 \quad \text{et} \quad T_i = 5$$

La figure III.10, montre l'évolution de la vitesse de la turbine et sa référence optimale. Les deux vitesses sont très proches et l'erreur est plus petite que celle obtenue avec le PI.

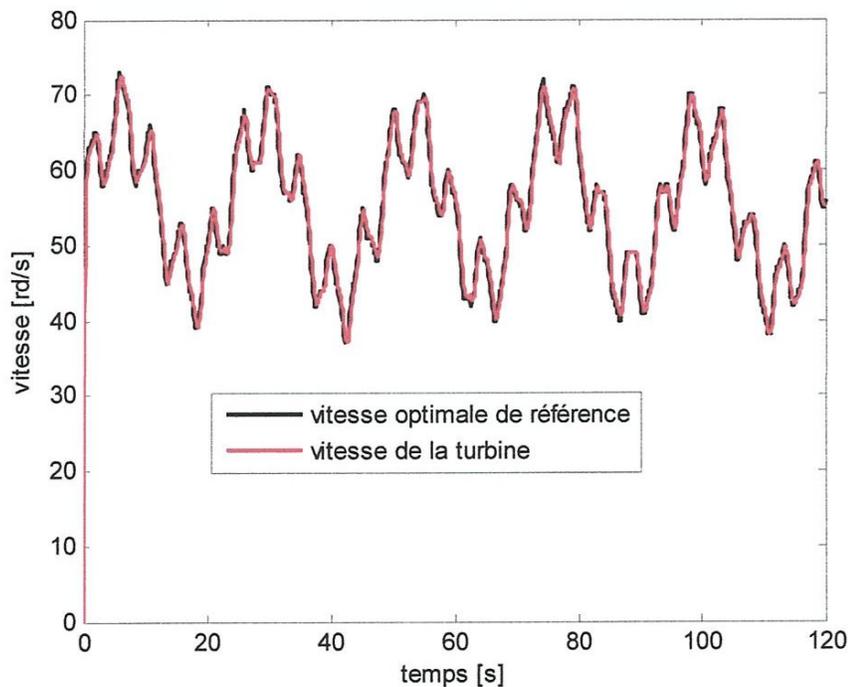


Figure III.10 : évolution des vitesses pour un correcteur IP

La figure III.11, montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine. Elle un peu meilleur que celle obtenue par le PI.

Donc le IP permet d'améliorer le rendement de l'éolienne en assurant une commande MPPT très précise.

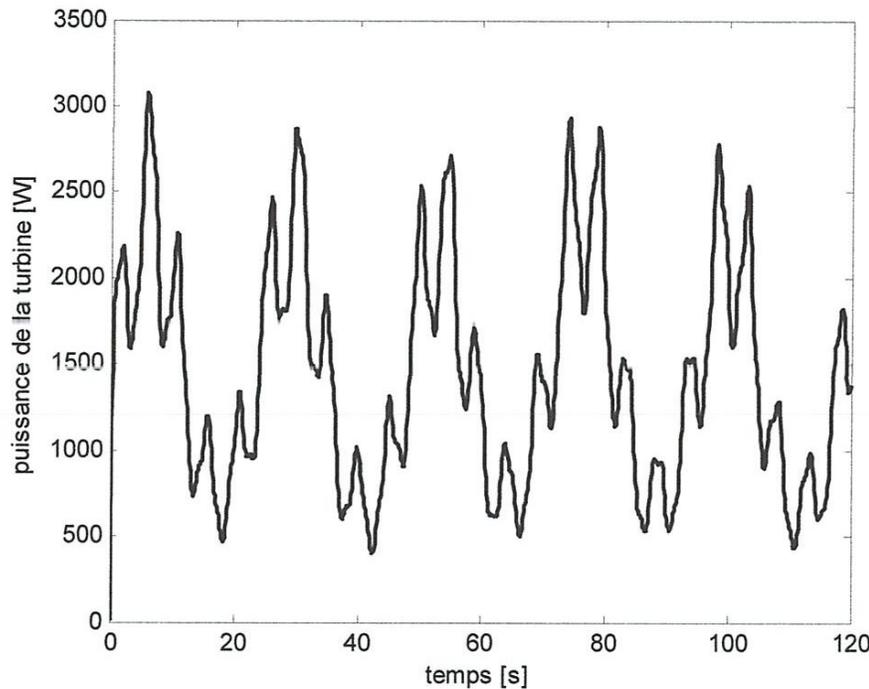


Figure III.11 : évolution de la puissance mécanique fournie par la turbine (cas IP)

4. Contrôle du couple de la GSAP par la commande vectorielle

Dans la partie précédente, nous avons supposé que la génératrice est parfaite et le couple qu'elle développe est égal au couple de référence fourni par la boucle de réglage de la vitesse de la turbine. Dans cette partie, nous allons développer une technique de commande vectorielle qui permet de régler efficacement le couple de la GSAP.

La technique de la commande vectorielle est utilisée pour établir un modèle linéaire et transformer la machine synchrone à aimants en une structure équivalente à la machine à courant continu à excitation séparée du point de vue couple, pour permettre un découplage du couple et du flux.

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à la machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct I_{ds} à zéro est la plus répandue. Cela permet de simplifier l'expression du couple électromagnétique en une expression linéaire donnée par :

$$C_g = \frac{3}{2} p \Phi_f I_{qs} \quad (\text{III.4})$$

Le couple est alors réglé en agissant uniquement sur le courant en quadrature I_{qs} .

Le schéma représentatif de la commande vectorielle de la GSAP est donné par la figure III.12.

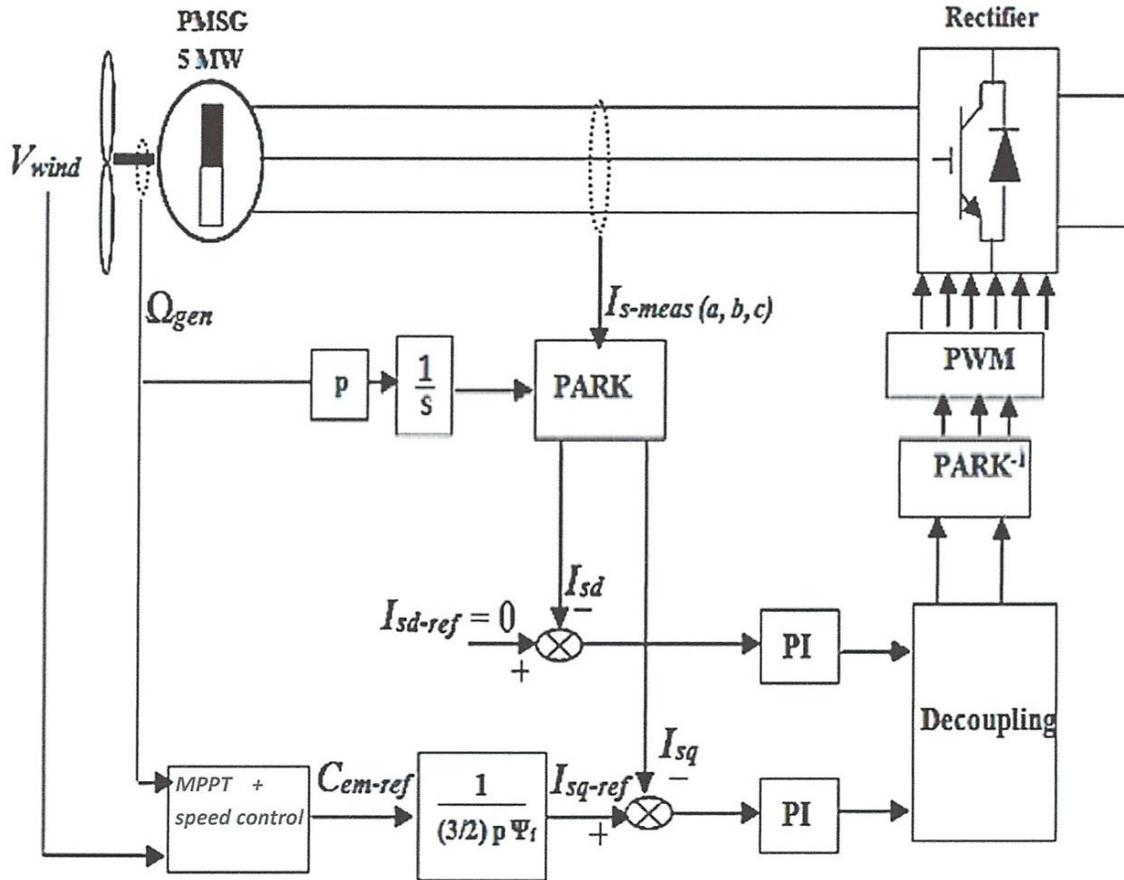


Figure III.12 : structure globale de contrôle de la GSAP

A l'inverse de la commande MLI des tensions pour régler les courants, nous avons opté pour une commande à hystérésis des courants. Cette dernière technique est plus simple à réaliser et permet un contrôle très précis des courants de la GSAP. La figure III.13.

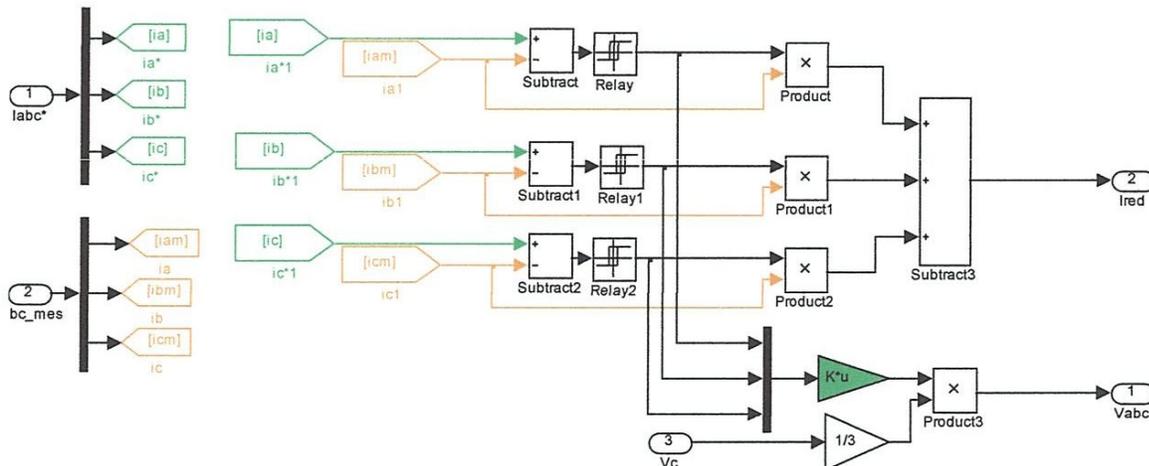


Figure III.13 : modèle du redresseur et sa commande MLI à hystérésis

La figure III.14, montre le schéma bloc de utilisé pour simuler la commande vectorielle de la GSAP en interaction avec la commande MPPT qui lui fournit le couple de référence.

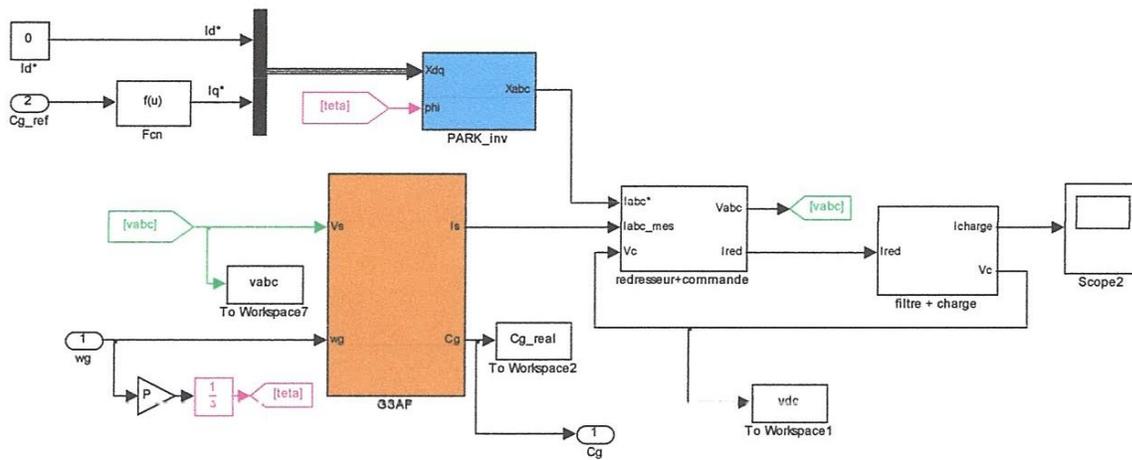


Figure III.14 : schéma bloc Simulink de la commande vectorielle de la GSAP

Les données utilisées pour faire cette simulation sont données dans l'annexe. Pour cette simulation nous avons adapté les paramètres du correcteur IP pour respecter la dynamique de la GSAP. Les valeurs de ces paramètres sont : $K=-4$ et $T_i=0.9$.

La figure III.15, montre le bon réglage de la vitesse de la turbine pour une référence de 50 rd/s (cette vitesse donne la puissance optimale pour un vent de 9 m/s).

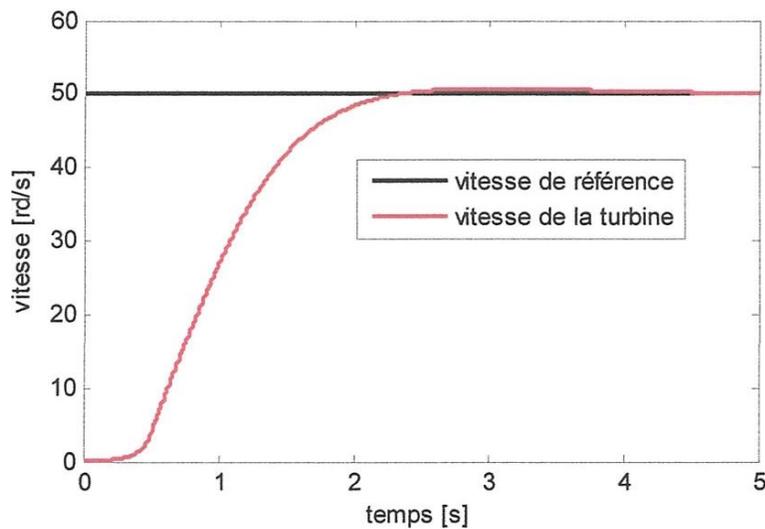


Figure III.15 : évolution de la vitesse de la turbine par rapport à sa référence

La figure III.16, montre une comparaison entre le couple de référence fournit par la commande MPPT et le couple électromagnétique développé par la GSAP.

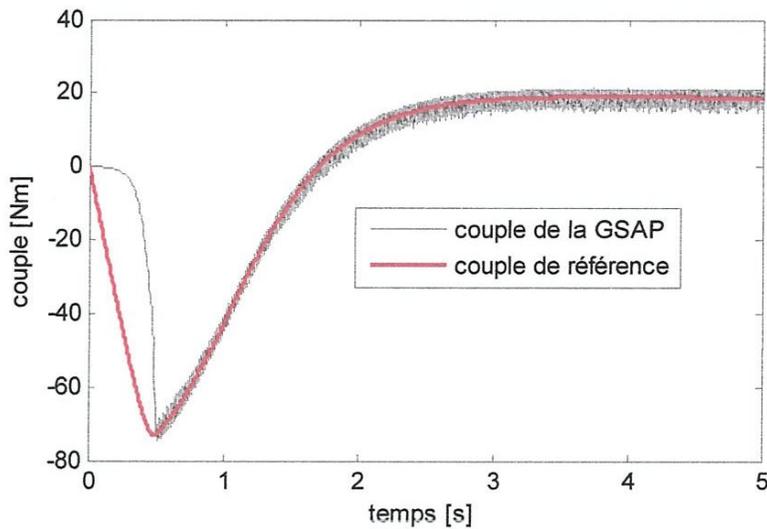


Figure III.16 : évolution du couple de la GSAP et sa référence

La figure III.17, montre l'évolution de la puissance développée par la turbine. Cette puissance varie avec la vitesse et elle se stabilise à sa valeur optimale de 977 W correspondant à la vitesse du vent 9 m/s.

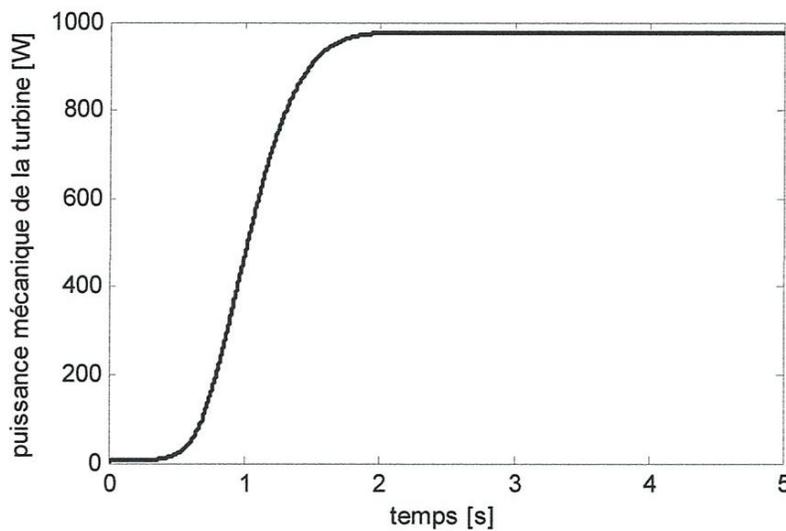


Figure III.17 : évolution de la puissance mécanique de la turbine

Enfin, nous pouvons dire que le contrôle de la chaîne de conversion (commande MPPT et commande vectorielle de la GSAP) a été étudié et simulé sous MATLAB Simulink avec succès.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, au début, les stratégies de commande des éoliennes, ensuite, une technique de commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » a été expliquée théoriquement et validée par simulation sur MATLAB/SIMULINK.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons expliqué théoriquement les aspects de la commande vectorielle de la GSAP qui permet de contrôler le couple électromagnétique développé la génératrice ce qui permet ensuite de régler la vitesse de l'éolienne pour assurer l'extraction de la puissance maximale.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail nous avons présenté une stratégie de contrôle d'une chaîne de conversion éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents et un redresseur à commande MLI pour alimenter une charge isolée.

En effet, nous avons commencé dans le premier chapitre par une étude générale des différentes structures d'éoliennes les plus utilisées. Ensuite, nous avons présenté globalement les différentes chaînes de conversion couramment utilisées dans les éoliennes à travers le monde. L'accent a été mis sur les chaînes basées sur la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) qui est l'élément principal de cette étude.

Dans le but de faire des simulations et de développer des stratégies de commande, nous avons consacré le deuxième chapitre à la modélisation mathématique de tous les composants de la chaîne de conversion, à savoir : la turbine, la GSAP, le redresseur à commande MLI et la charge du côté continu.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté brièvement les stratégies de commande des éoliennes et les classes des techniques de commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » qui permettent d'assurer une meilleure exploitation et un bon rendement de l'éolienne pour toutes les vitesses du vent. Ensuite, nous avons présenté les résultats, obtenus par simulation, d'une technique MPPT basée sur la caractéristique du coefficient de puissance et le réglage de la vitesse de la turbine. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle de la GSAP qui permet de contrôler le couple électromagnétique développé par la

génératrice, ce qui permet ensuite de régler la vitesse de l'éolienne pour assurer l'extraction de la puissance maximale.

Enfin, nous recommandons la poursuite des recherches sur la commande de la des chaînes de conversion des éoliennes qui est un aspect très important pour les industriels. Dans cet axe plusieurs améliorations peuvent être apportées à savoir :

- Développer d'autres techniques MPPT.
- Réduire les hypothèses simplificatrices de la turbine.
- Utiliser d'autres chaînes de conversion (ex : GSAP+Redresseur à diode + Hacheur).
- Réalisation sur site de la stratégie de contrôle proposée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. ABDELLI, «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». Thèse de doctorat soutenue le 15 octobre 2007, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE.
- [2] The Global Wind Energy Council, « GLOBAL WIND STATISTICS 2013 ».
- [3] <http://www.notre-planete.info/actualites/3949-declin-energie-eolienne-monde>].
- [4] B. Multon, « Ressources énergétiques renouvelables et solutions électriques». Préparation à l'agrégation de Génie Electrique 2010.
- [5] A. ABDELLI, «Modélisation et commande des génératrices éoliennes». Thèse de Magistère soutenue le 24 janvier 2008, Université MENTOURI de CONSTANTINE.
- [6] Dr. Cristian NICHITA, « Cours sur Chaîne de conversion électromécanique des éoliennes de petite puissance», Laboratoire GREAH Université du Havre, 2012.
- [7] Yassine Amirat, Mohamed Benbouzid, Bachir Bensaker, René Wamkeue, « The State of the Art of Generators for Wind Energy Conversion Systems», Electromotion, 2007, 14 (4), pp.163-172.
- [8] A. Akhilesh Kumar Gupta B. Himanshu Bhushan C. Paulson Samuel "Generator Topologies with Power Electronics Converters for a Wind Energy Conversion System: A Review", Conference: National Conference on "Recent Trends in Energy Systems (NCRTES-2013)"
- [9] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla «Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 - 161.
- [10] M. Mayouf, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents». Mémoire de Magistère soutenue le 03 février 2008, Université de Batna.

- [11] S. HAMECHA, «Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents». Mémoire de Magistère soutenue le 25/062013, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [12] DENOUN Hakim, «Contribution à L'étude et la Réalisation Des convertisseurs AC /DC à M.L.I à Facteur de Puissance Unitaire». Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [13] Morlaye Sekou CAMARA, Mamadou Baïlo CAMARA, Brayima AKYO, Hamid GUALOUS, «Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau». SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014, 8-10 JUILLET 2014, ENS CACHAN, FRANCE.
- [14] Duc Hoan Tran, «Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne "passive" : analyse de robustesse, validation expérimentale». Thèse de doctorat, soutenue le 27/06/2010, Université de Toulouse.
- .

Annexe

1. Paramètres et caractéristiques de la turbine [14]

Densité de l'air à 15°	$\rho_0=1.22 \text{ kg/m}^3$
Rayon du rotor	$R=1.25 \text{ [m]}$
Masse de la turbine	$M_t=34 \text{ [kg]}$
Inertie de la turbine	$J_t=1.5 \text{ [kg.m}^2\text{]}$
Coefficient de frottement	$f_t=0.025 \text{ [N.m.s.rad}^{-1}\text{]}$

Coefficient de puissance :

$$C_p(t) = -3.39 * 10^{-8} \lambda^7 - 4.21 * 10^{-6} \lambda^6 + 2.1 * 10^{-4} \lambda^5 - 3.1 * 10^{-3} \lambda^4 \\ + 1.64 * 10^{-2} \lambda^3 - 1.76 * 10^{-2} \lambda^2 + 1.74 * 10^{-2} \lambda \\ + 1.93 * 10^{-3}$$

2. Paramètres et caractéristiques de la GSAP

Résistance du stator :	$R_s=0.8 \Omega$
Inductances de l'axe d :	$L_d=0.0085 \text{ H}$
Inductance de l'axe q :	$L_q=0.0085 \text{ H}$
Inertie :	$J_g=0.0008 \text{ kg.m}^2$
Coefficient de frottement :	$f_g=0$
Nombre de pair de pôles :	$P=4$
Flux d'excitation	$\text{flux_ex}=0.18 \text{ Wb}$;

3. Paramètres de la charge

Résistance :	$R_{ch}=50 \Omega$
Inductance :	$L_{ch}=0.085 \text{ H}$
Condensateur de filtrage :	$C_f=0.2 \text{ F}$