

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
FILIERE DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité: Automatisation et Contrôle des Système Industriels

THÈME

Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne à base d'un générateur synchrone à aimants permanents.

Préparé par: DEBBA Souhila
KERBACHE Saadia

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
Mr BELHACEL Kheira	MAA	UT	Président
Mr BELABESS Belkacem	MAA	UT	Examineur
Mm OGAB Chahrazad	MCB	UT	Encadreur

PROMOTION 2015 /2016

Remerciement

Nous commençons par remercier et rendre grâce à Dieu pour nous avoir donné le courage et la volonté pour entamer ce travail.

*Nous tenons tout particulièrement à remercier notre encadreur **Mme OGAB Chahrazad**, Maître de conférences à l'université Ibn Khaldoun Tiaret pour nous avoir accueillis dans son équipe, et de nous avoir encadré dans ce travail, et qui nous a beaucoup soutenus durant cette année de recherche.*

Nous remercions très chaleureusement aussi les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail

*Nous adressons aussi nos chaleureux remerciements à Monsieur **ALLAOUI**, Professeur à l'université Ibn Khaldoun Tiaret. Sans oublier son assistant (Bouzid Amine).*

Enfin, nous remercions infiniment tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin durant la réalisation de ce travail et en particulier les membres de notre équipe de département de génie électrique.

Liste des figures

Figure. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	7
Figure. I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien	7
Figure. I.3 : technologie éolienne à axe vertical	10
Figure. I.4 : technologie éolienne à axe horizontale	12
Figure. I.5 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW	13
Figure.I.6 : d'une éolienne Enercon à entraînement direct	14
Figure I.7: Eolienne directement connectée au réseau	15
Figure I.8: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone	16
Figure I.9: Eoliennes à vitesse variable	17
Figure I.10: Caractéristique de la puissance générée	18
Figure.I.11: système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et convertisseur MLI	19
Figure.I.12 : système éolien basés sur la machine synchrone à rotor bobiné et redresseur à diodes	19
Figure. I.13: systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur hacheur et convertisseur	21
Figure. I.14 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP	22
Figure. I.15 : Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur	23
Figure. I.16 : Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur	23
Figure. I.17: Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor	24
Figure II.1: Structure générale de contrôle d'une éolienne	27
Figure II.2: Système mécanique de l'éolienne	28
Figure II.3 Cylindre d'air (théorie de Betz)	30
Figure II.4: schéma de la turbine éolienne	31
Figure II.5: Courbe caractéristique retenue pour notre étude.	31
Figure II.6: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	34
Figure II.7: Schéma bloc d'une turbine éolienne	35
Figure II.9: Schéma du modèle dynamique de la turbine.	35
Figure II.10: bloc de simulation de la turbine éolienne	36
Figure II.11: Système éolien à vitesse avec générateur synchrone à inducteur bobiné ou à aimant.	36
Figure II.12: Représentation schématique des enroulements de la GSAP selon (d, q).	38
Figure II.13: bloc de simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent	40

Figure II.14: Redresseur monophasé à diode	41
Figure II.15: Bloc de simulation d'un redresseur monophasé débitant sur une charge inductive.	42
Figure II.16: Schéma d'un pont de diodes	43
Figure II.17: Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale	44
Figure II.18: Modèle de simulation d'un pont de diodes en conduction normale sous Matlab/Simulink	45
Figure II.19: Schéma de l'onduleur triphasé	46
Figure II.20: Schéma synoptique d'un MLI	48
Figure II.21: bloc de simulation de l'onduleur de tension	48
Figure II.22: Modèle de la turbine sans régulation de la vitesse	49
Figure II.23 : Schéma bloc de la turbine Avec régulateur de la vitesse et MPPT	49
Fig III.1 Point MPP $C_{p_max} = c_p(\lambda_{nom})$.	53
Fig III.2 MPPT éolienne selon la puissance fournie.	54
Fig III.3 Algorithme : MPPT GSAP.	55
Fig III.4 Hacheur Survolteur-Dévolteur.	56
Fig III.5 Modèle éolien- SIMULINK	56
Figure (III.6) : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation	57
Figure III.7 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse	59
Figure (III .8): Schéma fonctionnel de régulation de vitesse	59
Figure III-9 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	61
Figure III.10 : schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique	62
Figure (III.11) : schéma de simulation de régulateur PI	62
Figure (III.12) : schéma de simulation de commande vectoriel	65
Figure III.13 : Allure de la vitesse de référence	65
Figure III.14: Résultats de simulation avec régulateur PI	66
Figure III.15: résultats de simulation de GSAP à vide	68
Figure III.16 : Allure des tensions statorique	69
Figure III.17: Allure de la tension V_d , V_q	70
Figure III.18: Allure de la puissance active p	71
Figure III.19: Allure de la puissance réactive Q	71

Sommaire

Liste des figures	2
Liste d'abréviation	3
Introduction générale	4
CHAPITRE I : L'apport de l'éolienne dans le contexte des énergies renouvelables	
I.1 Introduction	6
I.2 Définition de l'énergie éolienne	7
I.2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.2.1.1 Avantages	8
I.2.1.2 Inconvénients	9
I.3 Types des turbines éoliennes	10
I.3.1 Eolienne à axe vertical	10
I.3.1.a Avantages	10
I.3.1.b Inconvénient	11
I.3.2 Eoliennes à axe horizontal	11
I.3.2.a Avantages	12
I.3.2.b Inconvénients	12
I.4 Constitution d'une éolienne moderne	13
I.5 Fonctionnement d'une éolienne	14

I.6 Les éoliennes connectées au réseau	14
I.6.1 Les éoliennes à vitesse fixe	15
I.6.1.a Avantages du fonctionnement à vitesse fixe	16
I.6.1.b Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe	16
I.7 Les éoliennes à vitesse variable	16
I.7.1 Intérêt de la vitesse variable	17
1.8 Générateurs et topologies	18
1.8.1 Générateur synchrone	18
1.8.1.1 Générateur synchrone à rotor bobiné	18
1.8.1.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)	20
I.9 Différentes types de machines à Aimants	23
1.9.1 Machines à flux radial	23
I.9.2 Machines à flux axial	24
1.9.2.1 Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor	24
I.10 Conclusion	25
CHAPITRE II : Modélisation du système globale de la chaîne de conversion éolienne	
II.1 introduction	26
II.2 Fonctionnement d'une éolienne	27
II.2.1 Contrôle de la conversion d'énergie	27
II.2.2 Au niveau du générateur	27
II.2.3 Le système de commande d'un générateur	27
II.3 Système mécanique transmission de la puissance pour la modélisation mécanique de turbine	28

II.3.1 Les éléments du système mécanique complet	28
II.3.2 Modèle mécanique de la turbine	28
II.4 Énergie du vent récupérable	29
II.4.1 Théorie de Betz	29
II.4.2 Théorème d'Euler	30
II.5 Modélisation de la ressource	30
II.5.1 Production d'énergie mécanique	32
II.5.2 Le coefficient de puissance	32
II.5.3 Bloc de simulation de la turbine éolienne	36
II.6 Modélisation de la génératrice synchrone a aimants permanents	36
II.6.1 Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé	36
II.6.2 Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé	37
II.6.3 Modélisation biphasé en charge de la GSAP	39
II.6.4 Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique	39
II.6.5 Bloc de simulation de la GSAP	40
II.7 Convertisseur statique	40
II.7.1 Pont de diodes	40
II.7.2 Modèle du redresseur à diodes	40
II.7.3 Rappel sur les règles de conduction d'une diode	41
II.7.4 Modèle du redresseur monophasé à diode	41
II.7.5 Modélisation et simulation d'un pont de diode sans prise en compte de l'empiètement	43

II.7.6 Bloc de simulation du pont de diode	44
II.8 Onduleur de tension	45
II.8.1 Modélisation des onduleurs de tension	45
II.8.2 Contrôle du courant par MLI	47
II.8.3 Bloc de simulation de l'onduleur de tension	48
II.8.4 Modèle de la turbine en zone 2	49
II.8.5 Modèle de la turbine avec régulation de la vitesse	49
II.9 Conclusion	50
CHAPITRE III : Simulation du système globale de la chaîne de conversion éolienne	
III.1 Introduction	51
III.2 Architectures et méthodes de recherche du point maximum de puissance	52
III.2.1 Contrôle de la turbine éolienne	52
III.2.1.1 Généralités	52
III.3 Contrôleur MPPT	53
III.3.1 MPPT en mesurant la puissance de la turbine (méthode de GSAP)	54
III.4 simulation en Matlab/Simulink d'une turbine Eolien avec Contrôleur MPPT	56
III.5 Méthodes de recherche du point maximum de puissance	57
III.5.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne	58
III.5.1.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	58

III.5.1.1.2 Synthèse du régulateur	59
III.5.1.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	60
III.6 Elaboration de l’algorithme MPPT	62
III.7 BLOK de simulation de régulateur MPPT	62
III.8 Principe de la commande vectorielle	63
III.8.1 Variantes de la commande vectorielle	63
III.8.2 Procédé d’orientation du flux	64
III.8.2.1 Orientation du flux rotorique	64
III.8.2.2 Orientation du flux statorique	64
III.8.2.3 Orientation du flux magnétisant	64
III.8.2.4 BLOK de simulation de commande vectoriel	65
III.9 Résultat de simulation	65
III.9.1 Comportement de la turbine avec asservissement de vitesse	65
III.10 Machine synchrone à aimant permanent	67
III.10.1 BLOK de simulation de GSAP	67
III.10.2 Comportement de la GSAP entérinée par la turbine éolienne	69
III.10.3 La puissance active et réactive	70
III.11 Conclusion	72
Conclusion générale	73
Référence bibliographique	74
annexe	78



Introduction générale

Le développement d'énergie éolienne représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables. L'utilisation des aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques pour obtenir de l'électricité et cette source reste inépuisable. En outre, la production d'énergie éolienne a été de plus en plus acceptée par les investisseurs ainsi que les parcs éoliens sont en cours de construction, car ce secteur est devenu rentable. Le coût de l'énergie du vent a diminué au point où il y a des endroits que le prix de l'énergie éolienne est compétitif par rapport incitation [02].

L'énergie éolienne a non seulement un impact économique dans notre société, mais aussi un grand objectif environnemental et social. L'utilisation de cette énergie réduit les combustions des combustibles fossiles et des émissions conséquentes. Elle réduit également la dépendance des pays à la consommation du pétrole, en créant des emplois pour sa construction, son exploitation et son entretien. De nombreux travaux de recherche sur la commande éolienne ont été menés. Grâce à ces inventions, les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques ainsi que l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier un système éolien basé sur le générateur synchrone à aimants permanents à vitesse variable. Ce mémoire est donc constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale.

Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre de ce document. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production d'énergie renouvelable mondiale. Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée et développée. Ainsi on présentera brièvement l'historique et la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne, Puis nous nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composants d'un système éolien. Puis Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, des architectures de chaînes de conversion d'énergie sont cités en association avec les différents types de génératrices.

Le second chapitre porte sur la conception et la simulation par le logiciel Matlab-simulink d'un modèle de la turbine éolienne dont la structure est basée sur l'utilisation d'une machine

synchrone à aimants permanents ; vu les avantages qu'elle présente et qui peuvent être encore améliorés.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation de la commande de la chaîne de conversion éolienne qui doit trouver la puissance maximale pour chaque vitesse de vent, ce qui est équivalent à la recherche de la vitesse de rotation optimale, différentes stratégies seront décrites dans le but de suivre parfaitement la courbe de la puissance optimale.



Chapitre I

**Etat de l'art et situation d'éolienne dans le
contexte des énergies renouvelables**

I.1. Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal), [05] [06] [07] [08] [09].

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale,[10] puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies [11] [12] [13] [14] [15].

Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde [16] [17] [18] [19] [20], ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens [21] [22] [20]. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.2 Définition de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. I.1) [10].

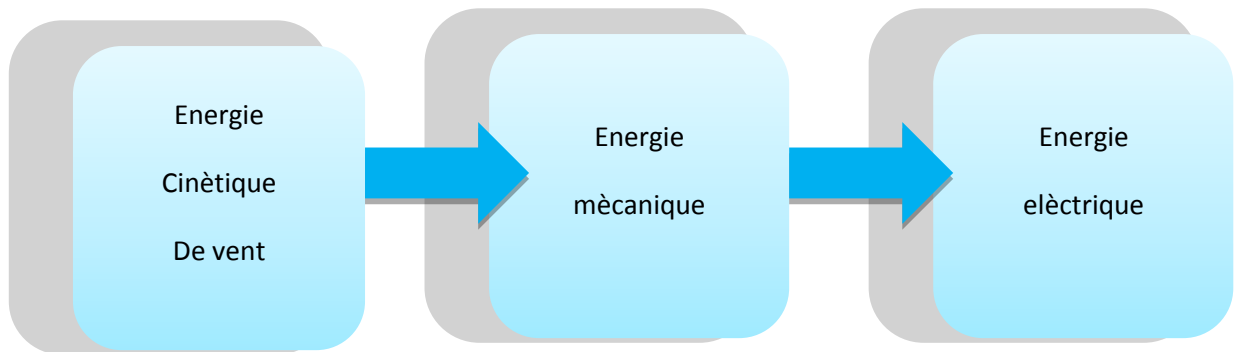


Figure. I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [10].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. I.2 [12].

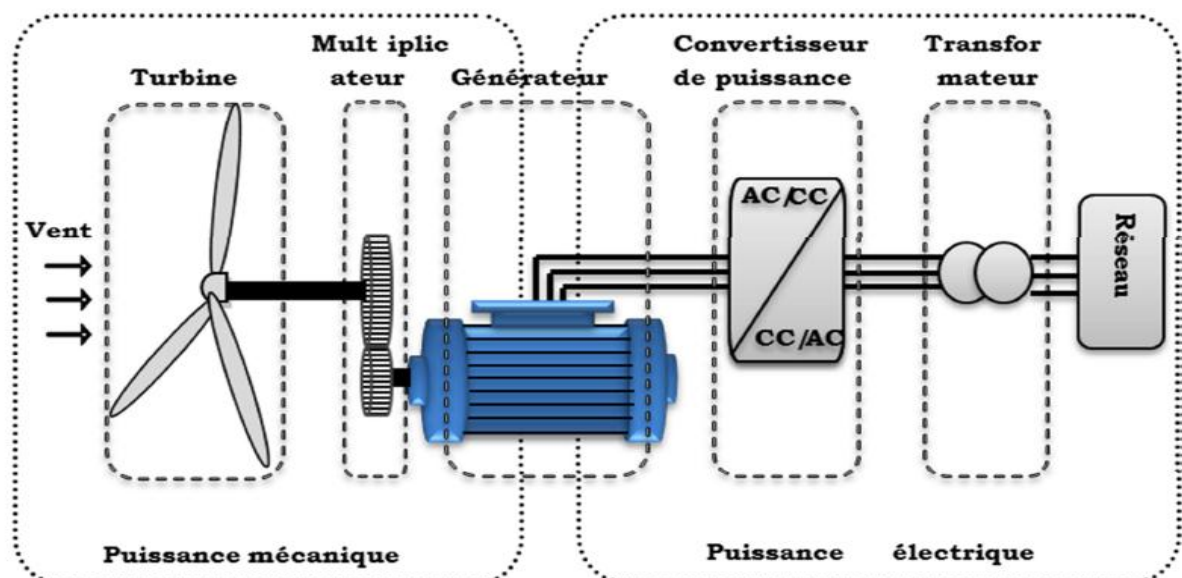


Figure. I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien [12].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, 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. Elle est toute fois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [10].

I.2.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

I.2.1.1 Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [21]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5C° d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [21]. Toutes les conséquences de l'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [21].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [21].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [21].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie de ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [21].
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [18].
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [18].

I.2.1.2 Inconvénients :

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

L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [21].

Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée [21].

L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [21] [15]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [21].

La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [21].

Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [21].

I.3.Types des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [09].

I.3.1. Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [09].

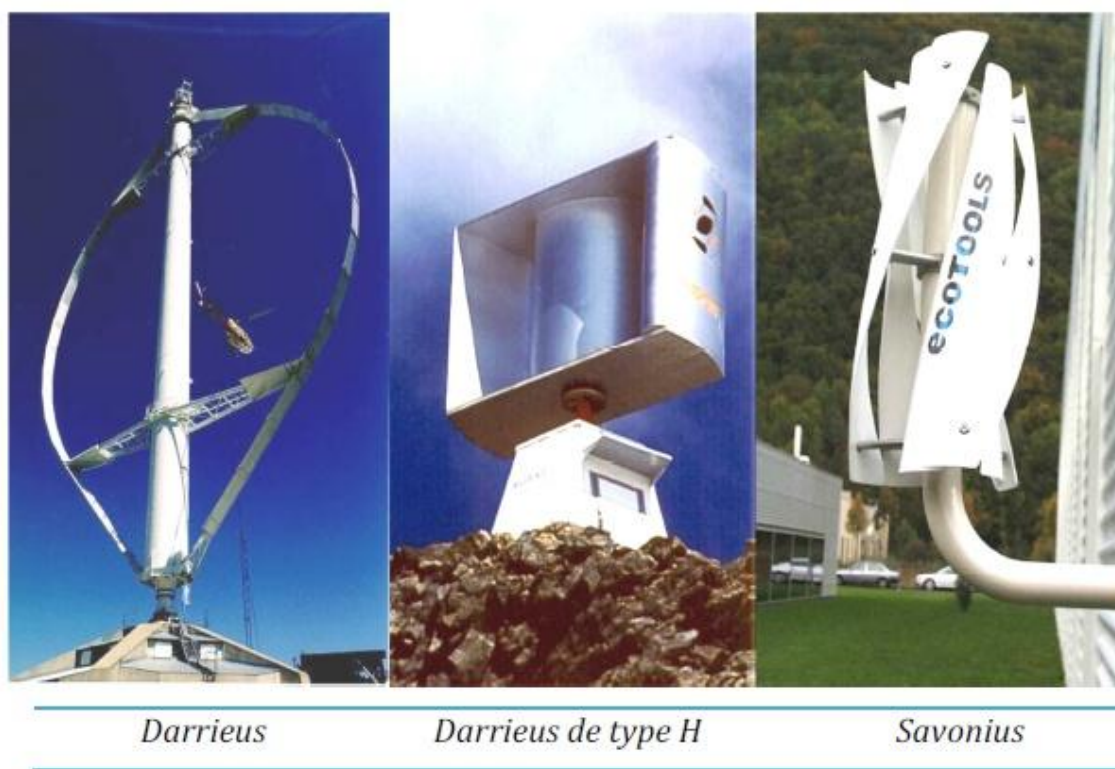


Figure. I.3 : technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [07] [09].

I.3.1.a. Avantages :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.

- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.3.1.b. Inconvénient :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés.

Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [09].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales [09].

I.3.2. Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [08] [09].



Figure. I.4 : technologie éolienne à axe horizontale.

I.3.2.a. Avantages :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.3.2.b. Inconvénients :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.

Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [09].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales [09].

I.4. Constitution d'une éolienne moderne :

Le schéma de la figure suivante représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [13].

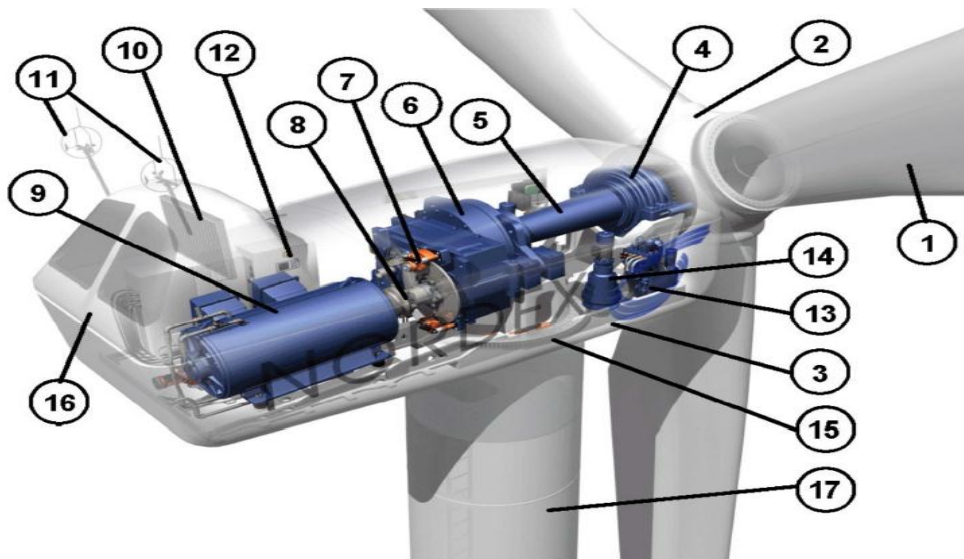


Figure. I.5 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW.

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque(7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.

Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique [17]. Le fabricant allemand Enercon propose ainsi toute une gamme de telles machines de 200 kW à 4,5MW (phase de pré-industrialisation). La Fig. I.6 montre le schéma de la nacelle d'une telle machine. Le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte. Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50 Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable [17].

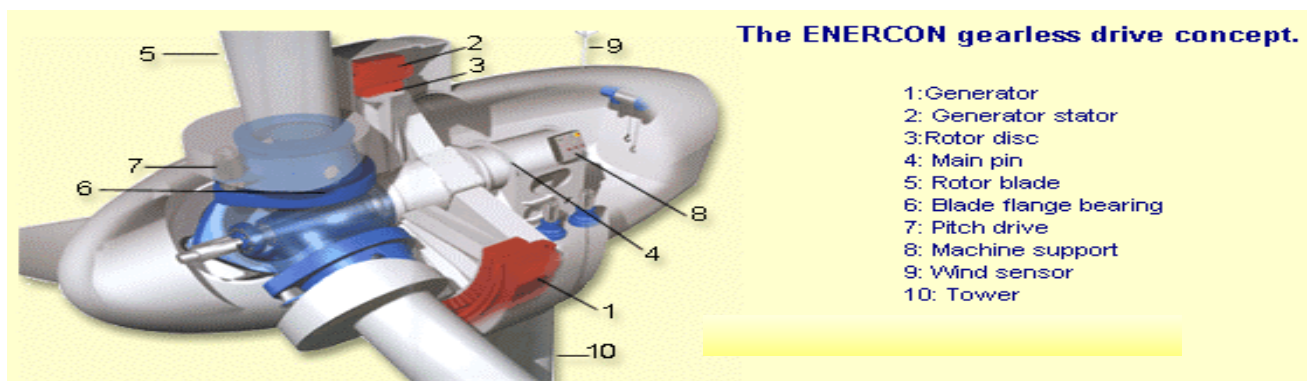


Figure. I.6 : d'une éolienne Enercon à entraînement direct, [17].

I.5. Fonctionnement d'une éolienne :

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

I.6. Les éoliennes connectées au réseau :

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". Bien que la première machine qui vient à l'esprit pour de tels systèmes soit la génératrice synchrone, cette dernière est caractérisée par la présence de la fluctuation du couple qui se propage jusqu'à la puissance électrique produite.

Cette génératrice connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur statique pour découpler la fréquence de réseau à la vitesse de rotation de génératrice synchrone. Cette génératrice est caractérisée par son bon rendement, adapté à la faible vitesse et son prix est plus élevé.

Le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt.

Sur le marché de l'industrie éolienne, on distingue deux technologies d'éoliennes, du point de vue vitesse de rotation : les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

I.6.1 Les éoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice figure (I.7).

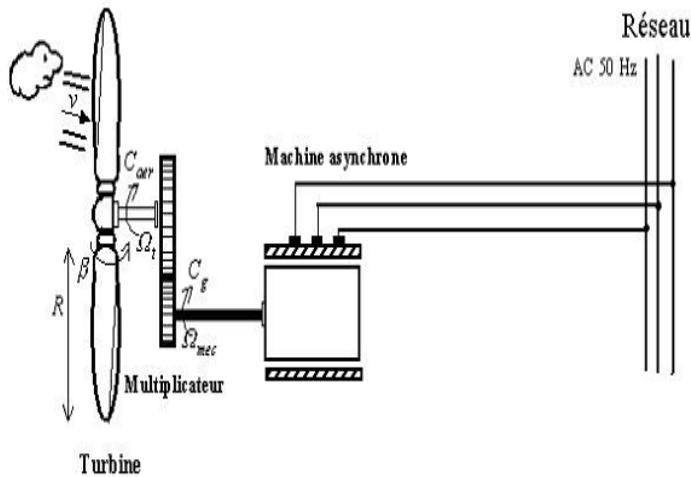


Figure. I.7: Eolienne directement connectée au réseau.

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique Ω_{mec} est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500\text{tr}/\text{min}$, ce

qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne figure (I.8) [02].

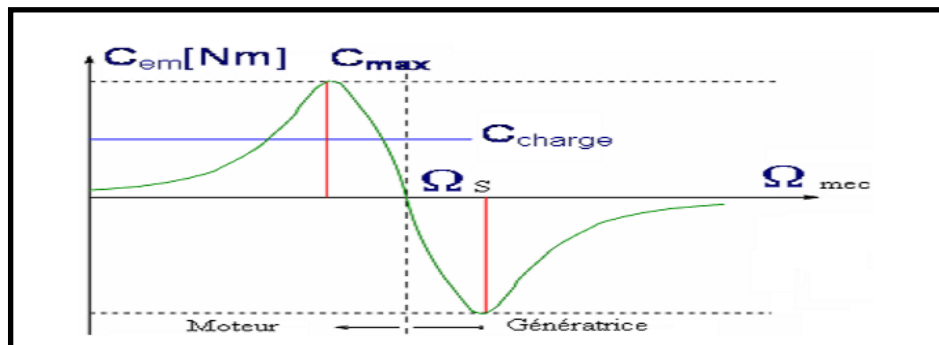


Figure. I.8: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.

I.6.1.a. Avantages du fonctionnement à vitesse fixe [01] :

Le fonctionnement à vitesse fixe présente les avantages suivants:

- ❖ Un système électrique plus simple.
- ❖ Une Plus grande fiabilité.
- ❖ Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ❖ L'absence de système électronique de commande.
- ❖ Un coût moins cher.

I.6.1.b. Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe [01] :

Néanmoins il possède les inconvénients suivants:

- ❖ La puissance extraite n'est pas optimisée.
- ❖ La maintenance de la boîte à vitesse.
- ❖ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur.
- ❖ La magnétisation de la machine non gérée.

I.7. Les éoliennes à vitesse variable :

La configuration de la figure (I.9.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure (I.9.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation

à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

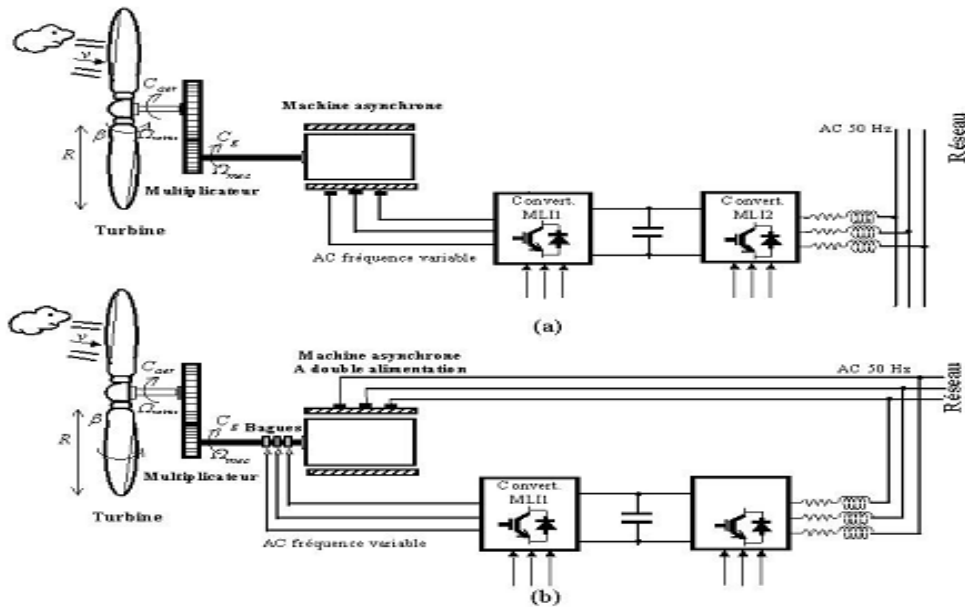


Figure I.9: Eoliennes à vitesse variable.

I.7.1. Intérêt de la vitesse variable :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.10).

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

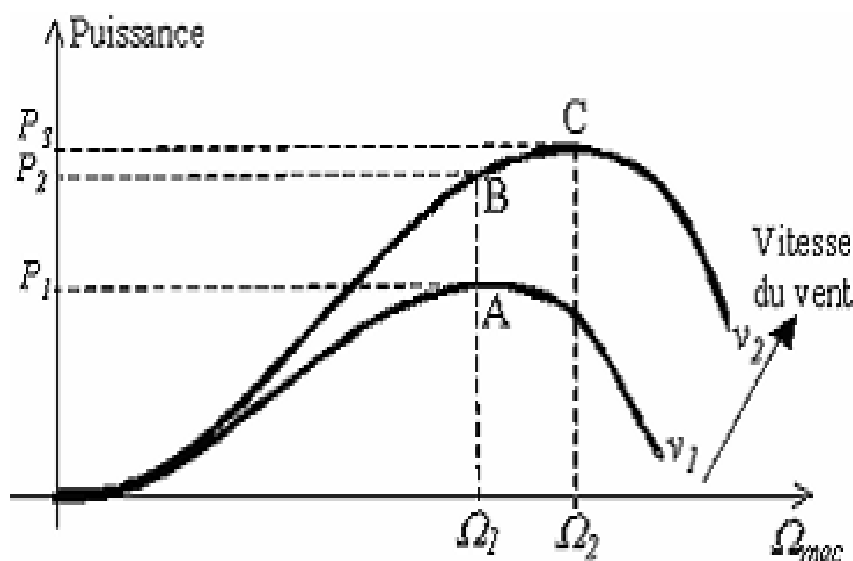


Figure I.10: Caractéristique de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

1.8. Générateurs et topologies :

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [23], [24]. On donne dans cette section les topologies importantes et leurs caractéristiques principales.

1.8.1 Générateur synchrone :

1.8.1.1 Générateur synchrone à rotor bobiné :

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires) [25], [23], [24]. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un

entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ce-ci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure 1-7, 1-8) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [23], [24].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Les sites isolés ne sont pas donc adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante.

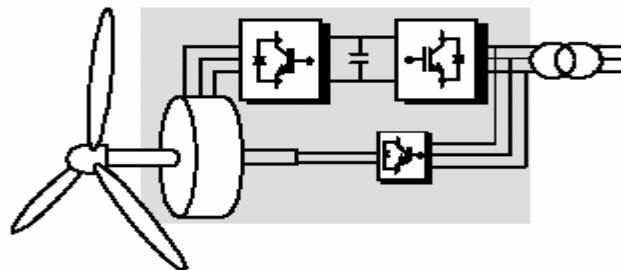


Figure.I.11: système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et convertisseur MLI [23]

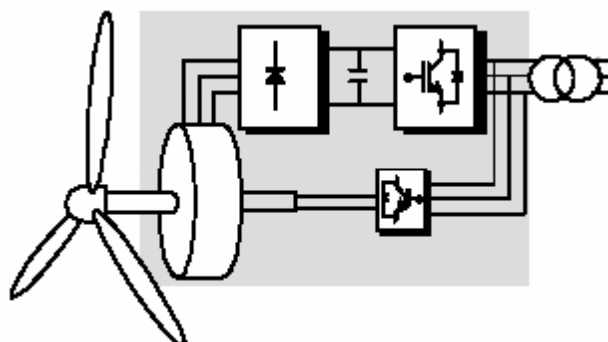


Figure. I.12 : système éolien basés sur la machine synchrone à rotor bobiné et redresseur à diodes [23]

1.8.1.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [26].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Fig. I.12). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [26].

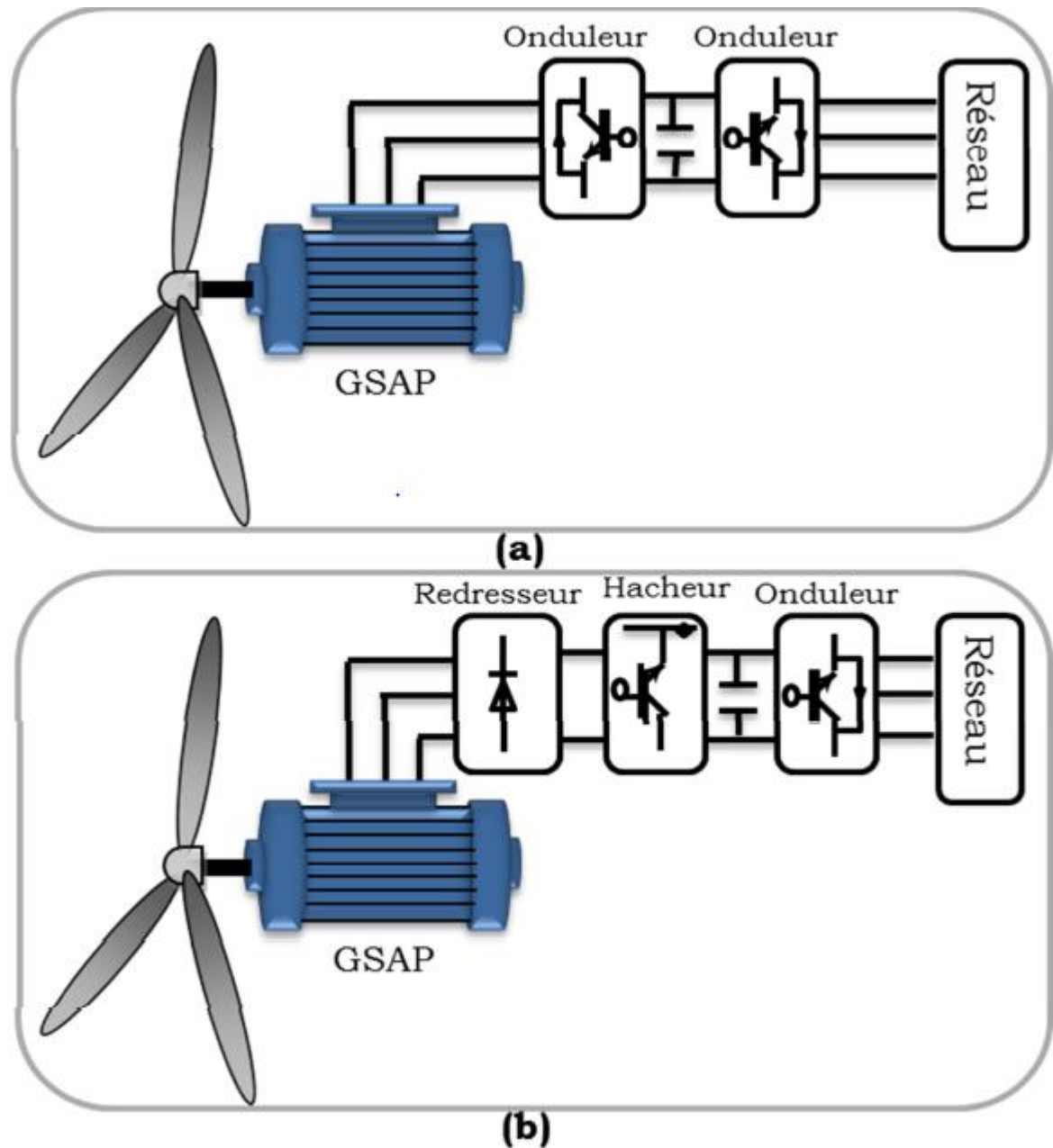


Figure. I.13: systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents (a) GSAP. avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [27].

Dans la configuration de la GSAP de la Fig. I.29-b, la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance [26].

L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW) [26].

Dans la configuration de la Fig. I.13-a, un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence [26]. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la Fig. I.14, un système à vitesse « Non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu [28].

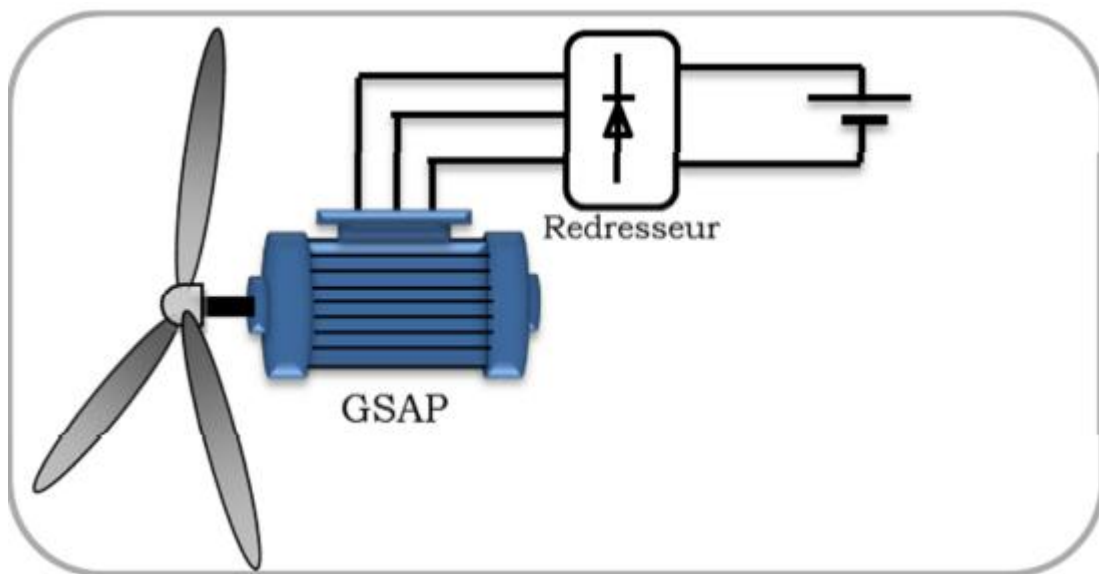


Figure. I.14 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP [28].

I.9. Différentes types de machines à Aimants :

1.9.1 Machines à flux radial :

Historiquement, la machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents apparue dans l'industrie. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la performance des aimants permanents, elle commence à supplanter la machine asynchrone. La première machine synchrone à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est reparti et les aimants places en surface (Fig. I.15). Dans la littérature, il est possible de la retrouver pour équiper un turbo compresseur (50 kW, 70000 tr/min, 8 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40 kW, 6000 tr/min, 4 pôles) (6 kW, 6000 tr/min, 12 pôles). Ces études ont permis de mettre en avant l'augmentation significative du rendement et de la puissance massique par rapport aux machines asynchrones. A l'heure actuelle, cette structure à aimants et simple entrefer sert fréquemment de moteur de référence dans l'optique d'une comparaison avec des moteurs innovants. L'inconvénient majeur de cette machine est l'emplacement des aimants. En effet, en les mettant en surface, les applications à haute vitesse sont difficiles [29].

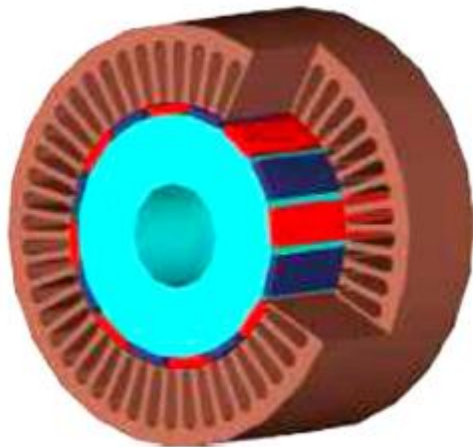


Figure. I.15 : Machine synchrone à aimants avec rotor extérieur.

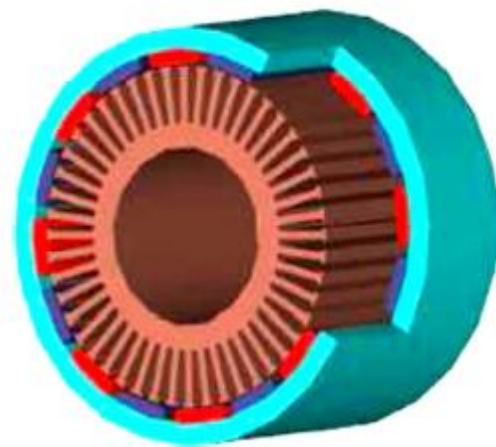


Figure. I.16 : Machine synchrone à aimants avec rotor intérieur

C'est pourquoi, pour diminuer le risque de décollement des aimants, le rotor de la machine peut être placé à l'extérieur du stator (Fig. I.16). Ainsi, les aimants en surface sont plaqués sur le rotor grâce à l'effet de la force centrifuge. Dans certains cas, le rotor à l'extérieur permet d'incorporer le système électrique dans le système mécanique. Il permet également de fixer

des pales directement sur le rotor pour des applications à la ventilation. L'application éolienne (20kW, 210 tr/min, 36 pôles) et ascenseur en sont également de bons exemples. Néanmoins, l'encombrement de ces machines augmente et les problèmes mécaniques sont plus nombreux.

I.9.2 Machines à flux axial :

1.9.2.1 Machines à flux axial à 1 stator et 1 rotor :

La première machine à flux axial apparue est une structure comprenant un rotor et un stator. Le fonctionnement de ce type de machine est basique car il ne fait intervenir qu'un stator et un rotor. Le flux créé par un bobinage reparté classique présent au stator va interagir avec le flux créé par les aimants permanents collés en surface du rotor pour créer une énergie électromagnétique et donc un couple électromagnétique (Fig. I.17). Malgré sa simplicité de conception, cette machine accuse de forts problèmes d'attraction entre stator et rotor imposant des ajouts mécaniques lourds et coûteux [29].

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

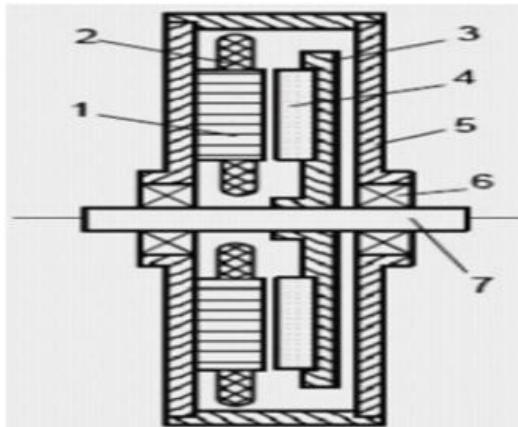


Figure. I.17: Descriptif de la machine à flux axial 1 stator / 1 rotor.

I.10. Conclusion :

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique sur le développement des éoliennes et leur introduction progressive dans le marché mondial et local de l'énergie électrique. Puis nous nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composants d'un système éolien. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur les techniques de contrôle des différentes structures. Après nous avons examiné les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans le chapitre suivant à la conception et la simulation d'un modèle de la turbine éolienne. La structure à base d'une machine synchrone à aimants permanents a tiré notre attention vu les avantages qu'elle présente et qui peuvent être encore améliorés, c'est la raison pour laquelle nous allons consacrer le reste de ce mémoire pour l'étude de cette structure.



Chapitre II

**Modélisation du système globale de la
chaîne de conversion éolienne**

II.1 INTRODUCTION :

Pour avoir un modèle globale de la chaîne de conversion, il est nécessaire de modéliser individuellement, chaque élément constituant ce système.

Dans ce chapitre nous allons proposer un modèle du vent qui va être la source d'énergie qui entraînera notre turbine, La turbine tri pale qui récupère l'énergie du vent et la transforme en énergie mécanique disponible sur le rotor, une des pièces maîtresses d'un système de conversion d'énergie dédié à une éolienne est la génératrice, les machines utilisées dans ces systèmes sont de construction spécifique, bien adaptées aux besoins particuliers de ce domaine. [37]

A chaque type de voilure, correspond une conception de la machine électrique. Elle dépend aussi de l'électronique de puissance en aval.

II.2 Fonctionnement d'une éolienne :

II.2.1 Contrôle de la conversion d'énergie :

Les conditions de fonctionnement d'une turbine éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible, On ne peut agir qu'en limitant, parfois de manière optimale dans certaines conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique avant le transfert vers le réseau.

Le contrôle de puissance fournie par le système peut se faire; à chacun des deux niveaux de conversions de l'énergie; suivant les conditions de fonctionnement ([5]).

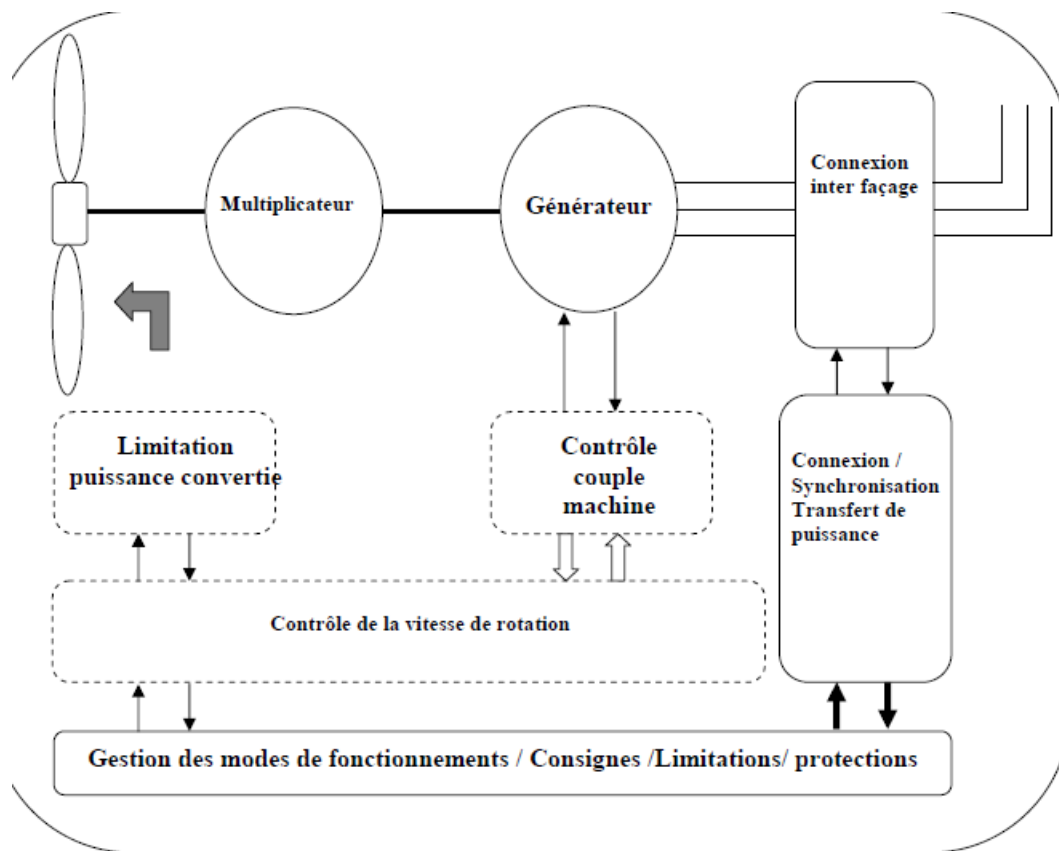


Figure II.1: Structure générale de contrôle d'une éolienne.

II.2.2 Au niveau du générateur :

En particulier pour les structures à vitesse variable que l'on verra plus loin. Ceci permet par exemple d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens, et de contrôler les grandeurs affectant directement le fonctionnement du générateur (courant, vitesse), ou les contraintes de fonctionnement du système (tension de bus continu, courant dans un système d'interfaçage au réseau).

II.2.3 Le système de commande d'un générateur :

Il peut être décomposé en deux niveaux fonctionnels

- ❖ Les systèmes de contrôle des grandeurs physiques et les surveillances et protection Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement de la grandeur des valeurs des consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.
- ❖ Le système de gestion des modes de fonctionnement, d'élaboration des lois consigne et de gestion des protections.

II.3 Système mécanique transmission de la puissance pour la modélisation mécanique de turbine :

La puissance captée par la turbine est transmise à la génératrice dans le cas où cette génératrice est une machine, un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

II.3.1 Les éléments du système mécanique complet :

- _ Les pales (généralement au nombre trois)
- _ Le moyeu sur lequel sont montées les pales avec une possibilité de rotation dans le cas où l'angle de calage est réglable.
- _ L'axe lent sur lequel est fixé le moyeu
- _ Le multiplicateur de vitesse (sauf pour les systèmes à attaque directe) de rapport N
- _ L'axe rapide dans le cas où le multiplicateur est présent sur lequel est couplé le rotor de la génératrice.

II.3.2 Modèle mécanique de la turbine :

Le modèle qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur **R**. elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{tur} qui est relié à un multiplicateur de gain **M**, ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique

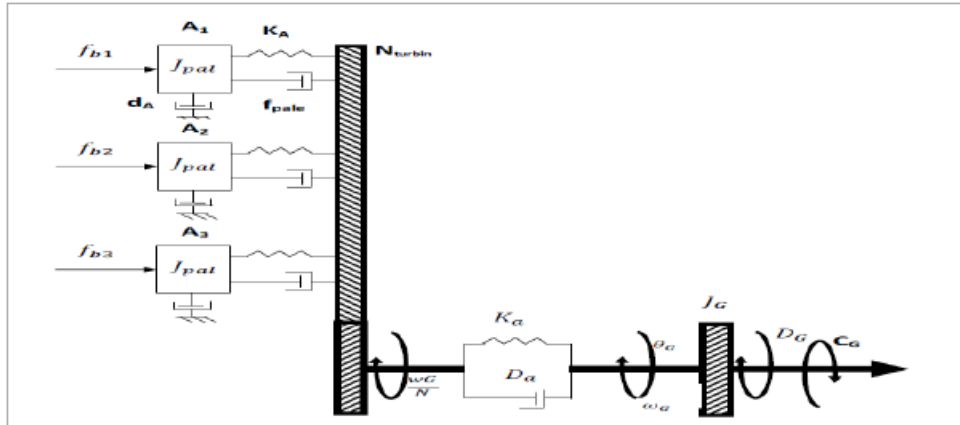


Figure II.2: Système mécanique de l'éolienne.

Avec :

f_{b1}, f_{b2}, f_{b3} : les forces qui dépendent de la vitesse de vent

A_1, A_2, A_3 : les vitesses d'orientation de chaque pale

J_{pat} : le même moment d'inertie

K_A : la même élasticité

d_a : le coefficient de frottement par rapport à l'aire

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

J_a : son inertie d'arbre

k_a : son élasticité

D_a : son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur d_a .

Le rotor de la génératrice comprend :

Une inertie J_g et un coefficient de frottement D_g

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$\Delta C = C_{eol} - C_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \tag{II.1}$$

D'où, après le réarrangement des termes, la valeur de la vitesse obtenue par :

$$\Omega = \frac{1}{J} \int (\Delta C - C_f) dt \tag{II.2}$$

Où : $C_f = f\Omega$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne basé sur cette équation est donné par la figure (II.2).

II.4 Énergie du vent récupérable :

Malgré la divergence très importante des données, il semble que l'on puisse considérer que l'énergie éolienne récupérable est de l'ordre de grandeur de la consommation d'énergie éolienne de l'humanité si non dans l'état actuel, au moins dans un avenir proche. Si l'énergie éolienne est avec celle des courants des fleuves et rivières, une forme d'énergie naturelle utilisées le plus tôt dans l'histoire de l'humanité, c'est sans doute par ce quelle est facile à utiliser et a cause de la disponibilité assez bonne du vent.

Avant de parler de la disponibilité et de la répartition d'énergie, il faut d'aborde savoir comment chiffrer cette énergie, celle ci est disponible sous forme d'énergie cinétique contenue dans le vent.

II.4.1 Théorie de BETZ :

La théorie globale du moteur éolien a été établi par Betz, il suppose que les pales sont placées dans l'air animé à l'infini amont d'une vitesse v_1 et a l'infini aval d'une vitesse v_2

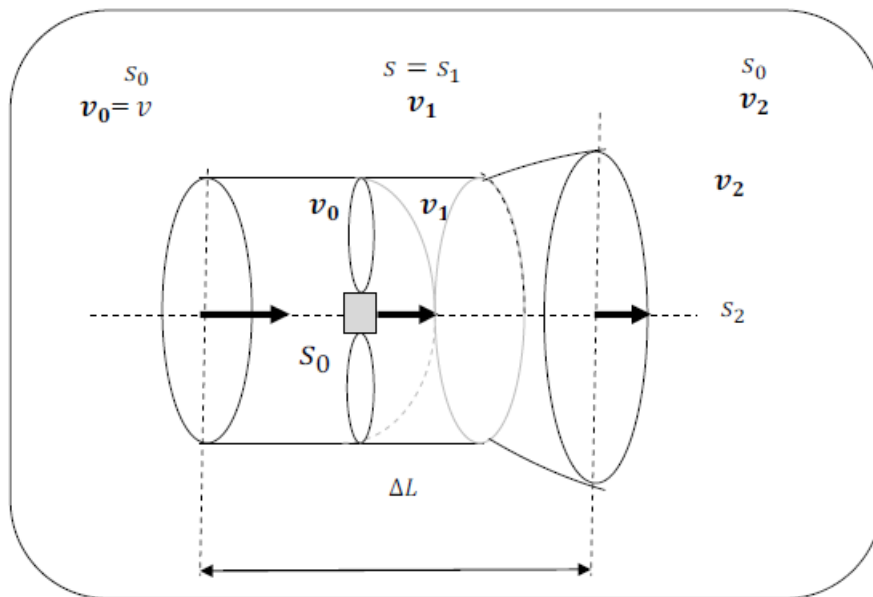


Figure II.3 : Cylindre d'air (théorie de Betz)

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur. On supposera l'air incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$s_0 v_0 = s_1 v_1 = s_2 v_2$$

II-1

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force F s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho s_1 v_1 (v_0 - v_2) \quad \text{II-2}$$

II.5. Modélisation de la ressource :

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, les coefficients de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine.

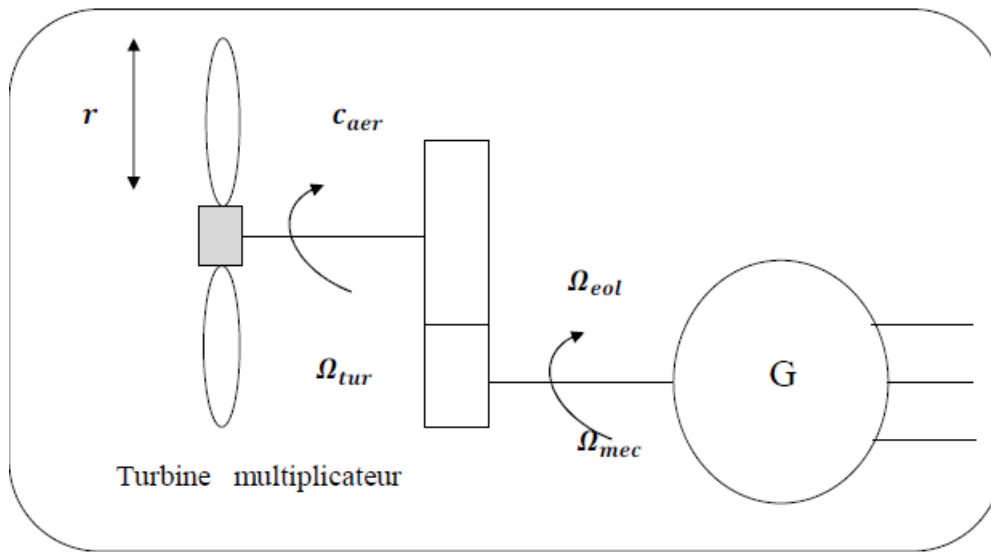


Figure II.4 : Schéma de la turbine éolienne

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Il peut avantageusement s'exprimer en fonction de λ , la vitesse spécifique ou normalisée.

λ est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_1} \quad \text{(II.3)}$$

II.5.1 Production d'énergie mécanique :

La puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [32]:

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad \text{(II.4)}$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_{\text{mec}}}{G \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{II.5})$$

Avec:

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

β : Angle d'inclinaison des pales [°].

ρ : Densité de l'air.

R : Longueur de la pale.

V_1 : Vitesse du vent.

Ω_{turbine} : Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

G : Rapport du multiplicateur.

$$G = \frac{\Omega_{\text{mec}}}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (\text{II.6})$$

II.5.2 Le coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ puisqu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine. Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature [9], ou par des constructeurs de turbines éoliennes [32].

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés. L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [9] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda_i \quad (\text{II.7})$$

Dans cette formule, le paramètre λ_i dépend également de λ et β

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.8})$$

Les six coefficients définis, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ dépendent de la turbine considérée sont présentés dans le tableau suivants [32]:

Coefficient	Valeur
C_1	0.5176
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

Tableau II.1: Coefficients définissant l'évolution de C_p .

La figure (II.5) représente le coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation (II.7), en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal λ_{opt} à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. Cette figure montre le λ_{opt} correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{opt}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation (II.3). Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement) [32].

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe.

Sur cette figure, plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt}=8.1$, $C_{p\ max}=0.48$ et $\beta=0^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée [32].

Nous remarquons que l'augmentation β de permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

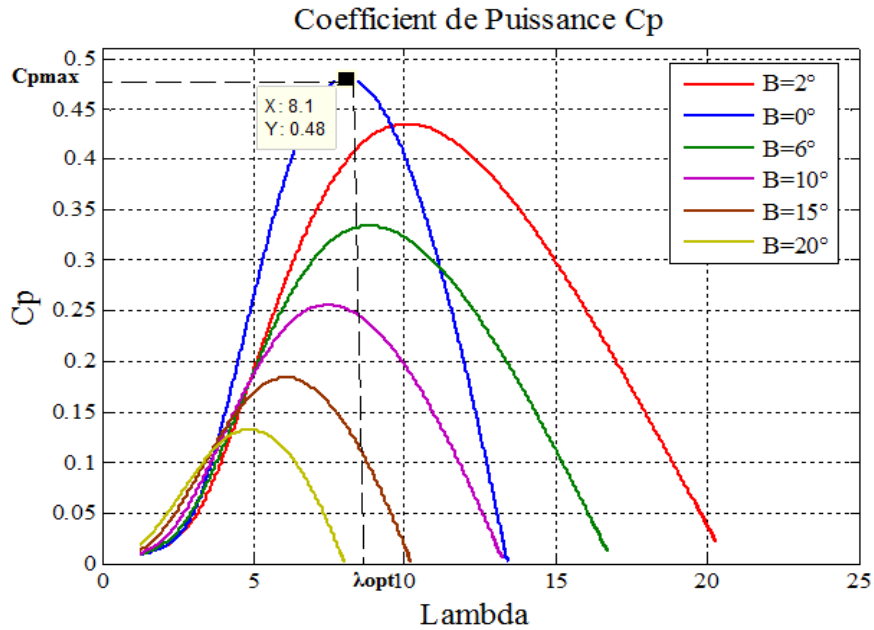


Figure : II.5 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β .

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par [2]:

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \tag{II.9}$$

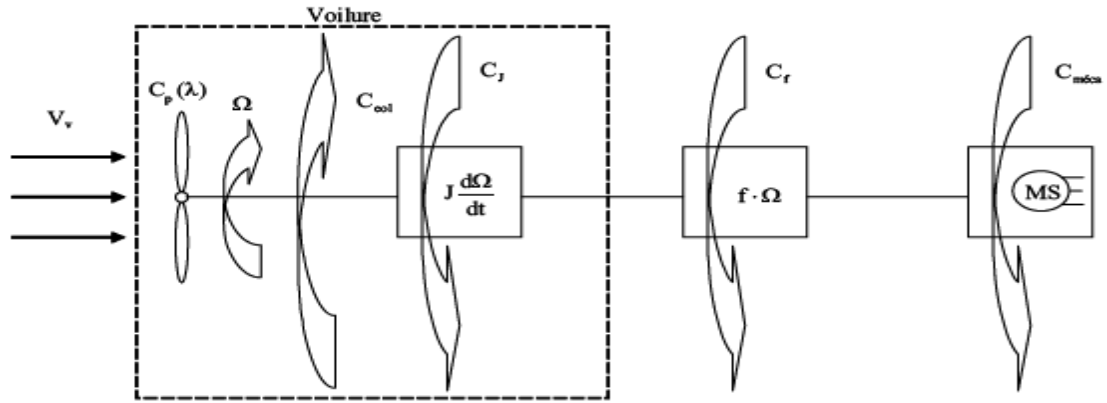


Figure II.8 : Schéma bloc d'une turbine éolienne.

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne basé sur l'équation II.9 est donné par la figure suivante :

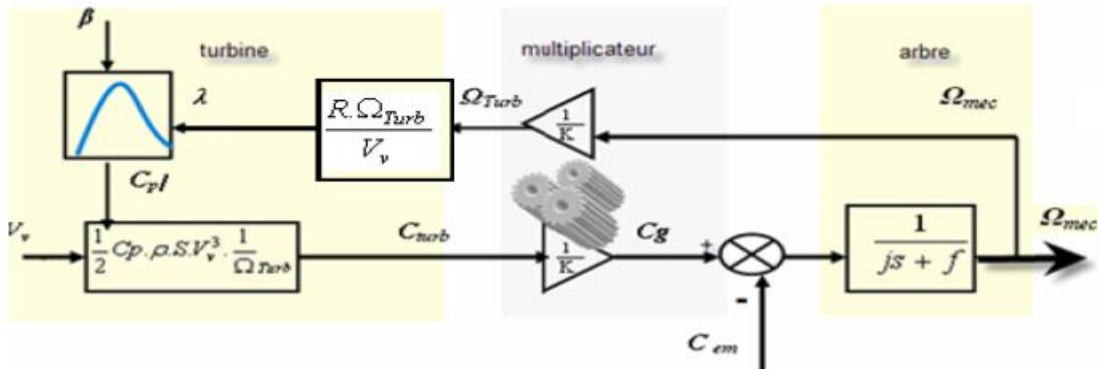


Figure II.9 : Schéma du modèle dynamique de la turbine.

II.5.3. Bloc de simulation de la turbine éolienne :

Pour la simulation de la turbine il suffit d'implanter le modèle mathématique de la turbine sous l'environnement Matlab/Simulink.

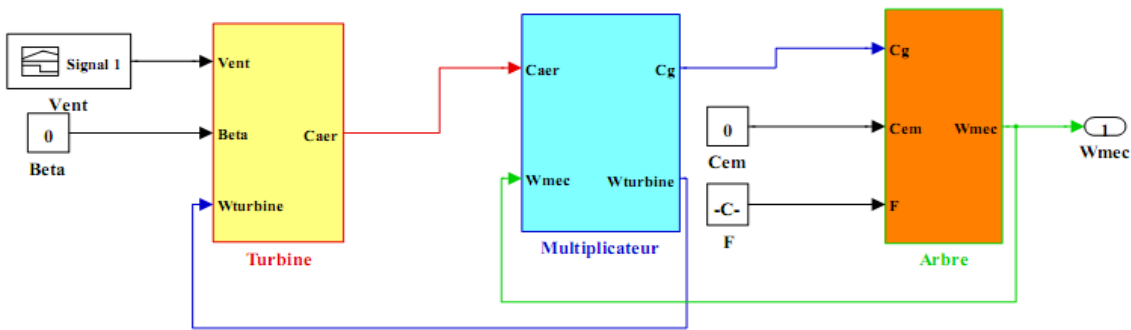


Figure II.10 : Bloc de simulation de la turbine éolienne

II.6 modélisation de la génératrice synchrone a aimants permanents

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, le rotor peut être bobiné ou à aimants, dans notre, le bobinage du rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation. [18]. La figure II.11 représente le schéma d'une chaîne de conversion utilisant la génératrice synchrone [29].

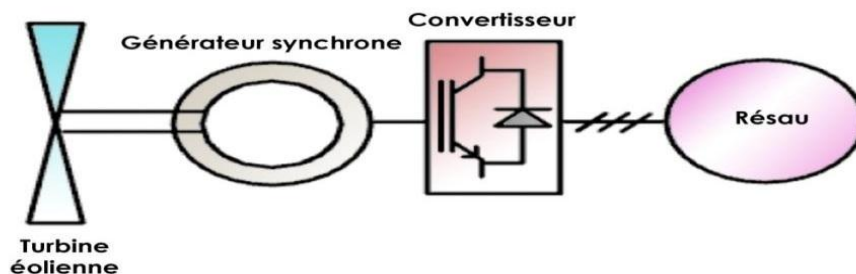


Figure II. 11 : Système éolien à vitesse avec générateur synchrone à inducteur bobiné ou à aimant.

II.6.1 Modèle mathématique de la GSAP dans le référentiel généralisé :

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents nécessite l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices, car cela permet une étude et une exploitation plus aisées. Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs [29].

- La saturation du circuit magnétique est négligée ;
- La distribution sinusoïdale des f.m.m créés par les enroulements statoriques ;

- L'effet d'encochage est négligé ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température ;
- L'hystérésis, l'effet de peau et les courants de Foucault sont aussi négligés.

II.6.2 Modèle biphasé de la GSAP dans le référentiel généralisé :

La modélisation de cette machine nécessite aussi comme toute autres machines triphasées de passer du système d'axes triphasés (réel) au système d'axes biphasés (et réciproquement). Pour cela il faut utiliser les transformations de Park suivantes

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\Theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{II.10}$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\Theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad \text{II.11}$$

Où :

x_a, x_b, x_c : les valeurs instantanées des grandeurs triphasées ;

x_d, x_q : les valeurs instantanées des grandeurs biphasées ;

x_o : la composante homopolaire;

$[P(\theta)]$: la matrice directe de Park;

$[P(\Theta)]^{-1}$: la matrice inverse de Park.

Les matrices de Park modifiées (matrices orthogonales) sont données ensuite :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.13}$$

Avec θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé.

La figure II.12 représente schématiquement les enroulements de la GSAP selon le repère de Park généralisé (d,q) [29].

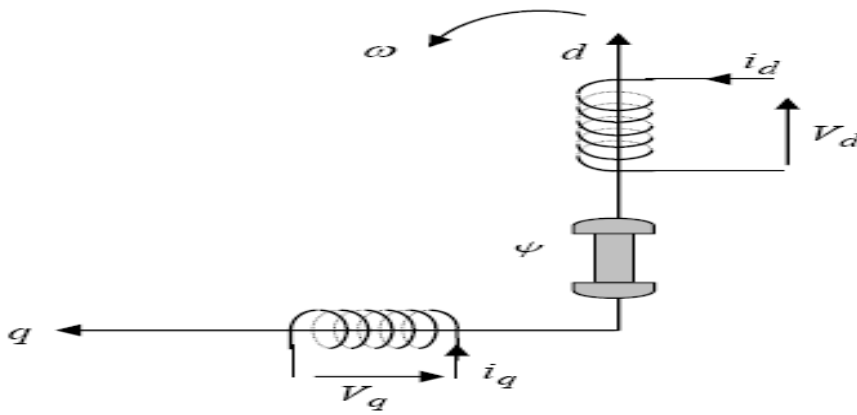


Figure II.12 : Représentation schématique des enroulements de la GSAP selon (d, q).

Les systèmes d'équations différentielles de la GSAP suivant le référentiel de Park généralisé sont [29] :

1. Equations électriques :

$$V_d = R_s i_d - \frac{d}{dt} \Psi_d + \omega \Psi_q \quad \text{II.14}$$

$$V_q = R_s i_q - \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega \Psi_d$$

2. Equations des flux magnétiques :

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \quad \text{II.15}$$

$$\Psi_q = L_q i_q$$

II.6.3 Modélisation biphasé en charge de la GSAP :

Dans notre cas d'étude nous allons modéliser la génératrice en charge, pour cela on suppose que la génératrice alimente une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}), Pour avoir les tensions et courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les tensions données par

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \cdot \omega \cdot i_q$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \cdot \omega \cdot i_d + \Psi_f \cdot \omega \quad \text{II.16}$$

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne :

$$V_d = -R_{ch} i_d - L_{ch} \frac{di_d}{dt} + L_{ch} \cdot \omega \cdot i_q \quad \text{II.17}$$

$$V_q = -R_{ch} i_q - L_{ch} \frac{di_q}{dt} - L_{ch} \cdot \omega \cdot i_d$$

En remplaçant l'expression de V_d et V_q dans (II.17), on aura le système suivant :

$$-(R_s + R_{ch})i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{di_d}{dt} + \omega(L_q + L_{ch})i_q = 0 \quad \text{II.18}$$

$$-(R_s + R_{ch})i_q - (L_d + L_{ch}) \frac{di_q}{dt} - \omega(L_q + L_{ch})i_d + \Psi_f \cdot \omega = 0$$

En introduisant la transformation de Laplace dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$p i_d = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})i_d + \omega(L_q + L_{ch})i_q] \quad \text{II.19}$$

$$p i_q = \frac{1}{(L_q + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})i_q + \omega(L_d + L_{ch})i_d + \Psi_f \cdot \omega]$$

Où p : Opérateur de la place

2.6.4 Expressions du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique :

Pour compléter le modèle électromécanique de la GSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique. L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(L_q - L_d)i_q \cdot i_d + \Psi_f \cdot i_q] \quad \text{II.20}$$

L'équation mécanique est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} - f\Omega = C_m - C_{em} \quad \text{II.21}$$

II.6.5 Bloc de simulation de la GSAP :

Pour la simulation, il suffit à présent d'implanter le modèle de la GSAP sous l'environnement Matlab/Simulink.

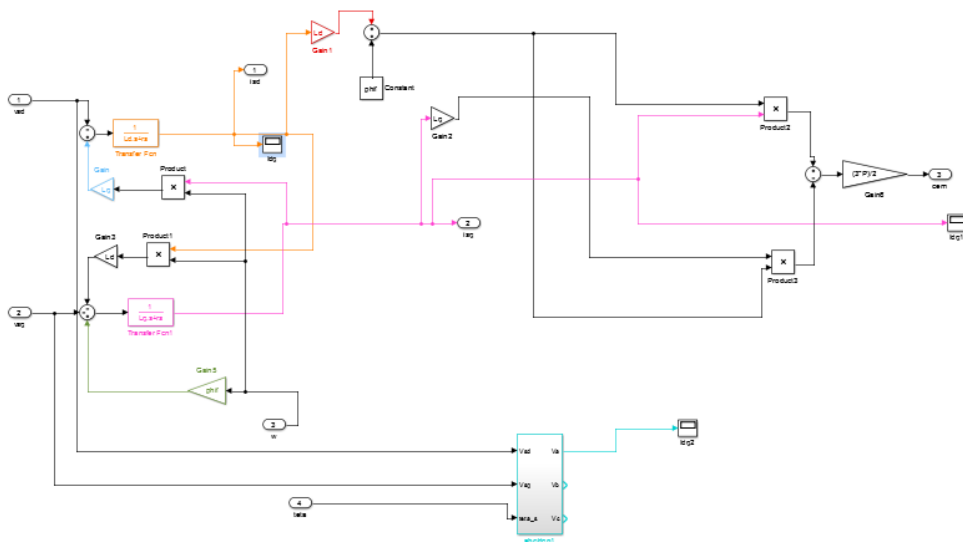


Figure II.13 : Bloc de simulation de la génératrice synchrone à aimant permanent.

II.7 convertisseur statique

La génératrice synchrone fournit une tension alternative à fréquence variable, pour assurer une tension alternative à fréquence fixe l'insertion d'un convertisseur statique est obligatoire, dans notre cas d'étude on a utilisé un pont de diode pour avoir une tension continue suivie d'un filtre RL. Un onduleur triphasé à GTO commander par MLI est raccordé au redresseur.

II.7.1 Pont de diodes :

Les convertisseurs statiques utilisés couramment dans les chaînes de conversion d'énergie dédiées aux systèmes éoliens, sont basés sur des modules entièrement commandés qui leur rend coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées.

II.7.1.1 Modèle du redresseur à diodes

Nous allons commencer par modéliser un redresseur monophasé à diode sur charge R, L [17].

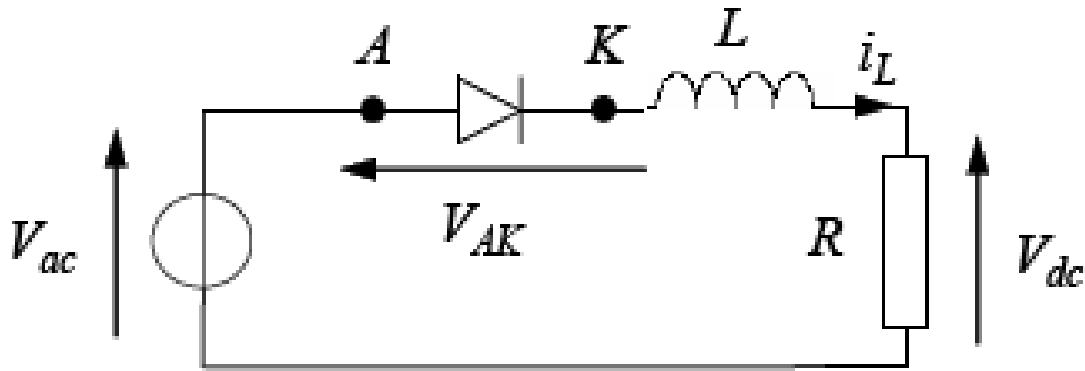


Figure II.14: Redresseur monophasé à diode.

II.7.1.2 Rappel sur les règles de conduction d'une diode

Une diode se met à conduire lorsque la tension anode-cathode devient positive ($V_{AK} > 0$). Lorsqu'elle est conductrice, la tension à ses bornes est nul (cas d'une diode parfaite) ou plus généralement égale à une valeur de seuil U_{d0} (typiquement comprise entre 0.5 et 1 V). Cette valeur reste toutefois négligeable devant les autres chutes de tension dans le circuit. Le courant dans la diode est alors imposé par le reste du circuit. Une diode se bloque lorsque le courant anode-cathode qui la traverse s'annule ($i_{AK} = 0$). La tension anode-cathode est alors imposée par le reste du circuit.

II.7.1.3 Modèle du redresseur monophasé à diode

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance

$$i_L = \frac{1}{L} \int v_L \quad \text{II.22}$$

Où la tension V_L aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction c de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ($C = 1$), on a :

$$V_L = 0$$

Ainsi, de façon générale, en fonction de l'état de conduction c de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = C(V_{ac} - V_{dc}) \quad \text{II.23}$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance,

$$V_{dc} = R i_L$$

L'équation (II.23) devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int C(V_{ac} - R_{il}) dt \quad \text{II.24}$$

Reste à établir l'état de conduction c de la diode. A partir des règles élémentaires évoquées précédemment en début du paragraphe, nous pouvons dire que la diode est conductrice ($c = 1$) si et seulement si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \quad \text{ou} \quad i_L > 0$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons $V_{AK} = V_{ac} - V_{dc}$. Le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode $i_L = i_{AK}$ reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédente n'est pas remplie, la diode est bloquée ($c = 0$). En exploitant les relations précédentes, nous déduisons le modèle du redresseur monophasé présenté sur la Figure (2.15).

On remarque que le fait de traduire à la fois la tension aux bornes de l'inductance et la condition de conduction en fonction de la tension $V_{ac} - V_{dc}$ permet de simplifier le modèle Simulink par l'utilisation d'un seul multiplexeur qui calcule simultanément c et V_L [38].

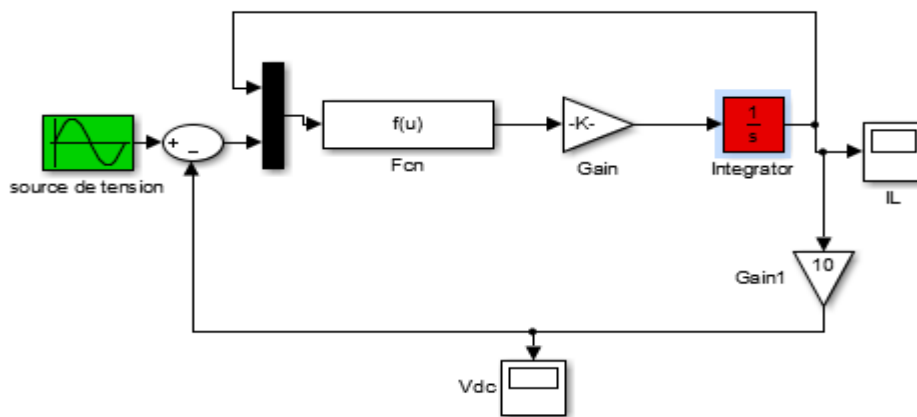


Figure II.15 : Bloc de simulation d'un redresseur monophasé débitant sur une charge inductive.

II.7.1.4 Modélisation et simulation d'un pont de diode sans prise en compte de l'empiétement

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, et débitant sur une batterie supposée idéale. Dans un premier temps, on considère que l'impédance de la source est nulle.

Dans ce cas, les courants de ligne I_a , I_b et I_c prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu I_{dc} . Chaque diode assure la conduction du courant pendant $1/3$ de la période. Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur I_{dc} lorsqu'une diode devient conductrice. [38].

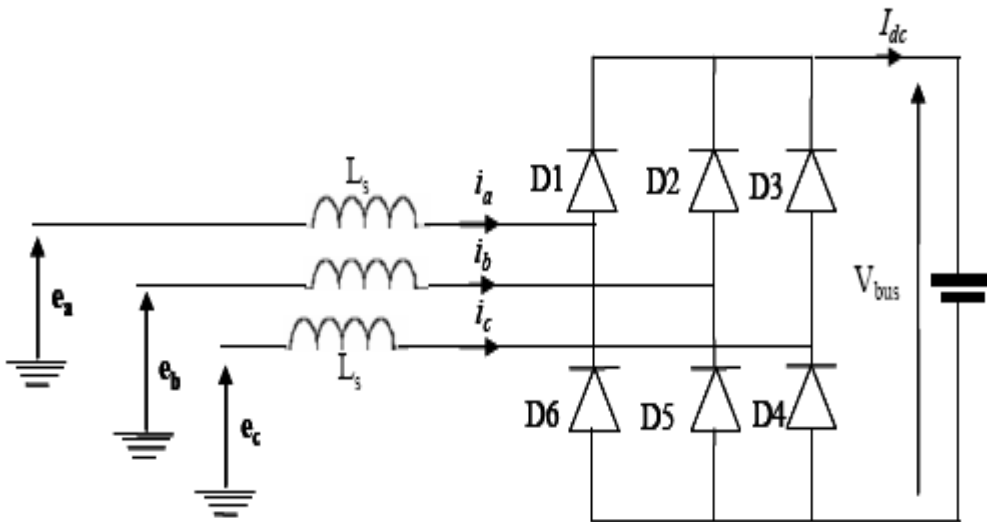


Figure II.16: Schéma d'un pont de diodes.

Le schéma équivalent pendant une séquence de conduction (par exemple phases 1 et 2) est représenté sur Figure (2.15)[38].

A partir du schéma équivalent, et en appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous pouvons écrire

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2L_s} [V_a - V_b - V_{bus}] \quad \text{II.25}$$

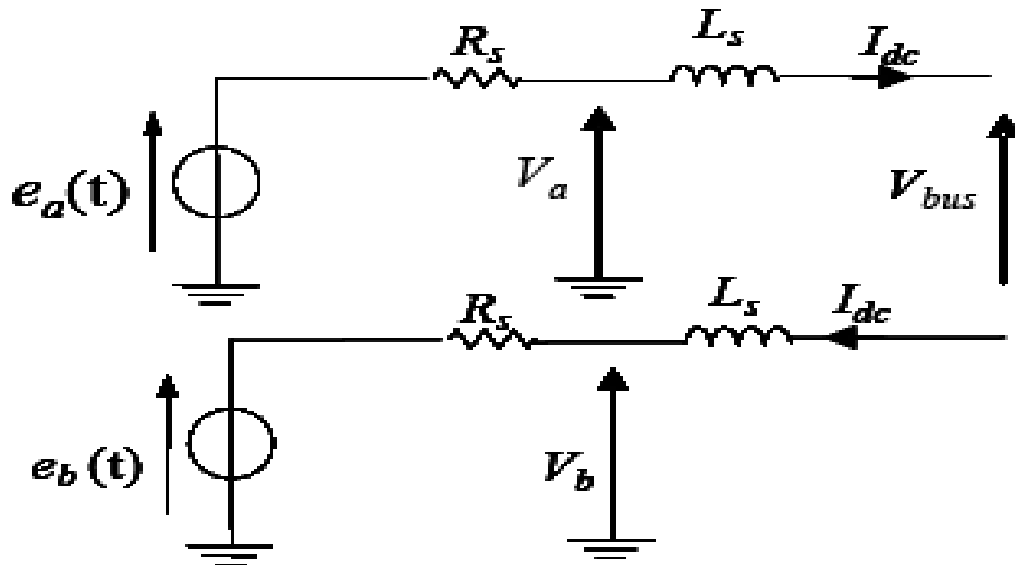


Figure II.16: Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale

Pour implanter ce modèle sous Matlab /Simulink, la diode a été simulée comme dans le cas du redresseur monophasé. Il reste maintenant à sélectionner les phases qui vont rentrer en conduction. Ceci est fait à l'aide d'une fonction Matlab max/min qui nous permet de sélectionner respectivement la tension la plus positive et la plus négative des trois tensions disponibles en amont du pont de diodes. Le courant continu en aval du pont de diodes est calculé à partir de l'équation (II.25). Les courants de ligne en amont du redresseur à diodes sont déterminés à partir du courant continu en aval de celui-ci, qu'on a multiplié par les séquences de conduction de chaque phase

II.7.1.5 Bloc de simulation du pont de diode

Ce modèle permet une simulation temporelle du comportement complet du redresseur à diode sous Matlab /Simulink.

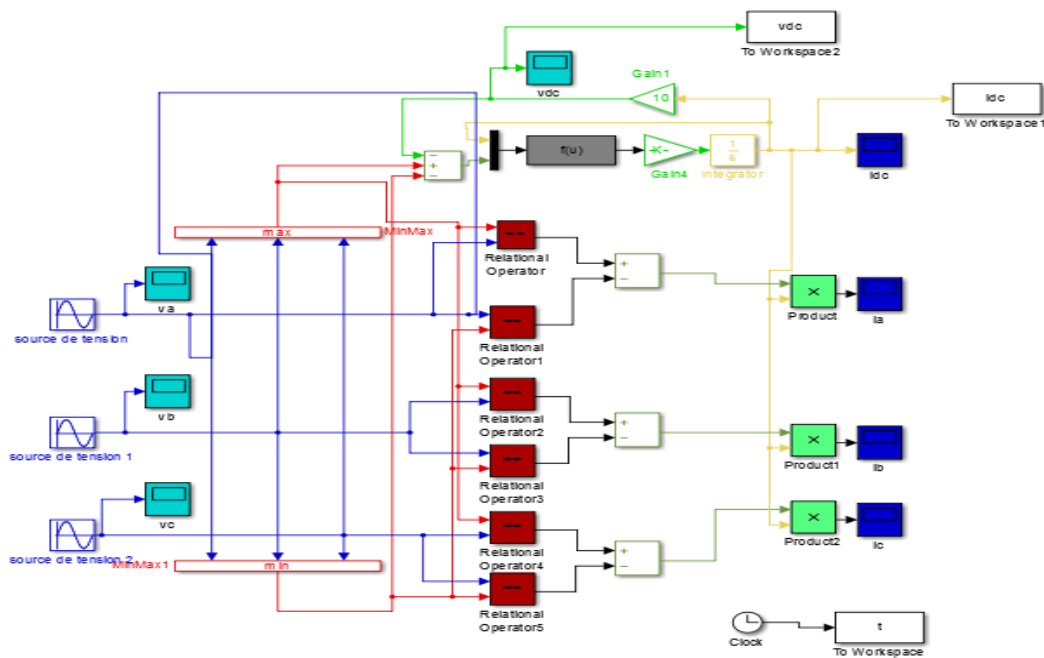


Figure II.17 : Modèle de simulation d'un pont de diodes en conduction normale sous Matlab/Simulink

II.7.2 Onduleur de tension

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif (charge) à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la machine (charge) des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande. Un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode antiparallèle.

II.7.2.1 Modélisation des onduleurs de tension

Pour faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation on modélise l'onduleur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour modéliser l'onduleur de tension Figure (2.17), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être de deux générateurs de F.E.M égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 [21].

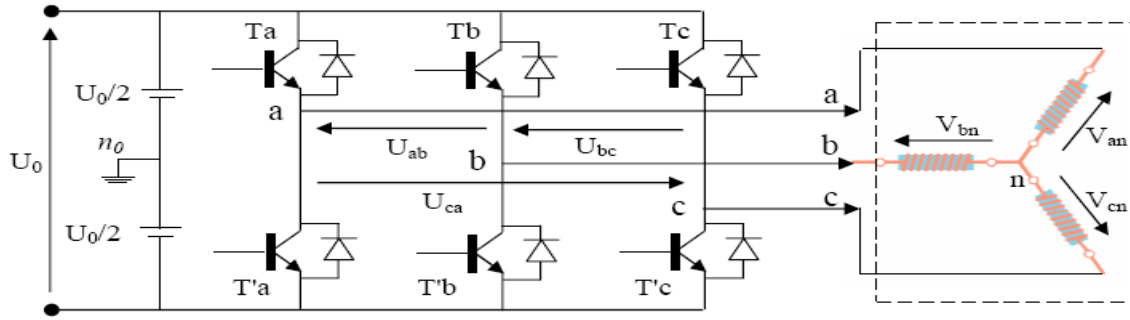


Figure II.17: Schéma de l'onduleur triphasé

La charge a été modélisée à partir des tensions simples V_{an}, V_{bn} et V_{cn} .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

Si $S_i = 1$, Alors T_i est passant et T_i' est ouvert

Si $S_i = 0$, Alors T_i est ouvert et T_i' est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad \text{II.26}$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc

$$\begin{cases} V_{ab} = \left(\frac{1}{3}\right) - [U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bc} = \left(\frac{1}{3}\right) - [U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{ca} = \left(\frac{1}{3}\right) - [U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad \text{II.27}$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nm0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nm0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nm0} = V_{cn0} \end{cases} \quad \text{II.28}$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nm0} = \left(\frac{1}{3}\right) [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad \text{II.29}$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits $S_i(a, b, c)$ on a :

$$V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad \text{II.30}$$

On a donc

$$\begin{cases} V_{ab0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad \text{II.31}$$

En remplaçant (II.28) dans (II.30), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad \text{II.32}$$

En remplaçant (II.31) dans (II.32), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.33}$$

II.7.2.2 Contrôle du courant par MLI

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux :

Un signal triangulaire de haute fréquence (F_p) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence $F_m \ll F_p$. Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Figure (2.18).

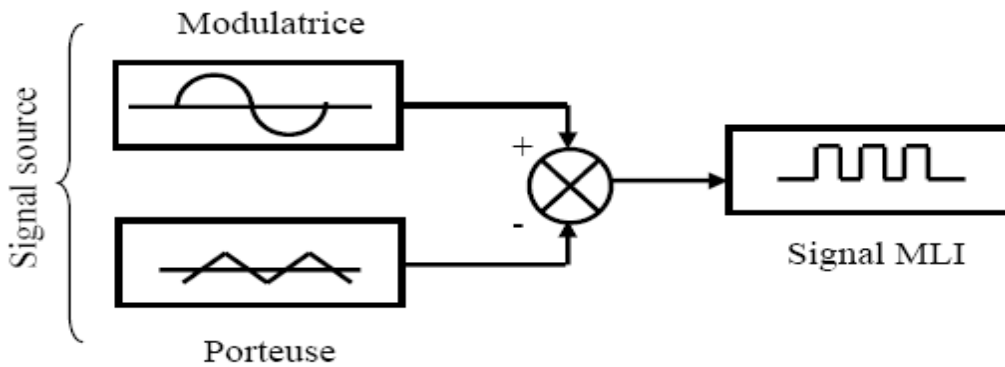


Figure II.18: Schéma synoptique d'un MLI

Ces deux signaux sont définis comme étant :

- **L'onde porteuse:** qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).
- **L'onde modulatrice:** qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont.

- **L'indice de modulation M_L :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse:

$$L_m = \frac{V_M}{V_p} \tag{II.34}$$

- **Le rapport de modulation M_r :** qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice: $M_r = \frac{F_p}{F_m}$

$$\tag{II.35}$$

II.7.2.4 Bloc de simulation de l'onduleur de tension

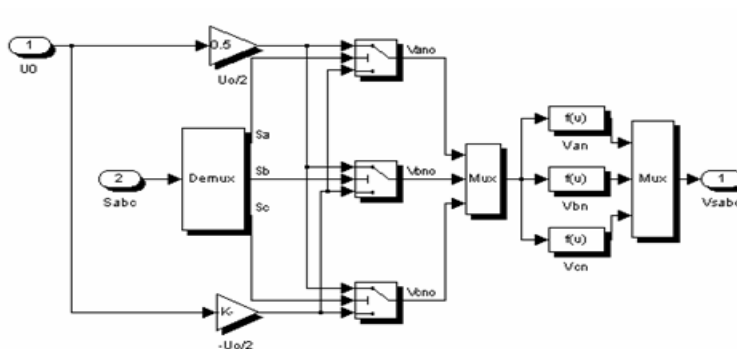


Figure II.20 : Bloc de simulation de l'onduleur de tension.

II.8 Modèle de la turbine en zone 2

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs se déduit facilement du graphe d'information.

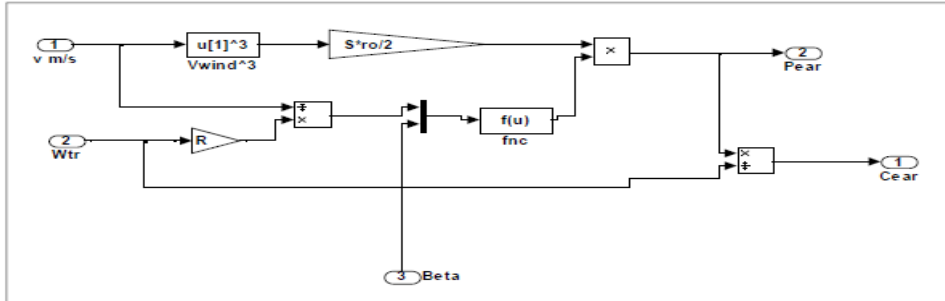


Figure II. 21 : Modèle de la turbine sans régulation de la vitesse

II.8.1 Modèle de la turbine avec régulation de la vitesse

La modélisation de la turbine est orienté sur la zone de fonctionnement à vitesse variable (zone 2). Le schéma de simulation ci-dessous représente le modèle de la turbine avec régulateur PI appliqué pour asservissement de la vitesse de l'arbre.

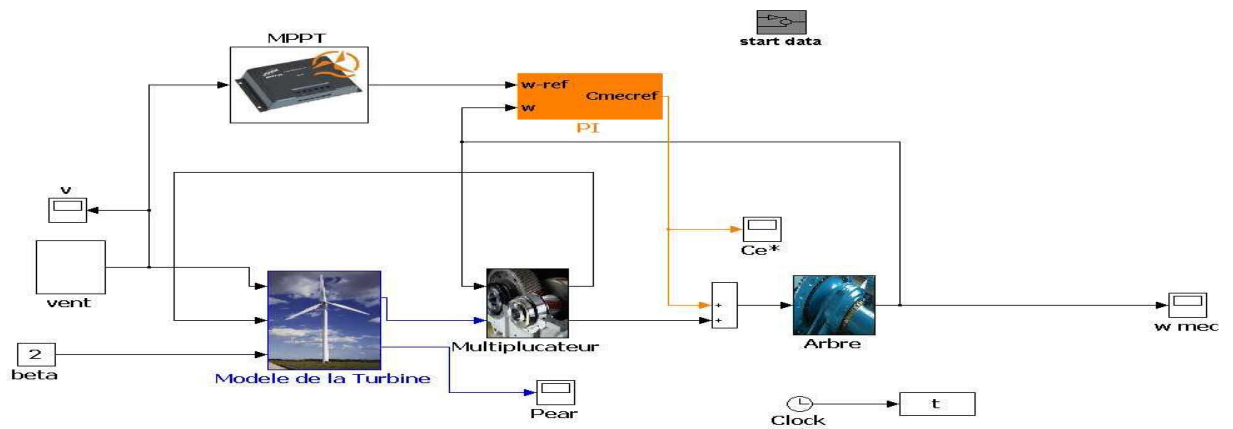


Figure. II. 21 : Schéma bloc de la turbine Avec régulateur de la vitesse et MPPT.

II.9 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté la puissance mécanique récupérée par la turbine, dépendant de la vitesse du vent et du diamètre de la turbine. La turbine est par la suite modélisée et simulée pour deux profils de vent différents, dans le but d'étudier l'influence du profil du vent sur les paramètres mécaniques et énergétiques de la turbine éolienne.

La génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), ainsi que sa modélisation sont présentées sous forme d'équations mathématiques.

Puis, on a abordé la modélisation du convertisseur statique composé du pont de diodes et de l'onduleur de tension. Le principe de fonctionnement du pont de diodes et de l'onduleur a été présenté. La commande de l'onduleur de tension triphasée a été présentée en donnant le principe de la MLI sinusoïdale.

Dans le chapitre suivant nous allons considérer le système dans sa globalité.



Chapitre III

Simulation du système globale de la chaîne de conversion éolienne

III.1 INTRODUCTION:

L'association des éléments décrits dans le chapitre précédent permet d'avoir une vision globale de la chaîne de conversion d'énergie. La caractéristique de la voile Savonius considérée est très fortement non linéaire avec une « forme de cloche » prononcée elle nécessite impérativement d'adopter une stratégie de recherche du point maximal de puissance (Maximum Power Point Tracking).

Les techniques développées, peuvent admettre que la caractéristique de la voile est inconnue : dans ce cas un dispositif MPPT basé sur la logique floue est une solution proposée. Dans le cas où cette caractéristique est connue, les stratégies de recherche de puissance optimale sont multiples (pilotage direct en couple ou en vitesse et commande indirecte par la commande du courant de charge) et adaptées aux structures du convertisseur statique employé (redresseur MLI, pont de diodes, hacheur dévolteur à un cadran, hacheur dévolteur asymétrique à deux bras).

Nous allons présenter dans ce qui suit le contrôle de la turbine et la commande de la génératrice et les résultats de simulation obtenus en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink.

III.1. Architectures et méthodes de recherche du point maximum de puissance :

Un système de conversion d'énergie éolienne est composé de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend de paramètres de construction qui définissent son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement

La voilure est connectée à une génératrice par le biais d'un multiplicateur mécanique. Dans le cas de voilures de faible taille, la vitesse de rotation est suffisante pour qu'une machine « dédiée » de type synchrone, à grand nombre de pôles puisse être attaquée directement sans multiplicateur.

La courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique « au gré du vent » : on parle ainsi de maximisation de la puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking). La nécessité de ce type d'optimisation énergétique est d'autant plus significative qu'on utilise une voilure à axe vertical. En effet, la caractéristique en forme de cloche est nettement plus marquée que pour une turbine tripale classique, ce qui sensibilise le prélèvement énergétique en fonction de la charge opposée par la génératrice sur l'arbre mécanique. Enfin, dans les applications de petite puissance telles que dans le cadre de l'intégration à l'habitat, ce type de voilure à axe vertical présente des atouts intéressants (esthétique, acoustique, indépendance de la direction du vent): on doit alors souvent faire face à des gisements fortement instationnaires en raison de la rugosité des sites (cas de sites urbain et périurbain). La présence de ces turbulences nécessite d'autant plus un réglage performant de la charge de l'éolienne.

III.1.2. Contrôle de la turbine éolienne :

III.1.2.1. Généralités :

Le caractère non prédictible et aléatoire du vent constitue un des plus grands défis. Les éoliennes les plus larges ont un contrôle complexe qui poursuit automatiquement les variations de la vitesse et de la direction du vent et règle l'orientation de la turbine, l'angle de calage ("Pitch angle") et le rapport de vitesse entre turbine et générateur pour maintenir la sortie électrique désirée. Les petites éoliennes sont généralement moins sophistiquées, dans le passé ils avaient un contrôle mécanique donnant des performances modestes. Actuellement, avec le progrès dans le domaine

des microcontrôleurs et de l'électronique de puissance, le contrôle électronique des petites éoliennes devient plus performant, moins coûteux et moins complexe.

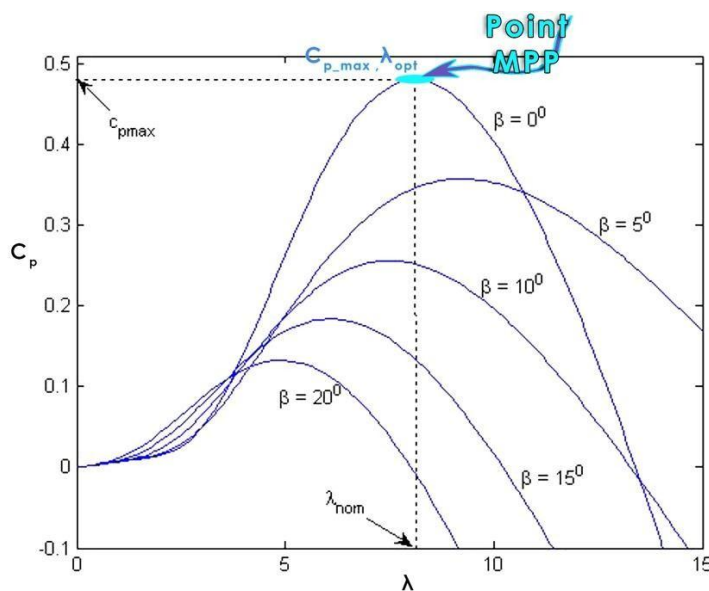
Nous nous intéressons dans notre recherche au contrôle des petites éoliennes, principalement à l'algorithme MPPT 'maximum PowerPoint Tracking' afin d'extraire le maximum de puissance disponible du vent.

III.2. Contrôleur MPPT :

Afin d'extraire le maximum de puissance, le but de ce contrôleur est de faire fonctionner la turbine avec le maximum coefficient de puissance ($C_p \max$) quelque soit la vitesse du vent :

$$C_{p_max} = C_p(\lambda_{opt})$$

C'est-à-dire assurer le fonctionnement pour la valeur optimale (λ_{opt}).



FigIII.1. Point MPPT $C_{p_max} = C_p(\lambda_{nom})$.

III.2.1. MPPT en mesurant la puissance de la turbine (méthode de gradient) :

Cette méthode nécessite la mesure de la puissance fournie et avoir l'accès au contrôle de la vitesse de rotation de la turbine ($\Omega_{turbine}$) et le rapport cyclique (D) qui est en relation directe avec le convertisseur DC/DC pour avoir un Voltage de sortie bien adapté à la charge [40].

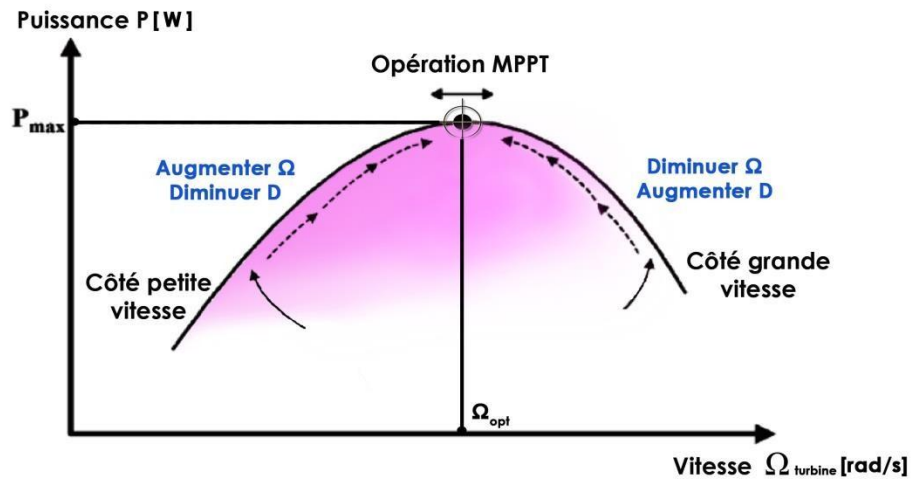


Figure III.2. MPPT éolienne selon la puissance fournie.

❖ Description :

MPPT méthode Gradient. Dans notre cas le rotor de la turbine (Ω_{turbine}) est articulé directement au rotor du générateur électrique. En pratique, à une vitesse du vent bien précise, le rotor tourne à une vitesse angulaire très proche de celle optimale, donc il suffit de :

- Si $\Omega > \Omega_{\text{opt}}$ donc Diminuer Ω et Augmenter rapport D .
- Si $\Omega < \Omega_{\text{opt}}$ donc Augmenter Ω et Diminuer rapport D

❖ Organigramme du fonctionnement :

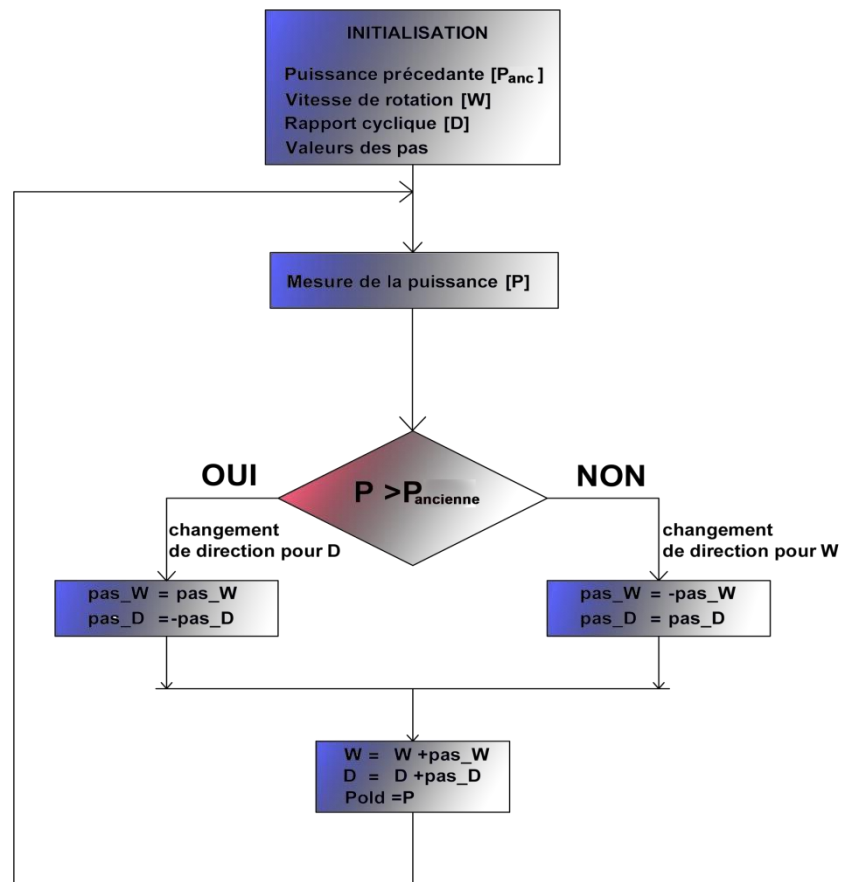


Figure III.3. Algorithme MPPT (Gradient).

Le Contrôle se fait en comparant la puissance optimale mesurée à celle du fonctionnement du générateur et de contrôler le rapport cyclique du convertisseur qui agit comme une loupe fermée variant la vitesse de rotation pour arriver au fonctionnement optimale.

NOTE Le rapport cyclique [D] sert à contrôler le convertisseur DC/DC, qui se situe juste avant l'onduleur (DC/AC), afin de fonctionner sous la puissance optimale délivrée par la turbine éolienne et obtenir un système à voltage DC stable avant de l'introduire dans le réseau sous forme Sinusoïdal.

❖ **Hacheur "Survolteur-Dévolteur" (Convertisseur DC/DC) :**

Selon la valeur du rapport cyclique (D) appliquée au GTO, la tension moyenne de sortie peut être Supérieure ou inférieure à la tension d'entrée.

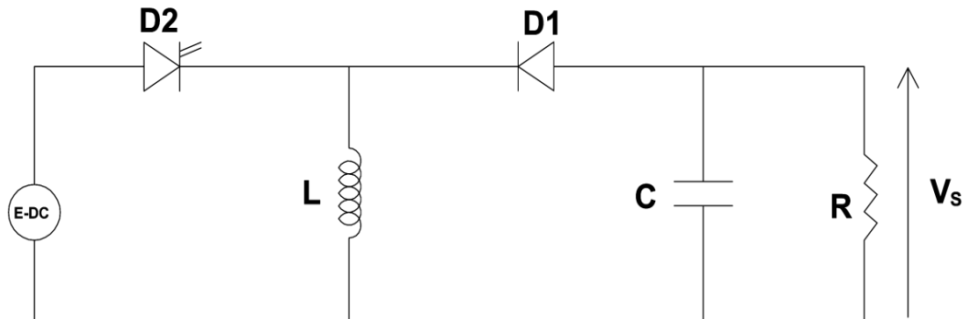
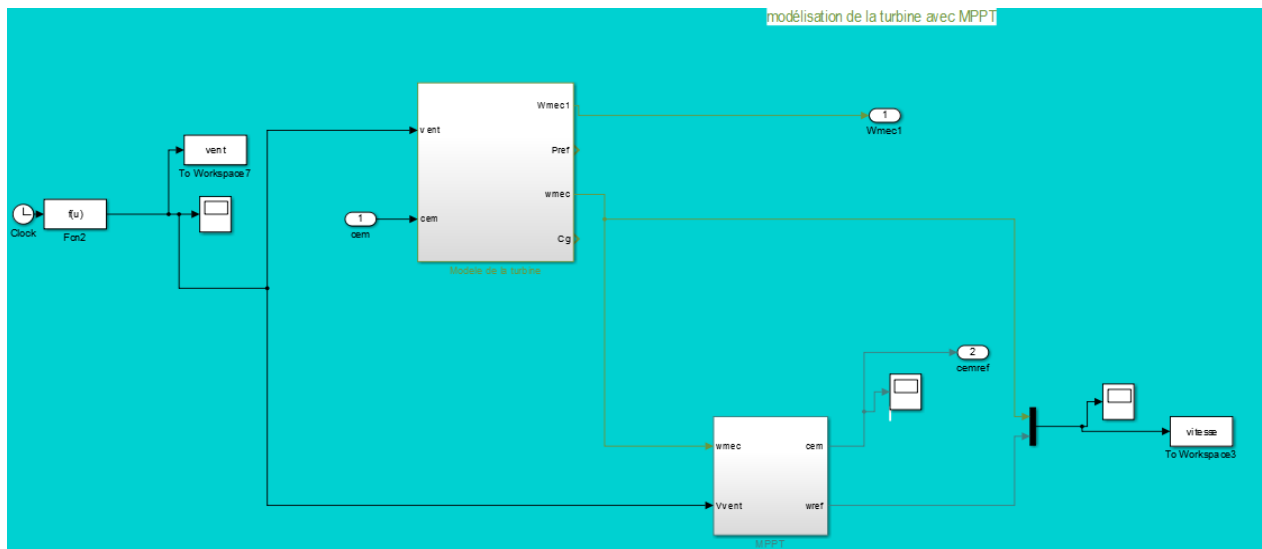


Figure III.4. Hacheur Survolteur - Dévolteur.

III.3.Simulation en Matlab/Simulink d'une turbine Eolien avec Contrôleur MPPT :



Figure(III.5) : Modèle éolien-SIMULINK

III.4 Méthodes de recherche du point maximum de puissance :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche ». Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui est équivalent à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

Le schéma de la figure (II.10) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent $V_{vdonnée}$.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation suivante [20] :

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

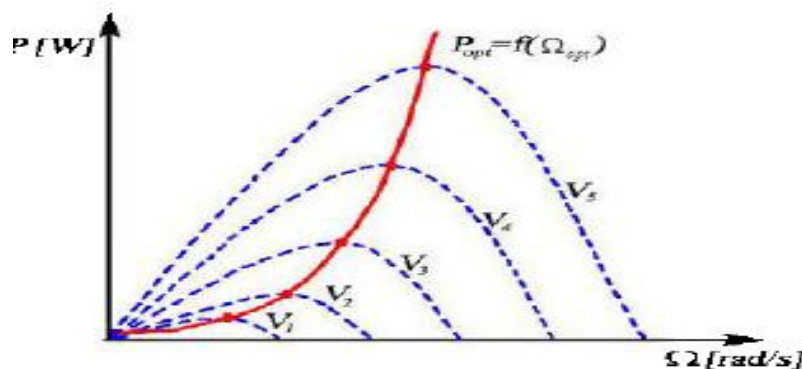


Figure (III.6) : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

Un fonctionnement idéal du système éolien 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 :

1- la première approche, la moins classique, considère que la caractéristique

$C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.

2- La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique

$C_p = f(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

III.4.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne :

Cette technique exige de faire des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil de pales par le constructeur de l'éolienne. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux [32].

Deux familles de structures de commande sont présentées dans cette approche:

- Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.
- Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.

III.4.1.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

Le vent est une grandeur de la nature fluctuante dont les variations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne.

Pour notre étude on suppose que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence [32].

$$C_{em} = C_{em-ref}$$

Plusieurs dispositifs de commande basés sur les techniques d'extraction du maximum de puissance (MPPT) consistant à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée, peuvent être imaginés.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = c_g - c_{em} - c_{vis} \quad \text{III.2}$$

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

c_{vis} : Le couple résistant dû aux frottements.

$$c_{vis} = f\Omega_{mec}.$$

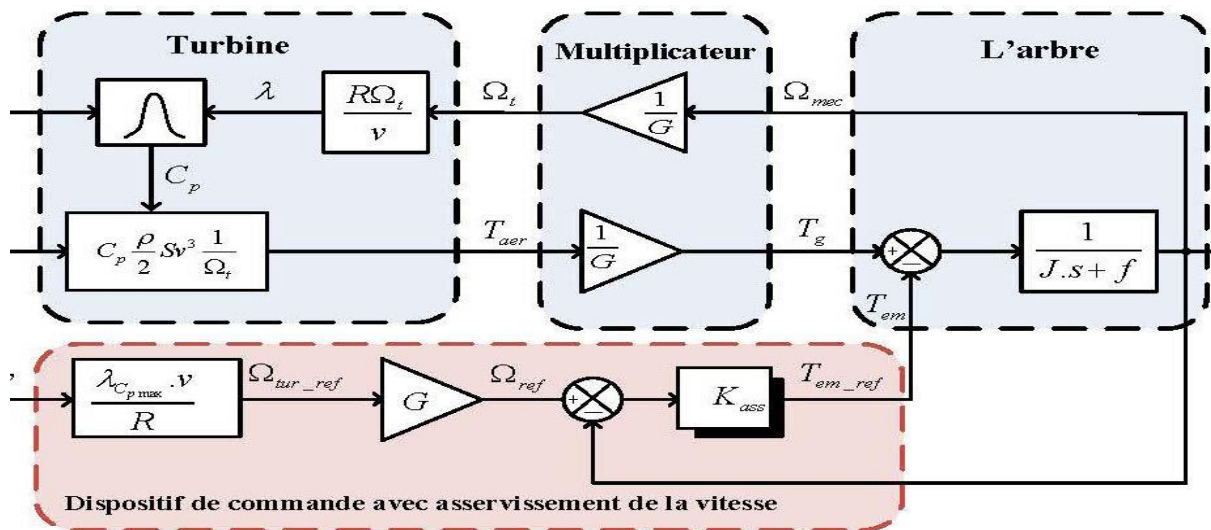


Figure III.7 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

III.4.1.1.2 Synthèse du régulateur :

Le calcul du régulateur est basé sur la méthode de compensation pôles/zéros. La boucle de régulation de vitesse est présentée par le schéma bloc de la figure suivante [32].

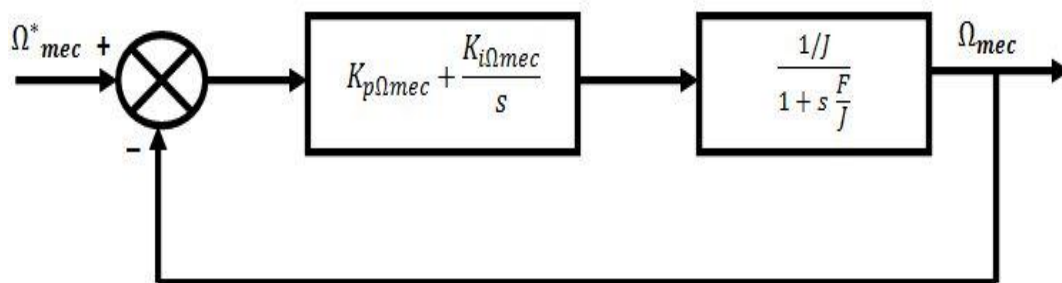


Figure (III.8):Schéma fonctionnel de régulation de vitesse

Le régulateur PI est donné par :

$$R_{pi}(s) = \frac{K_{p\Omega_{mec}}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega_{mec}}}{K_{p\Omega_{mec}}} \right) \quad \text{III.3}$$

Par compensation :

$$\frac{F}{J} = \frac{K_i \Omega_{mec}}{K_p \Omega_{mec}} \quad \text{III.4}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega^*_{mec}} = \frac{1}{\frac{J}{K_p \Omega_{mec} s} + 1} \quad \text{III.5}$$

Le système est de premier ordre, sa fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$\frac{\Omega_{mec}}{\Omega^*_{mec}} = \frac{K}{1 + \tau s} \quad \text{III.6}$$

$$\tau = \frac{J}{K_p \Omega_{mec}} \quad \text{III.7}$$

Les paramètres du régulateur de vitesse sont :

$$K_p = F / \tau \quad \text{III.8}$$

$$K_i = J / \tau \quad \text{III.9}$$

III.4.1.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent Ceci, nous conduit à déduire que:

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considérablement nul $C_{mec} = 0$
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_f \approx 0$

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statique suivante :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0 \quad \text{III.10}$$

Ce qui donne :

$$C_{mec} = C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad \text{III.11}$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique:

$$C_{em\text{réf}} = \frac{C_{aer_estime}}{G} \quad \text{III.12}$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression:

$$C_{aer_estime} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{III.13}$$

$V_{estimee}$: est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donné par l'expression suivante :

$$V_{estimee} = \frac{\Omega_{turbine_estimee} \cdot R}{\lambda} \quad \text{III.14}$$

En utilisant les formules du (II.11), au (II.14), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad \text{III.15}$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur λ sa valeur optimale λ_{opt} correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad \text{III.16}$$

En mettant:

$$K_{opt} = \frac{C_{p_opt}}{\lambda_{cp_opt}^3} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3} \quad \text{III.17}$$

L'expression (II.38) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em\text{ref}} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \cdot$$

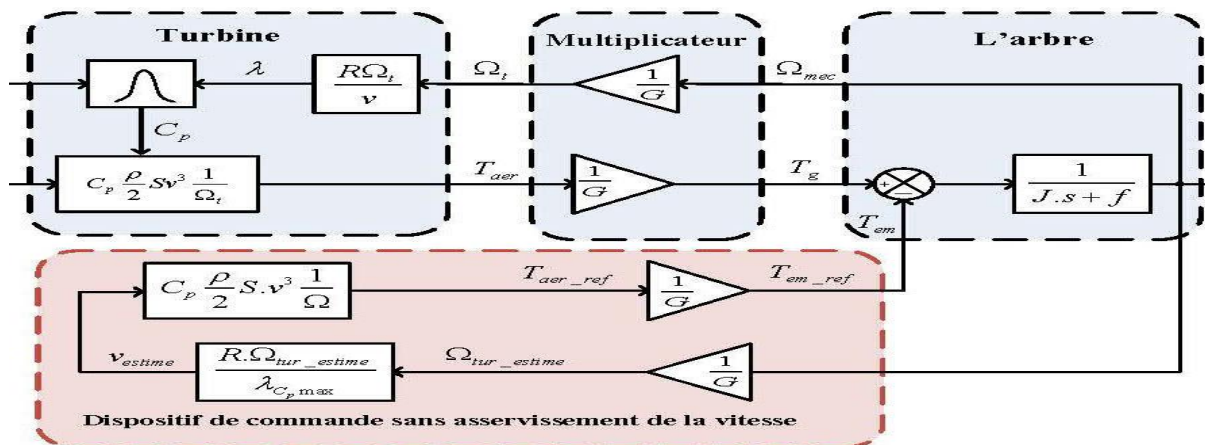


Figure III-9: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

III.5. Elaboration de l’algorithme MPPT :

A partir des expressions analytiques de la turbine éolienne, on déduit le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse mécanique.

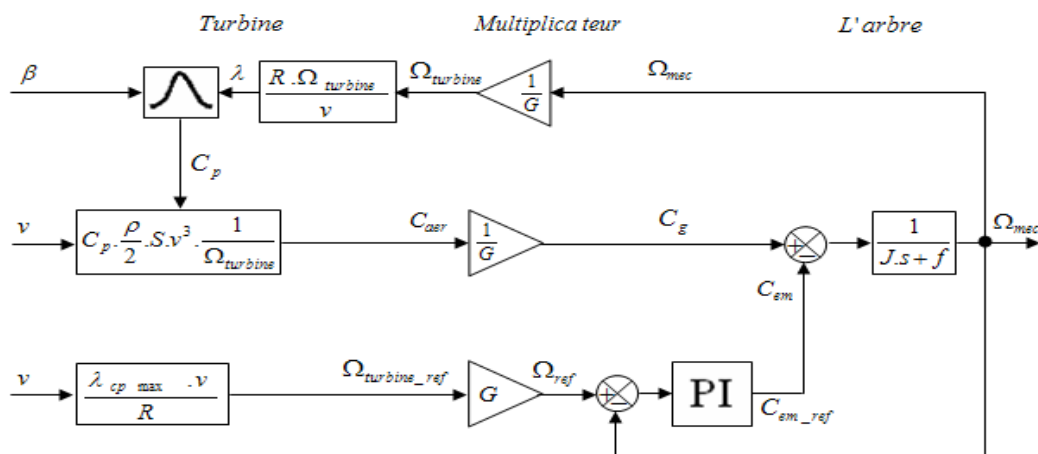


Figure III.10 : Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Avec : C_{pmax} le rendement aérodynamique maximal obtenu pour une valeur d’angle d’orientation des pales égale à 0° .

W_{ref} la vitesse mécanique de référence.

PI : le régulateur de vitesse.

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale C_{pmax} elle est donnée par :

$$\Omega_{\text{turbine}} = \frac{\lambda C_{p\text{max}} V}{R}$$

III.6. Blok de simulation de régulateur MPPT :

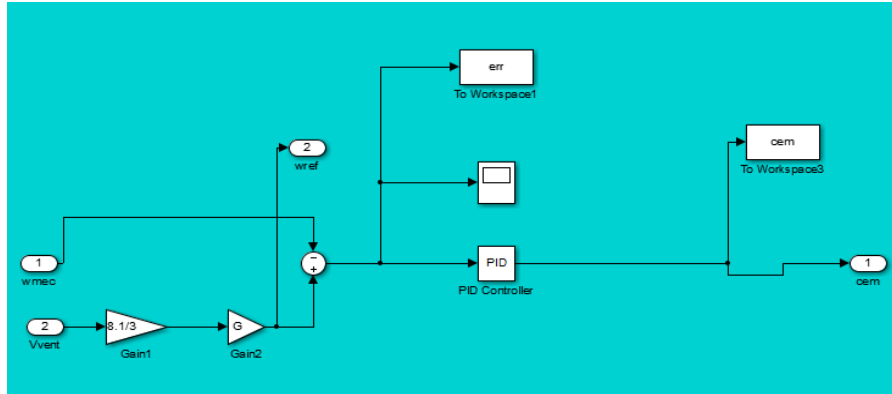


Figure (III.11) : schéma de simulation de régulateur PI

III.7.Principe de la commande vectorielle:

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, ou la force magnétomotrice de l'induit établi un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quel que soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être [21]. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle. Le principe de cette dernière consiste à transformer le modèle de la machine synchrone à une structure similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée et compensée.

En effet, en absence de la saturation et de la réaction magnétique d'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation I_f . Il n'est pas affecté par le courant d'induit I_a à cause de l'orientation perpendiculaire des flux statoriques et rotoriques. C'est

pourquoi, le couple électromagnétique d'une machine à courant continu à excitation séparée est directement proportionnel au courant de l'induit I_a pour une valeur constante du flux, ce qui présente un réglage rapide du couple. L'idée proposée par Blaschke et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple.

III.7.1 Variantes de la commande vectorielle

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [2] [7] [21] :

- ❖ Suivant la source d'énergie :
 - Commande en tension (Voltage Source Inverter) ;
 - Commande en courant (Current Controlled Inverter).
- ❖ Suivant les opérations désirées pour le flux :
 - Commande vectorielle de flux rotorique ;
 - Commande vectorielle de flux statorique ;
 - Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant).
- ❖ Suivant la détermination de la position du flux :
 - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase) ;
 - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement

III.7.2 Procédé d'orientation du flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe « d ». Afin d'obtenir un couple maximal.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont annulées.

III.7.2.1 Bloc de simulation de la commande vectoriel :

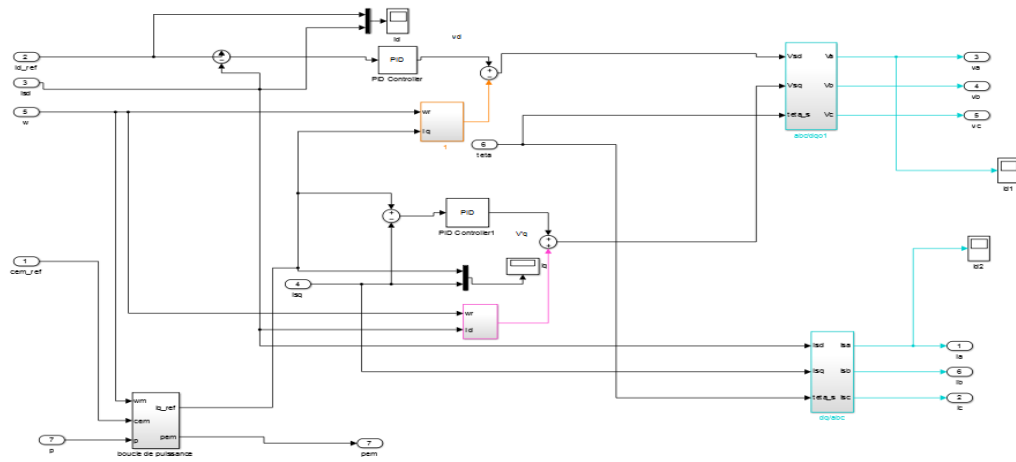


Figure III .12 : Schéma de simulation de la commande vectoriel

III.8. Résultats de simulation :

III.8.1- Comportement de la turbine avec asservissement de vitesse :

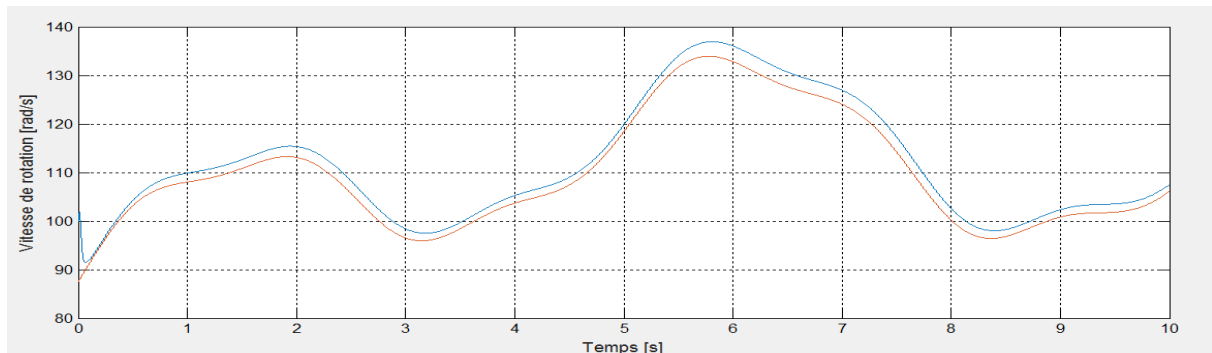


Figure III.13 : Allure de la vitesse.

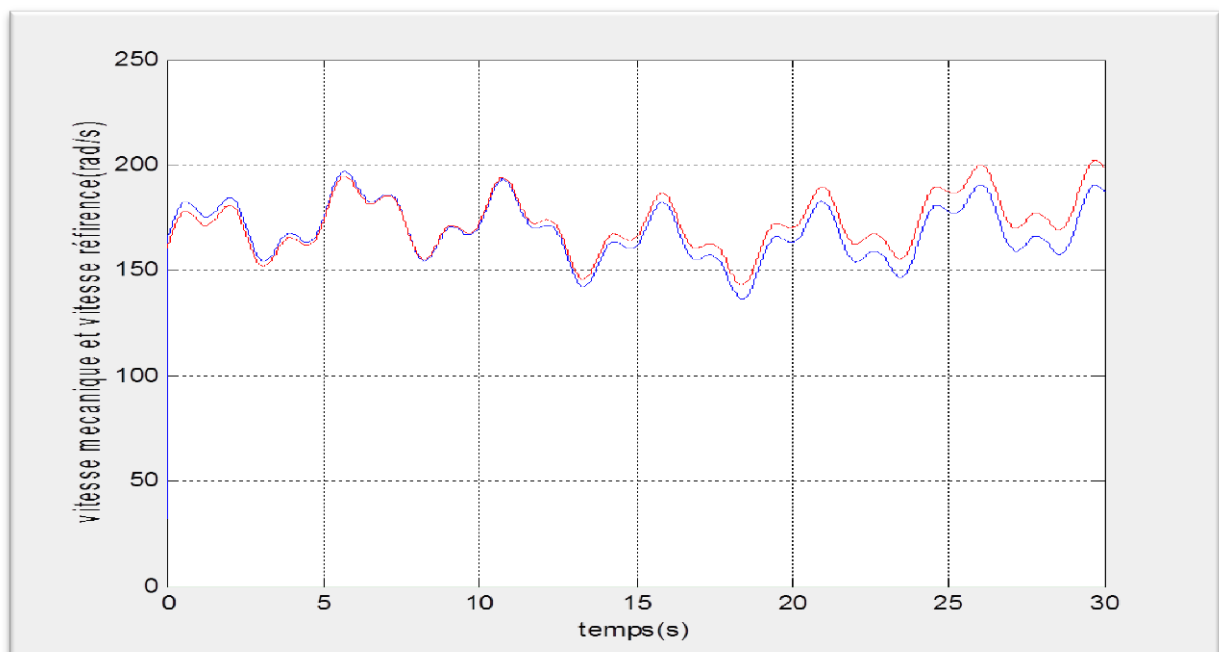


Figure III.14: Résultats de simulation avec régulateur PI

Rappelons que la synthèse du régulateur PI, dans notre cas, est effectuée en utilisant la méthode de compensation pôle/zéro (Voir la partie précédente).

La figure (III.14) montre le bon suivi de la vitesse mécanique en présentant une légère erreur par rapport à la vitesse de référence en régime permanent.

III.9. Machine synchrone à aimants permanents :

La machine synchrone à aimants permanents est utilisée dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité.

Block de simulation de GSAP :

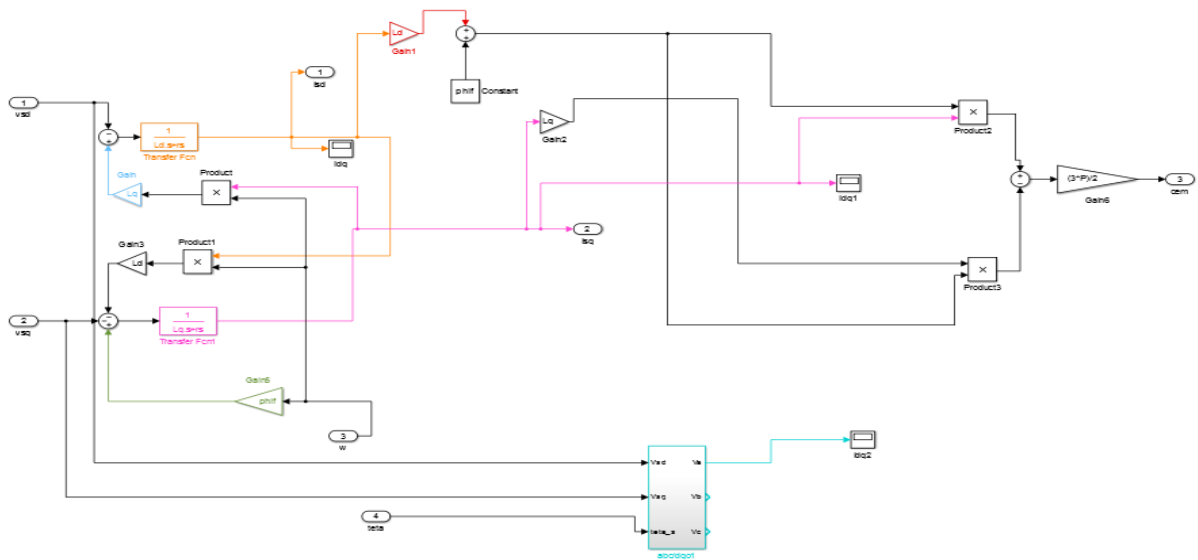
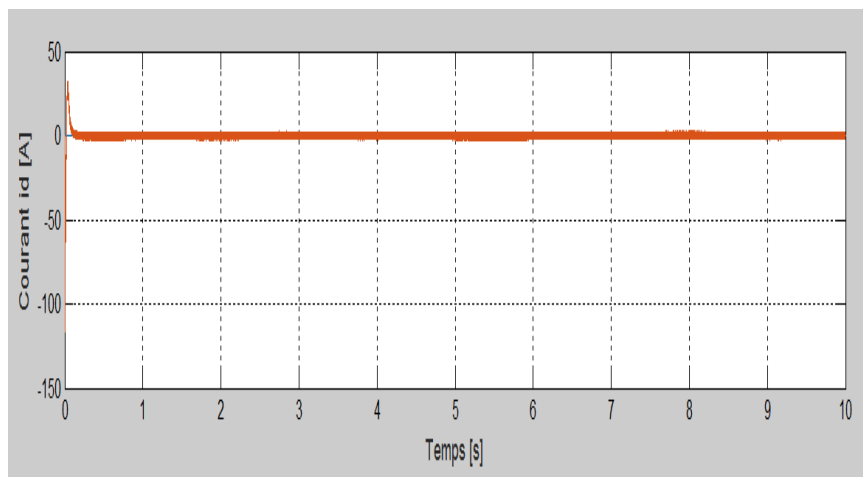
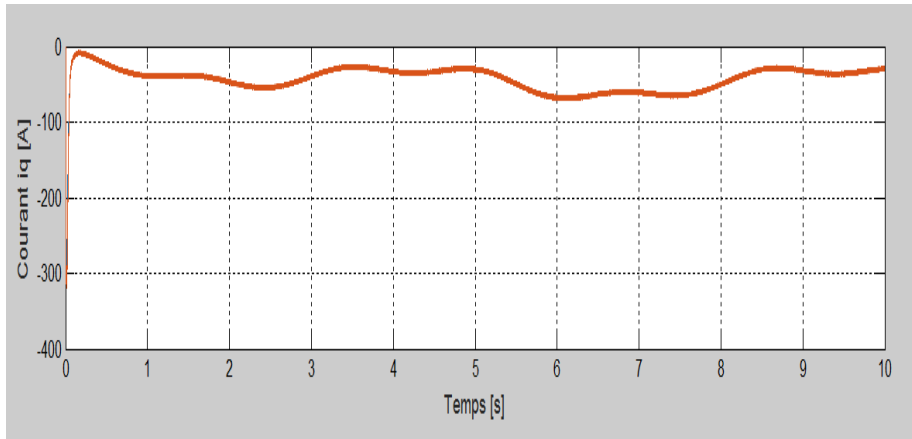


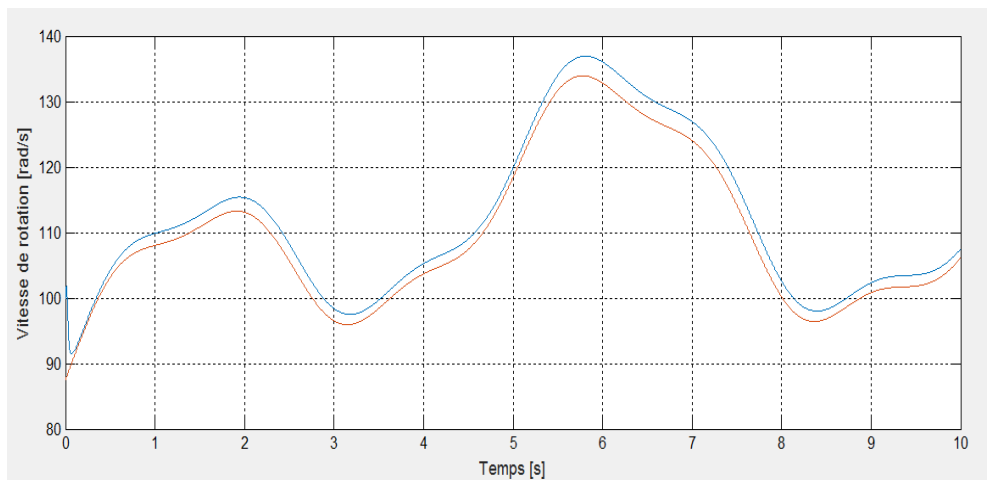
Figure III.15 : Schéma de simulation de GSAP



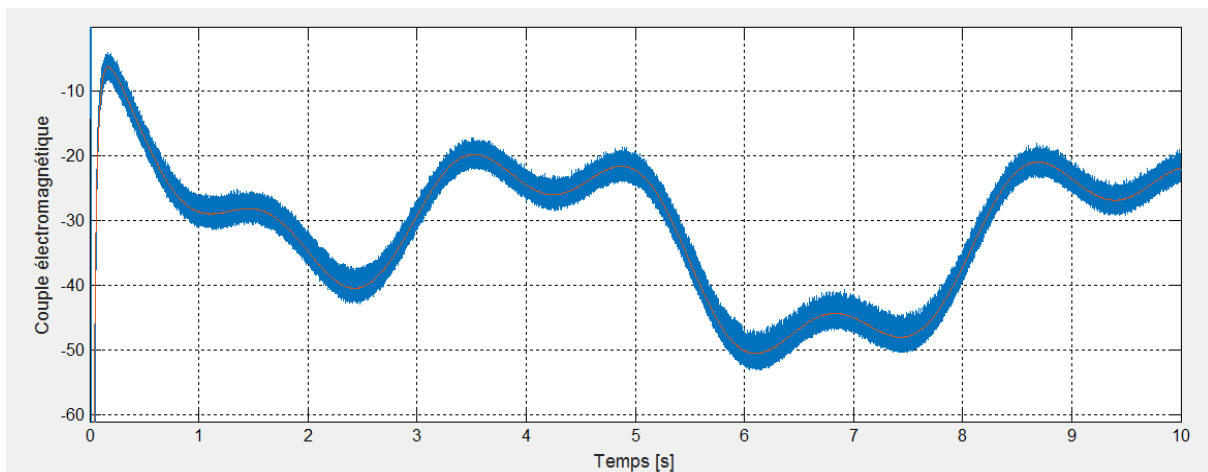
a: courant statorique id



b: Courant statorique iq



c: vitesse de rotation



d: couple moteur

Figure III.16: résultats de simulation de la GSAP.

$$R_s = 0.18\Omega; L_d = 2e-3H; L_q = 2e-3; J = 0.48Kg.m^2; f = 0Nm/rd/s; P = 4; \Psi_f = 0.123W$$

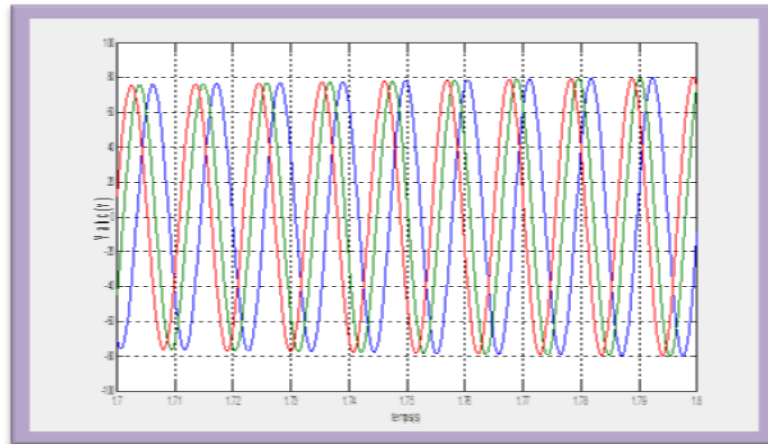


Figure III.17 : Allure des tensions statorique

On fait lancer la génératrice par un couple moteur pour une durée bien déterminée, puis, on la laisse tourner librement. On constate sur la figure (III.16) que la vitesse suit la vitesse de référence imposée, alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 75(V) et une fréquence de 50(HZ).

III.9.1 Comportement de la GSAP entraînée par la turbine éolienne

L'association de la génératrice à la turbine permet la génération de l'énergie électrique, c'est pourquoi nous avons procédé à des simulations sous Matlab-Simulink en régime permanent. Les figures (III.16) et (III.17) représentent respectivement la vitesse de rotation, les courants statoriques et les tensions suivant les axes d et q. Dans cette partie, nous avons assemblé les différentes parties de la chaîne de conversion éolienne, à savoir : la turbine et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée au cours de ce travail.

Dans la figure suivante (Fig. (III.18)) ; nous remarquons que l'allure de la tension V_q présente une forme qui ressemble beaucoup à celle du vent.

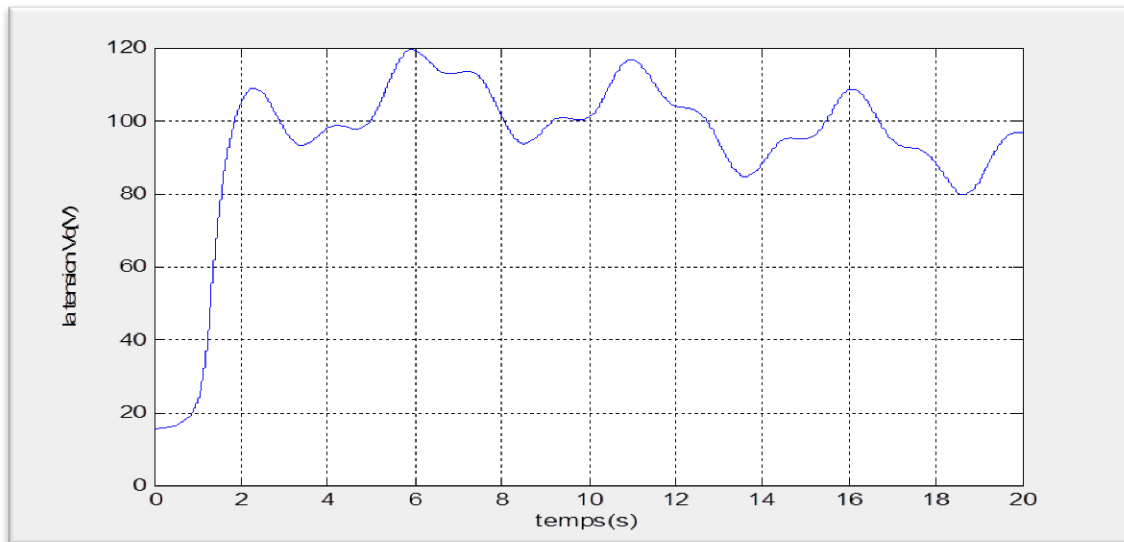


Figure III.18: Allure de la tension V_q

III.10 La puissance active et réactive :

La puissance produite par l'éolienne varie énormément tout au long de la journée, car la puissance produite suit la puissance disponible dans le vent et présente les mêmes variations que ce dernier.

La synthèse des contrôleurs de puissance active et réactive peut être faite analytiquement en utilisant le modèle de Park dans les coordonnées $d - q$ dont la forme est rappelée dans les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \cdot \varphi_f \end{cases}$$

Les puissances actives et réactives transitées par le réseau sont données dans le modèle de Park par les relations suivantes:

$$P = V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q$$

$$Q = V_q \cdot i_q - V_d \cdot i_d$$

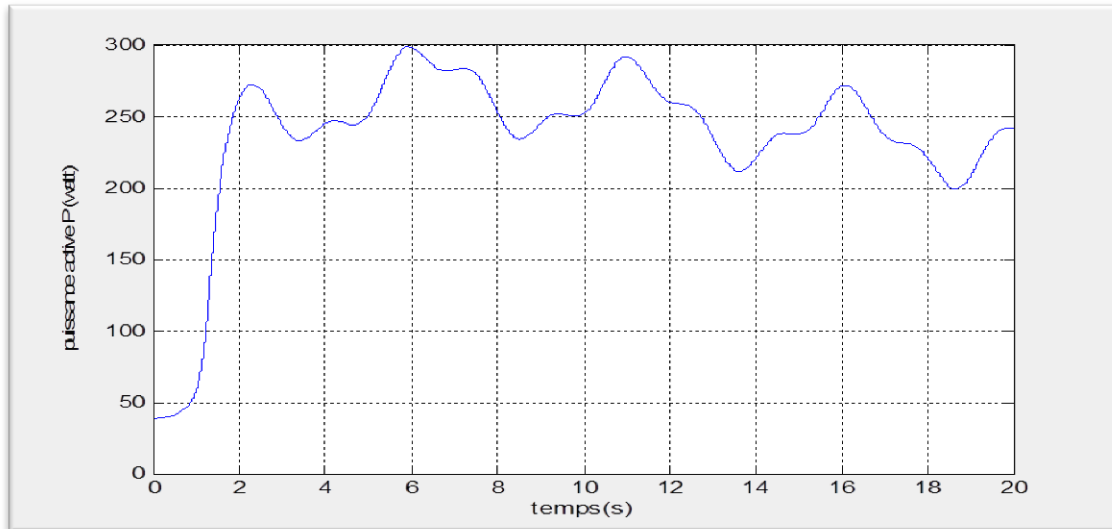


Figure III.19: Allure de la puissance active P

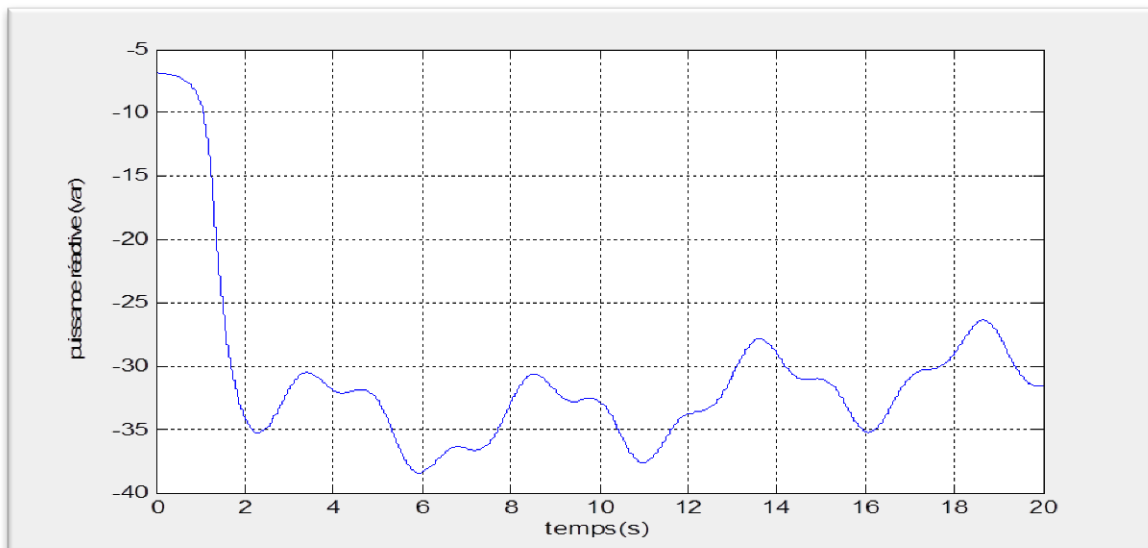


Figure III.20: Allure de la puissance réactive Q

Les figures (III.19) et (III.20) présentent respectivement l'allure de la puissance active et réactive obtenues par la conversion éolienne, l'allure de ces deux courbes se comporte de la même façon que la vitesse de rotation de la turbine. Ce qui mène à dire que la puissance active obtenue dépend de la puissance que reçoit l'éolienne.

III.11 Conclusion

Nous avons décrit, dans ce chapitre, deux parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice. Alors que la deuxième, est consacrée à la modélisation de la machine à aimants permanents, fonctionnant en génératrice. Le modèle mathématique de la génératrice a été établi, en se basant sur quelques hypothèses simplificatrices.

Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle [22].

Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui est équivalent à la recherche de la vitesse de rotation optimale, différentes stratégies sont décrites dans le but de suivre parfaitement la courbe de la puissance optimale.



Conclusion générale

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables. Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre. Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'est intéressé dans ce travail à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice synchrone à aimants permanents. Les résultats de simulation pour la vitesse du vent variable permettent d'observer l'influence de la vitesse du vent sur la tension et la puissance. Dans une approche de conception système, nous avons abordé de façon intégrée les questions d'architecture, de dimensionnement et de gestion optimisée de l'énergie. Dans le contexte des énergies renouvelables un état de l'art de l'éolien est présenté dans le premier chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ de matériaux de construction et de l'électronique de puissance.



Référence
Bibliographie

Bibliographie :

- [01] Kezerli Rouchdi, "Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multi niveaux". Thèse de Magister. Université des sciences et de la technologie « Houari Boumediene » d'Oran. 2009. Algérie.
- [02] Salma El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension". Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille. 2004. France.
- [03] Adam Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance". Thèse de doctorat, 2005. Unité Mixte de Recherche (L.E.E.I), (ENSEEIH), (INPT) et (CNRS). France.
- [04] Armand Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrones à double alimentation avec système de stockage pour la production d'éolienne". Thèse de doctorat, Université d'Henri Poincaré, Nancy. 2006. France.
- [05] A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT 2005. France,.
- [06] M. MESSAOUD «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents » mémoire de magister. Université de Batna. 2008. Algérie.
- [07] Armand BOYETTE «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006. France.
- [08] Nicolas LAVERDURE «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble. 2005. France.
- [09] 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. Algérie.
- [10] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat. Université de Nantes. 2003. France
- [11] M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2007. France

- [12] TIR Zoheir «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif. 2010. Algérie.
- [13] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [14] NAOUEL HAMDI «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» mémoire de magister de l'université MENTOURI de Constantine, 2008. Algérie.
- [15] TOUAL Belkacem « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister. Université de Batna, 2010. Algérie.
- [16] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.
- [17] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED «Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne » JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [18] ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [19] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2008 », Fev 2009, Allemagne.
- [20] KHALED FERKOUS «étude d'une chaine de conversion d'énergies éolienne» mémoire de magister de l'Université Mentouri de Constantine, 2009. Algérie.
- [21] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003. Algérie.
- [22] M. LOPEZ «contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-sud11. France.
- [23] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, «A survy on variable-speed wind turbine system», Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.
- [24] « Convertisseurs et machines électriques » Techniques de l'Ingénieur, D 3 960
- [25] H. Camblong, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux. 2003. France.
- [26] M. MESSAOUD «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents ». Mémoire de magister Université de Batna. 2008. Algérie.
- [27] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de

l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003. France.

[28] A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

[29] EDOUARD Bommé «Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer» Thèse de Doctorat de L'Institut polytechnique de Grenoble, 2009. France

[30] REDJEM Radia, "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ". Thèse de Magister. Université Mentouri de Constantine 2009. Algérie.

[31] METATLA Samir, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA". Thèse de Magister. Promotion 2009. École nationale supérieure polytechnique d'Alger. Algérie.

[32] BELABBAS Belkacem. « Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local » Thèse de Magister. Université Ibn Khaldoun Tiaret. Algérie.

[33] TOUAL Belkacem, "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable". Thèse de Magister, 2010. Université de Batna. Algérie.

[34] Cherfia Naïm, "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens ". Thèse de Magister. 2010. Université Mentouri de Constantine. Algérie.

[35] Hamza ouiIhssen, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur ". Thèse de Magister. 2008. École nationale supérieure polytechnique d'Alger. Algérie.

[36] Frédéric Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (Machine asynchrone à cage autonome & Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". Thèse de doctorat, 2003. Université de Nantes. France.

[37] RafikaDrareni , Zahra Ouahrani, "Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC ». Mémoire d'ingénieur, 2009. École nationale supérieure polytechnique d'Alger. Algérie.

[38] Feyrouz Messai, "Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable". Thèse de Magister. 2009. Université Mentouri de Constantine. Algérie.

[39] Djebbar Mohamed Salah, "Etude comparative des redresseurs cascades et multi niveaux à commande MLI". Thèse de Magister. 2005. Université Mentouri de Constantine. Algérie.

[40] Yacine Ibrahim. "Système hybride photovoltaïque–éolien–Diesel sans stockage. Etudes, Modélisation et Contrôle en Matlab/simulink". Mémoire d'ingénieur. 2013. Université Libanaise. Liban.



ANNEXE

Les Paramètres de simulation :

Paramètre de simulation de turbine	Paramètre de simulation de GSAP	Paramètre de régulateur de MPPT
<p>couple mécanique :</p> <p>C1=0.5176 C2=116 C3=0.4 C4=5 C5=21 C6=0.0068</p> <p>Le gain de multiplicateur de vitesse :</p> <p>G=5.4</p> <p>Rayon de turbine :</p> <p>R=3</p> <p>la masse volumique de l'air :</p> <p>$\rho=1.22$</p> <p>inertie de la turbine :</p> <p>J=0.042</p> <p>coefficient de frottement de la turbine :</p> <p>F=0.017</p>	<p>l'inductance sur l'axe d :</p> <p>Ld=2e-3</p> <p>l'inductance sur l'axe q :</p> <p>Lq=2e-3</p> <p>Résistance des enroulements statorique :</p> <p>Rs=0.18 ; 0.23</p> <p>Nombre de pôles :</p> <p>P=4</p> <p>Flux des aimants :</p> <p>$\Psi_f=0.123 ; 0.103$</p> <p>Moment d'inertie de la génératrice :</p> <p>J=0.48</p> <p>coefficient de frottement visqueux :</p> <p>F=0</p> <p>couple mécanique fourni par la turbine :</p> <p>c=60.28</p>	<p>$\lambda_{opt}=8.1$</p> <p>$\tau=1.2$</p> <p>*0.04 *0.2 *0.02 *1.5 *2 *3 *4 *5 *10 *1.5 *0.1 *1.1 *0.5 *0.1</p>

Résumé

L'étude présente un comparatif des architectures et des stratégies de gestion d'énergie dédiées à un système éolien basé sur les voilures de type Savonius (VAWT). Un dispositif MPPT doit être introduit en vue d'obtenir un rendement énergétique maximal. Un pilotage direct en couple ou en vitesse ou indirect par le contrôle du courant du côté du bus continu est possible. Afin de minimiser les coûts de la chaîne de conversion statique des structures simples (redresseur à diodes, hacheur dévolteur) sont étudiées et comparées avec un montage reposant sur le redresseur MLI.

Mots clés : Eolien, MPPT, PI, Architecture.

Summary

This study presents a comparison of architectures and strategies of energy management dedicated to VAWT turbines such as Savonius. A Maximum Power Point Tracking must be implemented in order to optimize the energetic behavior. A torque or a speed control, or an indirect control of the DC bus current is possible. Aiming to minimize the cost of the static conversion structure, simple structures (diode bridge inverter, associated with DC-DC chopper) are analyzed and compared with a system based

Keywords: Wind turbine, MPPT, PI, Architectures.

الملخص :

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة السلوك الديناميكي لتوربينات الرياح التي تستند على المولد في النظام المستمر و تناولنا دراسة الطاقة المتجددة للرياح بصفة عامة و في المرحلة الثانية صورنا سلسلة التحول لتوربينات الرياح بالنموذج التابع لها و المرحلة الثالثة طبقنا تقنية (MPPT) لاستخراج الطاقة القصوى. وتطرقنا أيضا الى توفير مبدأ التحكم المستقل في الاستطاعات الكهربائية P، Q ، بتطبيق التحكم التقليدي (PI) وبعده التحكم (PI) غامض. ان أداء ومثانة التحكم يتم تحليله ومقارنته بواسطة برنامج المحاكاة المستندة Matlab/Simulink.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح ,تقنية MPPT ,PI غامض.