2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

***F**aculté de **T**echnologie*

Mémoire de fin d'études de Master

Filière: Electromécanique
Spécialité : Mécatronique

Contrôle D'un Système éolien de Pompage

Présenté par

ZOHRA GEUBOUR

Proposé et Dirigé par

Pr.SALAM ABUDURA

Promotion Juin 2020

بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicaces

Je dédie ce travail à mon cher père et ma chère mère qui grâce à eux je suis arrivée à ce niveau

A ma famille, ma chères sœurs Hayet ,Ranya et mes cher Frère Walid

A toutes mes amie surtout:Assma, Amina,

Massouda, Falla , Narimen ,Bouchra

Et bien sur Hamza et Walid

Enfin a tout la promotion 2020 de Mécatronique

Remerciement

Le grand remerciement revient à Dieu qui m'a donné la force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Pr:Abudura Salam pour m'avoir encadré encouragé et conseillé durant la période du mémoire.

Je remercie tout le personnel Enseignant du Département Mécanique

je remercie vivement tous mes amie sans exception, ainsi que tous les personnes qui de près ou de loi, ont contribué à la réalisation de ce travail.

2020

RÉSUMÉ

Notre travail s'est porté sur le système de pompage éolien, qui est composé d'une turbine éolienne, d'une GSAP, des convertisseurs d'électronique de puissance et d'un groupe motopompe (pompe centrifuge et une machine asynchrone). Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien, et donné un aperçu sur les différentes combinaisons et une brève description du système de pompage éolien, puis nous avons cité ces avantages et inconvénients, les différents types de convertisseurs et de groupe motopompe utilisés puis on a illustré un schéma globale du système a étudié. Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments de la chaine de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne à axe horizontale, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice synchrone a aiment permanant. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge. Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord défini le principe de la commande vectorielle, puis nous avons développé quelques équations, permettent le découplage entre le flux et le couple, et on a expliqué le principe d'optimisation pour la turbine sans asservissement de vitesse et les schémas de principe sont illustré. Les résultats obtenus confirment les performances souhaités en régime établie .Nous avons présentés des résultats de simulation pour un vent qui augment de façon linéaire puis il se stabilise à . En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants : faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réellesde fonctionnement et l'association d'un système de stockage d'énergie ; Faire un système de control pour des vents fort ; Concrétisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.

Mots clés : Eolienne, Pompe, GSAP, MAS, MLI,

ABSTRACT

Our work focused on the wind pumping system, which is composed of a wind turbine, a GSAP, power electronics converters and a pump unit (centrifugal pump and an asynchronous machine). In the first chapter, we presented generalities on the wind system, and gave an overview on the different combinations and a brief description of the wind pumping system, then we cited these advantages and disadvantages, the different types of converters and group motor pump used then an overall diagram of the system studied has been illustrated. The second chapter was devoted to the modeling of the different elements of the wind energy conversion chain, which is composed of a wind turbine with horizontal axis, operating at variable speed, with a synchronous generator like permanent. The modeling of the different converters used as well as the motor-pump group, which is composed of an asynchronous motor and a centrifugal pump. In the third chapter, we first defined the principle of vector control, then we developed some equations, allow the decoupling between flux and torque, and we explained the optimization principle for the turbine without servo speed and schematic diagrams are illustrated. The results obtained confirm the desired performance under established conditions. We have presented simulation results for a wind which increases linearly and then stabilizes at. In perspective, we suggest continuity in the following areas: implementing an overall system taking into account the real operating conditions and the association of an energy storage system; Make a control system for strong winds; Practical realization of this work on an experimental test bench.

Keywords: Wind turbine, Pump, GSAP, MAS, MLI
,

الملخص

ركز عملنا على نظام ضخ الرياح ، الذي يتكون من توربينات الرياح ، GSAP ، محولات إلكترونيات الطاقة ووحدة ضخ (مضخة طرد مركزي وآلة غير متزامنة). في الفصل الأول قدمنا عموميات عن نظام الرياح ، وقدمنا لمحة عامة عن التوليفات المختلفة ووصفًا موجزًا لنظام ضخ الرياح ، ثم ذكرنا هذه المزايا والعيوب ، والأنواع المختلفة من المحولات والمجموعات مضخة المحرك المستخدمة ثم تم توضيح رسم تخطيطي شامل للنظام المدروس. تم تخصيص الفصل الثاني لنمذجة العناصر المختلفة لسلسلة تحويل طاقة الرياح ، والتي تتكون من توربين رياح بمحور أفقي ، يعمل بسرعة متغيرة ، مع مولد متزامن مثل دائم. نمذجة المحولات المختلفة المستخدمة بالإضافة إلى مجموعة مضخة المحرك ، والتي تتكون من محرك غير متزامن ومضخة طرد مركزي. في الفصل الثالث ، حددنا أولاً مبدأ التحكم بالنواقل ، ثم قمنا بتطوير بعض المعادلات ، والسماح للفصل بين التدفق وعزم الدوران ، وشرحنا مبدأ التحسين للتوربين دون استعباد يتم توضيح السرعة والرسوم التخطيطية. تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها الأداء المطلوب في ظل ظروف ثابتة ، وقد قدمنا نتائج محاكاة للرياح التي تزداد خطياً ثم تستقر عند. في المنظور ، نقترح الاستمرارية في المجالات التالية: تنفيذ نظام شامل مع مراعاة ظروف التشغيل الحقيقية وارتباط نظام تخزين الطاقة ؛ إنشاء نظام تحكم للرياح القوية ؛ الإدراك العملي لهذا العمل على منضدة اختبار تجريبي.

الكلمات الرئيسية: توربينات الرياح ، مضخة ، GSAP، MAS، MLI ،

Table des matières

Introduction général.....01

Chapitre I: Généralités sur le système éolien et pompage

I.1 Introduction.....03

I.2 Energie éolienne.....03

I.3 Avantages et inconvénient de l'énergie éolienne.....03

I.3.1 Les avantages.....03

I.3.2 Les inconvenies.....04

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....04

I.5 Principaux composants d'une éolienne.....04

I.6 les différents types des turbines éoliennes.....05

I .6.1 Les éoliennes à axe vertical (EAV).....05

I.6.2 Les éoliennes à axe horizontal(EAH).....06

I.6.3 Avantages et inconvénient des différents types éoliens.....07

I.7 Gisement éolien en Algérie.....08

I.8 Zones de fonctionnement de l'éolienne.....09

I.9 Eoliennes à vitesse fixe et variable.....10

I.9.1 Eolienne à vitesse fixe.....10

I.9.2 Eolienne à vitesse variable.....11

I.10 Régulation mécanique de la puissance.....12

I.11 Applications de l'énergie éolienne.....13

I.12 Description d'un système de pompage.....13

I.13 Pompage éolienne.....14

I.14 Les différents systèmes de pompages.....14

I.14.1 Pompage éolien mécanique 14

I.14.2 Pompage éolien électrique 16

I.15 Type de pompes utilisées.....16

I.15.1 Les pompes centrifuges.....17

I.15.1.1 Composition d'une pompe centrifuge.....18

I.15.2 Les pompes volumétriques.....19
I.16 Génératrices synchrones.....19
I.16.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents.....20
I.17 Convertisseurs utilisées.....20
I.17.1Structure avec redresseur à diodes (AC/DC).....20
I.17.2 Le convertisseur continu/alternatif (onduleur).....21
I.17.3 Structure avec redresseur/onduleur à IGBT commandés par MLI.....21
I.17.4 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur.....22
I.18 Machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs.....22
I.18.1 Eolienne à machine asynchrone à cage MAS.....22
I.18.2 Eolienne à machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....23
I.18.3 Machines à courant continu.....23
I.19. Structure du système de pompage éolien à étudier.....23
I.20 Conclusion.....24

Chapitre II : Modélisation des éléments du système éolien de pompage

II.1 Introduction.....25
II.2 Modélisation de la turbine éolienne.....25
II.2.1 Modélisation de la vitesse du vent.....25
II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne.....25
II.2.3 Modélisation de l'arbre de la machine.....26
II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....26
II.3.1 Avantages de l'utilisation des MSAP.....27
II.3.2 Composition de la MSAP.....27
II.3.1Mise en équations du modèle de MSAP.....28
II.3.1.1 Equation mécanique.....28
II.3.1.2 Equations électriques.....28
II.3.1.3 Equations magnétiques.....29
II.4 Transformation de Park 30
II.4.1 Equations électriques.....31
II.4.2 Equations magnétiques.....31
II.4.3 Couple électromagnétique.....31
II.5 Modélisation de bus continu.....32

II.6 Modélisation du redresseur.....33
II.7 Modélisation de l'onduleur.....34
II.7.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension triphasée.....34
II.8Modulation de largeurs d'impulsions MLI.....36
II.9 Principe de la commande par MLI sinus-triangle.....37
II.9.1 Caractéristiques de MLI.....37
II.10 Modélisation de la machine asynchrone 38
II.10.1 Hypothèse simplificatrices.....38
II.10.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé 39
II.11 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone.....41
III.12Modélisation de système de pompage avec l'éolien.....43
II.12.1 Model d'un motor DC.....44
II.12.2 Modélisation de la pompe centrifuge.....44
II.13 Conclusion.....45

Chapitre III: Commande de la chaine étudiée

III.1 Introduction.....46
III.2 Généralités sur la commande vectorielle.....46
III.3 Commande vectorielle.....47
III.4 Type de commande vectorielle.....47
III.4.1 Commande vectorielle directe.....47
III.4.2 Commande vectorielle indirect.....47
III.5 Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle.....48
III.5.1 Avantages de la commande vectorielle.....48
III.5.2 Inconvénients de la Commande vectorielle.....48
III.6 Commande vectorielle GSAP.....48
III.6.1Principe de la commande vectorielle d'une GSAP.....48
III.6.2 Description 49
III.7 la commande MPPT.....50
III.7.1 Méthode MPPT sans asservissement de vitesse.....50
III.8 Principe du Contrôle vectorielle à flux orienté.....52

III.9 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique.....53
III.9.1 Estimation de φ_r.....54
III.9.2 Estimation des angles $\varphi_r et \varphi_s$.....54
III.10 Calculs des régulateurs.....55
III.10.1 Réglage de la boucle de vitesse.....55
III.10.2 Régulateur de flux.....56
III.11 Découplage.....56
III.12 Contrôle de la connexion au réseau.....57
III.12.1 Mode de Synchronisation.....57
III.12.2 Contrôle des courants par la commande du convertisseur de puissance57
III.12.2.1 Contrôle des courants envoyés au réseau.....59
III.12.2.2 Régulation des puissances.....59
III.13 Conclusion.....60

Conclusion générale.....61
Références bibliographie.....62

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Principe composants d'une éolienne.....05

Figure I-2: éolienne à axe verticale.....06

Figure I-3: éolienne à axe horizontal.....07

Figure I-4 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie.....09

Figure I-5 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....10

Figure I-6: Système de pompage éoliennes.....14

Figure I-7 : Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique.....15

Figure I-8 : Eolienne de pompage d'eau électrique.....16

Figure I-9 : Pompe centrifuge.....17

Figure I-10 : Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge.....18

Figure I-11: Différents types de rotor.....18

Figure I-12: Composition d'une pompe centrifuge.....19

Figure I-13 : Pompe volumétrique.....19

Figure-14: Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents..20

Figure I-15 : Machine synchrone avec redresseur à diode.....21

Figure I-16 : Schéma d'un onduleur.....21

Figure I-17 : Machine synchrone avec redresseur à diodes et à hacheur dévolteur.22

Figure I-18 : Structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne.....24

Figure II-1: La constitution de la MSAP.....28

Figure II-2: présentation d'une MSAP dans le repère (abc) 28

Figure II-3: Représentation de MSAP dans le repère (d, q) 30

Figure II-4: Schéma simple du circuit du bus continu.....33

Figure II-5: Schéma d'un redresseur.....34

Figure II-6: Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux 35

Figure II-7: Principe de la commande MLI sinus-triangle.....38

Figure II-8: Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....39
Figure II-9: Modèle de Park d'un moteur asynchrone.....42
Figure II-10: Structeur de système de pompage avec l'éolien.....44
Figure III-1: Schéma bloc de commande du générateur éolien.....50
Figure III-2: Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.....51
Figure III-3: Diagramme Simulink de la turbine avec MPPT classique.....52
Figure III-4: Schéma de principe de la commande de vectorielle.....53
Figure III-5: Principe du contrôle vectoriel dans un référentiel lié au flux rotorique.....53
Figure III-6: Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.....55
Figure III-7: Schéma bloc de régulation de flux par un régulateur PI.....56
Figure III-8: Description des couplages.....57
Figure III-9: REM du système de commande du convertisseur du côté réseau....58
Figure III-10: Schéma du découplage entre les courants transités au réseau.....59

Liste des tableaux

Tableau I-1: Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes.....08
Tableau I-2: Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable.....12

NOMENCLATURE- Abréviations

MLI Modulation de la largeur d'impulsion

MPPT Maximum Power Point Tracking

PI Proportionnel intégrale

MSAP Machine synchrone à aimant permanant

MAS Machine Asynchrone

GSAP Génératrice Synchrone à Aimant Permanant

AC Alternatif curent

DC Direct curent

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

FOC Field Oriented Contro

$[i_{rabc}]$: Vecteurs des courants rotoriques

$[i_{rdqo}]$: Vecteurs des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[I_{sabc}]$: Vecteurs des courants statoriques (A)

$[i_{sdqo}]$: Vecteurs des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[R_r]$: Vecteurs des résistances rotoriques

$[R_s]$: Vecteurs des résistances statoriques

$[V_{rdqo}]$: Vecteurs des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[V_{sabc}]$: Vecteurs des tensions statoriques (V)

$[V_{sdqo}]$: Vecteurs des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\Phi_{rabc}]$: Vecteurs des flux rotoriques

$[\Phi_{rdqo}]$: Vecteurs des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\Phi_{sdqo}]$: Vecteurs des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\Phi_{sdqo}]$: Vecteurs des flux statoriques

C : Capacité du bus continu (F)

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine asynchrone (N.m)

C_p : Coefficient de puissance

C_r : Couple résistant de la pompe (N.m)

C_t : Couple de la turbine éolienne (N.m)

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s_2)

H : Hauteur totale du pompage (m)

i_{a*} ,i_{b*} ,i_{c*} : Courants de référence (A)

I_{ach} ,i_{bch} ,i_{cch} : Courants de sortie (A)

I_c : Courant capacitif (A)

i_{dc} : Courant modulé par le redresseur (A)

i_{ra} ,i_{rb} ,i_{rc} : Courants rotorique (A)

i_{rd} ,i_{rq} : Courants rotorique dans le repère de Park (d,q) (A)

i_{sa} ,I_{sb} ,I_{sc} : Courants statorique (A)

i_{sd} ,i_{sq} : Courants statorique dans le repère de Park (d,q) (A)

J : Inertie totale ramenée à l'arbre du moteur kg.m^2

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

L_s : Inductance propre d'une phase statorique

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H)

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H)

P : Nombre de pair de pole de la machine

P_{hyd} : puissance hydraulique (W)

P_t : Puissance de la turbine éolienne (W)

P_v : La puissance fournie par le vent (W)

Q : Débit de la pompe (m^3/s)

R_r : Résistance d'une phase rotorique(Ohm)

R_s : Résistance d'une phase statorique (Ohm)

S_7,S_8,S_9 :Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur

S_t : Surface balayée par la turbine éolienne (m^2)

T_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone (N.m)

p : Opérateur de Laplace

T_r : Constante de temps rotorique (s)

T_s : Constante de temps statorique (s)

V : Vitesse du vent (m/s)

V_a ,V_b ,V_c : Tensions à la sortie de l'onduleur (V)

V_a ,V_b ,V_c : Tensions de référence (V)

V_{an} ,V_{bn} ,V_{cn} : Tensions de phase de la charge(V).

V_{ao} ,V_{bo} ,V_{co} : Tensions à l'entrée de l'onduleur(V).

V_{dc} : Tension du bus continu (V).

V_{rd} ,V_{rq} : Tensions rotorique dans le repère de Park (d,q) (V).

V_{sa} ,V_{sb} ,V_{sc} : Tension d'alimentation des enroulements statorique (a, b, c) (V).

V_{sd} ,V_{sq} : Tensions statorique dans le repère de Park (d,q) (V).

β: L'angle de calage des pales (rad).

Θ : Angle électrique de position de la machine (rad).

Θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park.

Θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d »du repère de Park.

ρ : Masse volumique de l'air (kg/m_3).

Ω : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

Ω_t : Vitesse de la turbine éolienne (rad/s).

Φ_{rd} , Φ_{rq} : Flux rotorique dans le repère de Park (d,q).

Φ_{sd} , Φ_{sq} : Flux statorique dans le repère (d,q).

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).

ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).

Introduction générale

Une éolienne est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre, abondante et inépuisable qui peut produire l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluant. Sachant que nous nous intéressons a un système de pompage éolien, nous devons nous familiarisé avec tous les éléments le constituant **[Frèd03]** .

L'énergie éolienne est utilisée dans diverses applications en site isolés telle que l'éclairage et le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répondue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes **[Zaft17]**

Dans notre travail, on s'intéressera à l'énergie du vent qui fera l'objet de ce mémoire dans la recherche de solutions à la maîtrise de cette énergie applicable au pompage, il ne paraît intéressant de connaître caps bénéfices à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) à grand nombre de pôles qui rend les systèmes plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien**.**

En raison d'une évolution incessante des outils de production, les industriels deviennent de plus en plus exigeants sur la fiabilité, la disponibilité et la facilité d'entretien de ces outils. Grace à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entrainement électrique à vitesse variable a connu ces dernières années un essor considérable. Cet avantage a joué en faveur de la MAS, car actuellement, elle est utilisée pour la réalisation de la majorité des entrainements à vitesses variables. Des commandes assez laborieuses ont été mis au point pour réaliser un contrôle découplé de la MAS en utilisant des repères appropries.

Le travail réalisé dans ce mémoire, est structuré en trois chapitres :

Dont le premier chapitre sera consacré à la présentation des généralités sur le système éolien de pompage . il se divise en deux parties :

* La première partie rappellera les notions élémentaires du fonctionnement d'un

système éolien ainsi que les différents types d'aérogénérateurs. Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne, et des généralités sur le système de pompage.

* La deuxième partie de ce chapitre concerne les différentes chaînes de conversion électromécaniques (machines et convertisseurs) permettant de transformer l'énergie mécanique présente sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la Chaine de conversion éolienne, composée d'une éolienne à axe horizontal, génératrice Synchrone a aimant permanent, d'un redresseur, d'un onduleur et enfin, la modélisation du groupe motopompe, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge.

Dans le dernier chapitre sera consacré à la définition de la commande vectorielle appliqué à la GSAP et la MAS ensuite, on définira le principe de la technique MPPT qui sera appliquée à la turbine afin d'extraire le maximum d'énergie,et FOC, ainsi que le contrôle de la connexion au réseau.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale.

I.1 Introduction

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connait un essor considérable depuis ces dernières décennies. Cela est dû d'une part, a des contrainte d'ordre environnementales mais également à une maitrise de plus en plus grande des technologies mises en ouvres pour assurer cette conversion . L'énergie éolienne est utilisée dans déverses applications en site isolé telle que l'éclairage et le pompage. Sachant que nous nous intéresserons à un système de pompage éolien. Nous devons nous familiarisé avec tous les éléments le constituant.

dans ce premier chapitre porte un aperçu sur la production d'énergie éolienne en général, des types de machines utilisés, déférents structures de convertisseurs exploités et tous les éléments de la chaine de pompage éolien seront expliqués.

I.2 Définition d'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'airs qui sont dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créer et les masses d'airs sont en perpétuelle déplacement [**mir05**]. L'évolution de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir ces dernières années une alternative aux sources traditionnelles. Un aérogénérateur est une machine qui utilise l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique **[idj05].** Les avantages de l'énergie éolienne les plus importants sont **.**

- Energie renouvelable, gratuite, et abondante.
- Fiable et rentable
- Elle n'est pas une énergie à risque
- C'est une l'énergie ma moin chère après l'hydraulique

I.3 Avantages et inconvénient de l'énergie éolienne

I.3.1 Les avantages:

- les activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien
- un parc éolien prend peu de temps à construire
- l'énergie éolienne est abondante: le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable;
- l'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation;

I.3.2 Les inconvénients:

- Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable;
- L'installation d'une éolienne nécessite différents critères (vents fréquents, surface suffisante, pas d'obstacles au vent, accès facile, proximité du réseau électrique, pas de contraintes environnementales tels que les monuments historiques, site éloigné des habitations, avoir les autorisations réglementaires);
- La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations;
- Le coût de production alourdit tout de même le prix total de l'éolienne;
- Bien que cette énergie soit propre, le coût énergétique de fabrication est très important;

I.4 Principe de fonctionnement de l'éolienne

Sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche, ses pales tournent. Le rotor (hélice) est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur, le mât varie entre 10 et 100 m de hauteur. Le rotor comporte souvent 3 pales, mesurant entre 5 et 90 m de diamètre. Pour faire tourner l'hélice, ilfaut une vitesse minimale d'environ 10 à 15 km/h. Pour des raisons de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner quand le vent dépasse 90 km/h. La vitesse optimale est de 50 km/h. L'hélice entraîne un axe dans la nacelle relié à un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

I.5 Principaux composants d'une éolienne

. ***Le mât :*** Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

Les pales : Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit

La nacelle : Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : **arbres, multiplicateur, roulement, le frein** à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le **générateur** qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, les **systèmes hydrauliques** ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

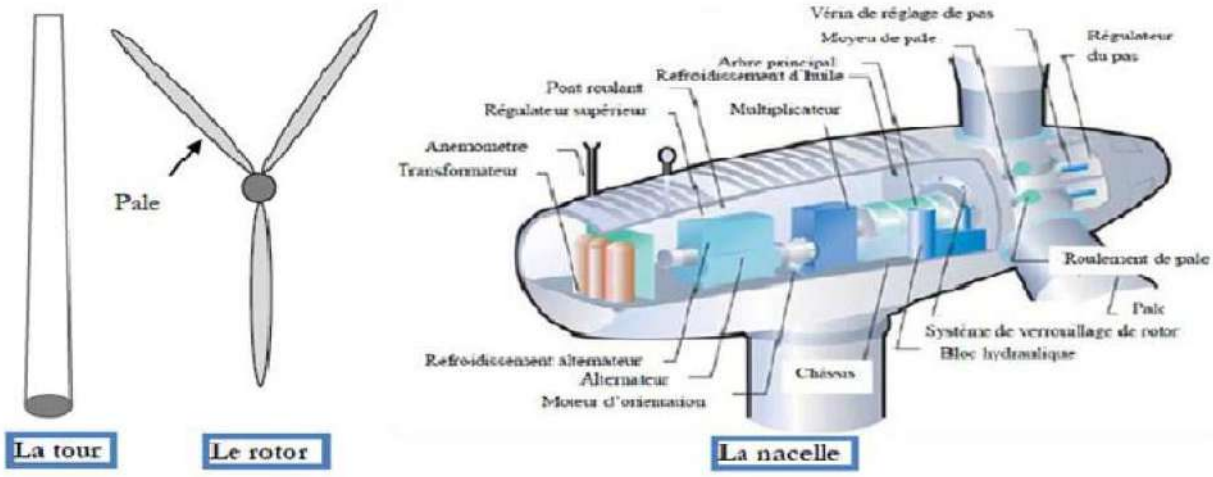


Figure I-1: Principe composants d'une éolienne

I.6 les différents types des turbines éoliennes

On peut partager les éoliennes en deux catégorie : celles a axe verticale et celles a axe horizontale.

I.6.1 Eolienne à axe vertical:

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux . A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins repandue.



Figure I-2: éolienne à axe verticale

I.6.2 Les éoliennes à axe horizontale:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important.



Figure I-3: éolienne à axe horizontal

I.6.3 Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes

Types de Turbines	Avantages	Inconvénients
Eoliennes à Axe Horizontal (EAH)	*Choix plus large * Installateurs compétents *Technologie éprouvée *Le prix	*Fonctionnement par intermittence *Doit être orienté selon les vents *Mauvais rendement avec des vents turbulents
Eoliennes à Axe Vertical (EAV)	*La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	* Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. * La conception verticale

	*Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor. *Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief. * Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

Tableau I-1 : Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes.

I.7 Gisement éolien en Algérie

L'Algérie a un régime de vent modéré**,** la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à une autre car elle s'étend sur un large surface d'où la diversification de sa topographie et son climat. L'Algérie se subdivise en deux principale zones géographiques distinctes, le nord méditerranéen par un littoral de 1200km avec des reliefs montagneux, représenté par l'atlas Talilien et saharien. Entre ces dernières, s'intercalent des pleines et les haut plateaux de climat continental. Quant au sud il se caractérise par un climat saharien.

Au sud d'Algérie, on y trouve des vitesses de vent plus importantes qu'au nord, elles sont particulièrement supérieures à 4 m/s au sud-ouest, et supérieur à 6m/s dans la région d'Adar tant dit que le nord est faiblement venté, cependant on y trouve une présence de microclimat sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El khither ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud, comme montrer sur la figure I.4 **[Aich03]**.

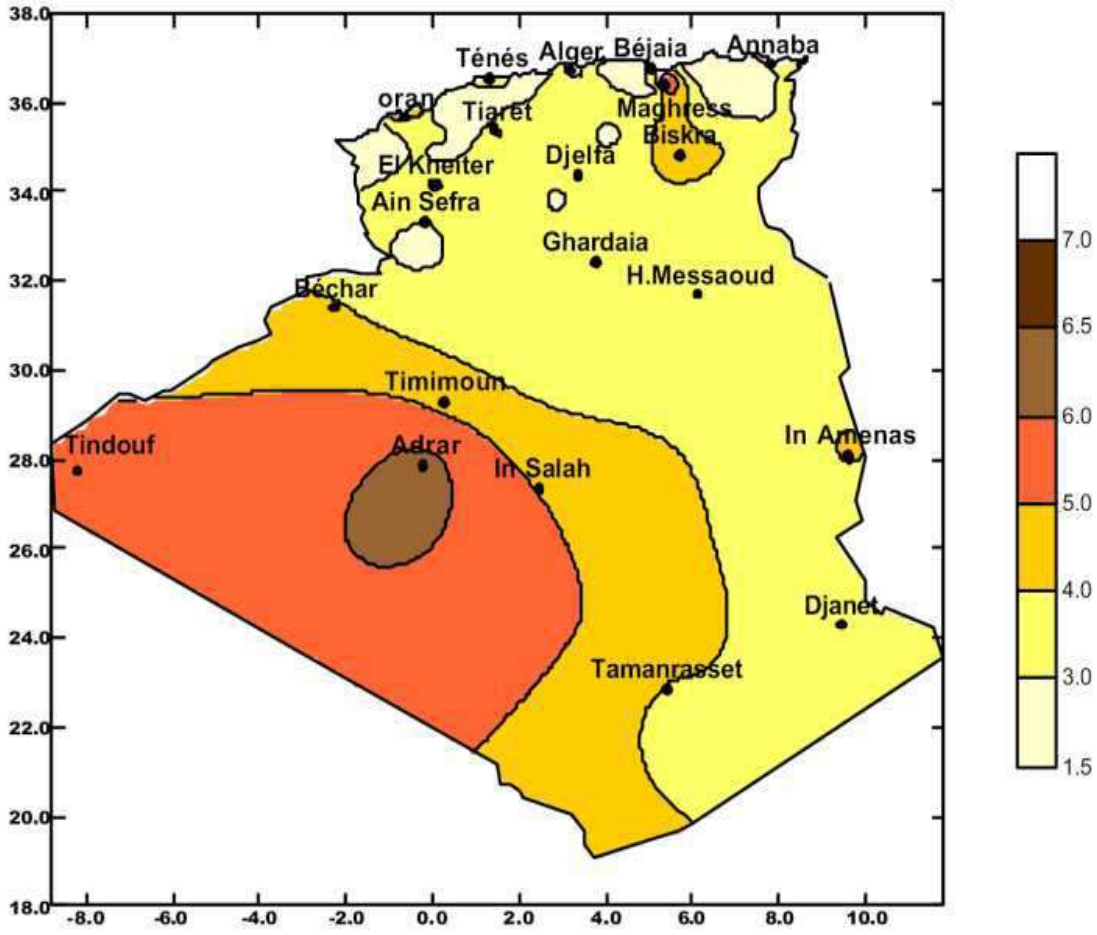


Figure I-4: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie

I.8 Zones de fonctionnement de l'éolienne

La courbe de puissance d'un aérogénérateur qui est généralement fournie par le constructeurm et en évidence les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne suivant la vitesse du vent comme le montre la figure (I.5) **[Mtl10].**

• **Zone I** : V <Vd : la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

• **Zone II** : Vd <V<Vn : La puissance capté en cette zone est proportionnelle au carré de la vitesse du vent.

• **Zone III** : Vn<V<Vm : la puissance est maintenant plus importante et constante tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale (P=Pn) quelque soit la vitesse du vent. Cette zone correspond au fonctionnement en pleine charge.

• **Zone IV** : cette zone est dans laquelle le système de sureté de fonctionnement arrête le transfert d'énergie.

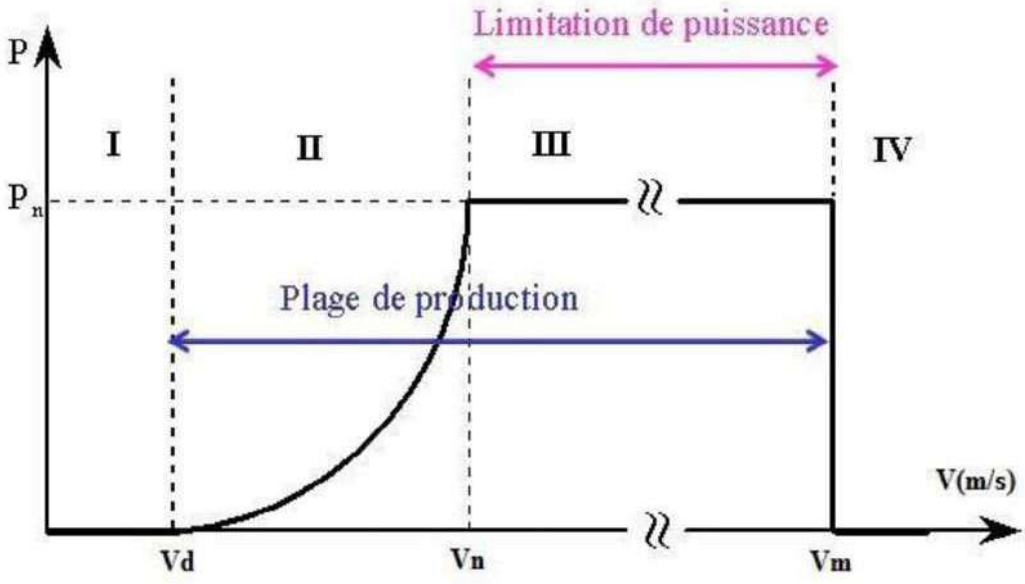


Figure-5: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent**[Mir05]**

Avec :

Vd la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Elle varie de 2.5m/s à 4m/s pour les éoliennes de forte puissance selon le constructeur.

Vn la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale

de la génératrice. Celle-ci varie de 11.5m/s à 15m/s suivant les constructeurs et en fonction de la technologie.

Vm vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Vm vaut 25m/s

I.9 Eoliennes à vitesse fixe et variable

Les éoliennes peuvent être classées selon leurs vitesse en deux partie: celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

I.9.1 Eolienne à vitesse fixe:

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable. Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une

fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

I.9.2 Eolienne à vitesse variable:

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ, qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. Comme le montre le tableau ci-dessous, les principales avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevé, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique

Mode de Fonctionnement	**Avantages**	**Inconvénients**
Vitesse fixe	*Système électrique simple *Faible cout de construction et maintenance ; *Grande fiabilité et non nécessité de système électrique de commande	*Rendmente de conversion d'ènergie faible *Fort stress mècanique qui augmente le coût de la structure devant supporter cecii *Fluctuation importante de la puistsance
Vitesse variable	*Une meilleure extraction de l'énergie du vent ;	*cout et pertes supplémentaires dues à

	*Augmentation du rendement énergétique ; *Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance	l'utilisation desconvertisseurs *controle de système plus complique

Tableau I-2: Comparaison des éoliennes a vitesse fixe et a vitesse variable.

I.10 Régulation mécanique de la puissance

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale p_n à une vitesse de vent nominale v_n au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au delà d'une vitesse maximale v_{max} qui pourrait endommager la turbine.

Les stratégies de commande aérodynamiques permettent d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent) **[Rob07].** Trois systèmes de régulation existent.

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

- Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "STALL Control". Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor ;

-Un dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "Active stall". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances **[TBe10].**

I.11 Applications de l'énergie éolienne

La technologie des systèmes éoliens est très ancienne, elle est utilisée depuis des millénaires pour plusieurs fonctions :

-La signalisation maritime

-La télécommunication

-La radio diffusion

-Les communautés éloignées

-Le pompage de l'eau, qui est la plus ancienne application et la plus répondu jusqu'à présent, car elle utilise une énergie propre qui ne dégage pas de polluants de plus, c'est une solution pour les régions isolées qui s'adapte parfaitement aux conditions naturelles et sociales tout en améliorant la technicité et l'environnement sanitaire des populations **[Zaft17]**.

I.12 Description d'un système de pompage

Le système qu'on va étudier est résumé dans la figure (I-6)

Il est constitué principalement :

-D'un générateur éolien ;

-De convertisseurs statiques ; « un redresseur » ;

-D'un groupe motopompe qui comprend un moteur et une pompe ;

-D'un réservoir de stockage

Les avantages de choix de système sont :

-Production 100%

-Par de souci d'environnement, n'émet pas des gaz à effet de serre **[Nben16]**.

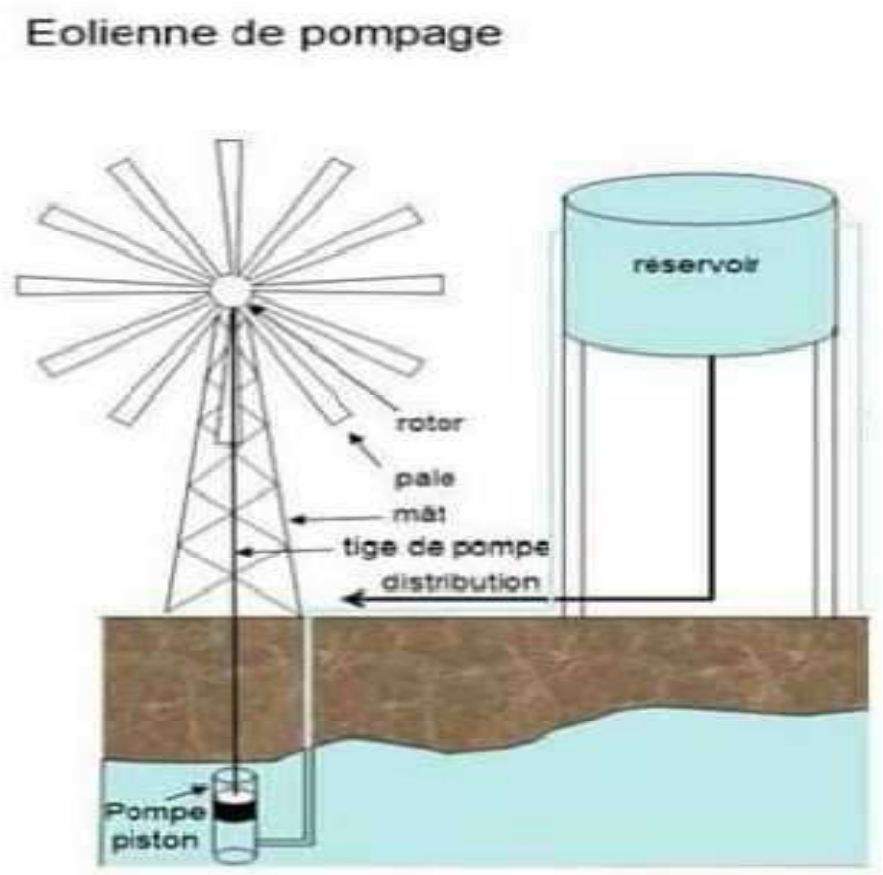


Figure I-6: système de pompage éoliens **[Nben16]**

I.13 Pompage éolien

Les éoliennes de pompage sont utilisées depuis l'antiquité pour pomper de l'eau dans des puits. Cette utilisation revient à la mode chez les particuliers notamment dans le milieu rural, dans l'optique d'une économie d'énergie et d'un pompage d'eau efficace à moindre coût**.** Aussi un tel système présente des avantages, du fait qu'il est souple d'installation, bonne régulation et une maintenance réduite, également il représente des inconvénients comme le cout élevé, rendement que pour des vent élevés (4 à 12 m/s) et son exigence de stockage afin de subvenir aux besoins pour les jours peut venté **[Khw12].**

Deux types de pompage existent :

- Le système mécanique
- Le système électrique

I.14 Les différents systèmes de pompages

I.14.1 Pompage éolien mécanique:

Le principe de fonctionnement est le suivant : un rotor éolien d'une vingtaine de pales entraîne, par un système de bielle-manivelle, une pompe à pistons plongée au fond du puits (figure 1.7). C'est un système qui convient assez bien pour les zones peu ventées, avec des besoins en eau journaliers n'excédant pas les 20 m3 et des profondeurs de puits ne dépassant pas les 50 m. Avec des puits plus profonds, les quantités d'eaux pompées sont faibles et les risques de rupture de la tringlerie de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécaniques **[Aha17]**.

Pour assurer un fonctionnement satisfaisant, les conditions suivantes doivent être remplies :

- vents de plus de 8 km/h pendant au moins 60 % du temps ;
- disponibilité du matériel voulu ;
- puits exploitable quotidiennement pendant de nombreuses heures ;
- capacité de stockage des réserves pour trois jours d'autonomie
- libre accès du vent jusqu'à l'éolienne

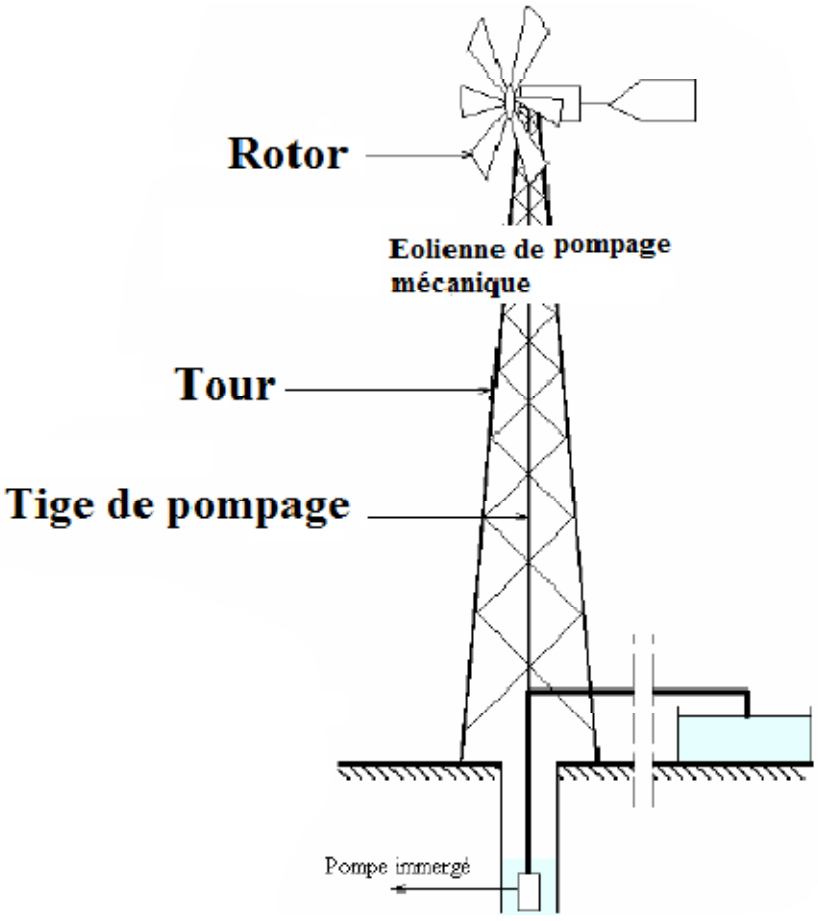


Figure I-7: Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique

I.14.2 Pompage éolien électrique:

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se placé près de la source d'approvisionnement en eau. Ce système commande une pompe électrique (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (puit ou autres ...) et la refoule à l'endroit de son utilisation (système d'irrigation, abreuvoir a bétail, ...). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de la sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électrique ne comprennent pas de batterie. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie **[Chad12].**

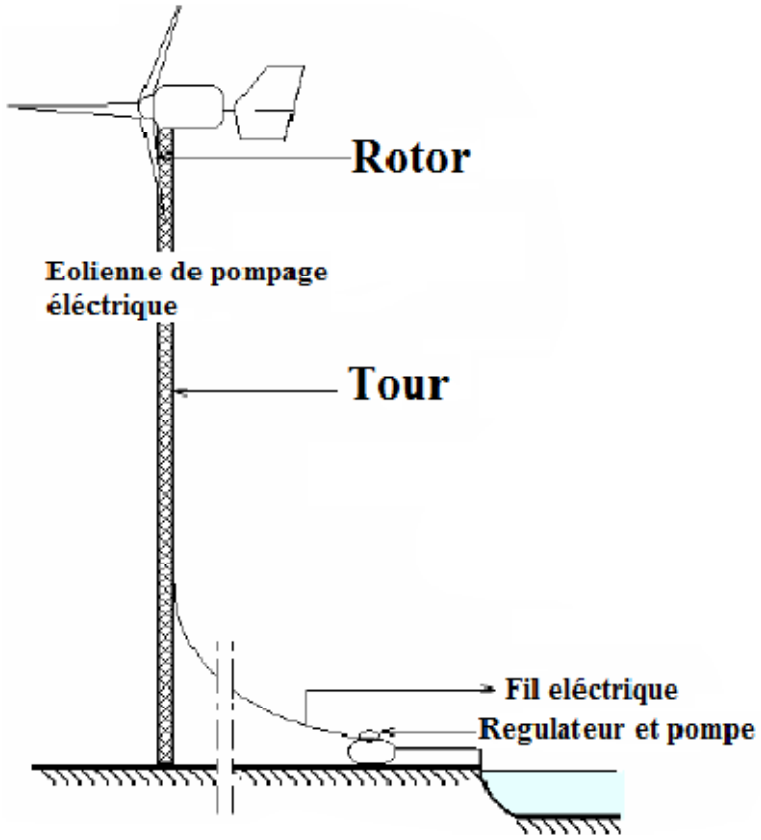


Figure I-8: Eolienne de pompage d'eau électrique

I.15 Type de pompes utilisées

Une pompe est une machine capable de transformer l'énergie mécanique en énergies hydraulique. Il y a plusieurs types de pompes disponibles pour les systèmes

de pompage. On dénombre principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

I.15.1 Les pompes centrifuges:

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Elle utilise les variations de vitesse de fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aube ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformé en pression par réduction de vitesse **[Thi10].**Son couple augmente très rapidement
en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance absorbée est proportionnelle au produit Q*HMT. Ces pompes sont donc utilisées pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100mettres) **[Equ93].**

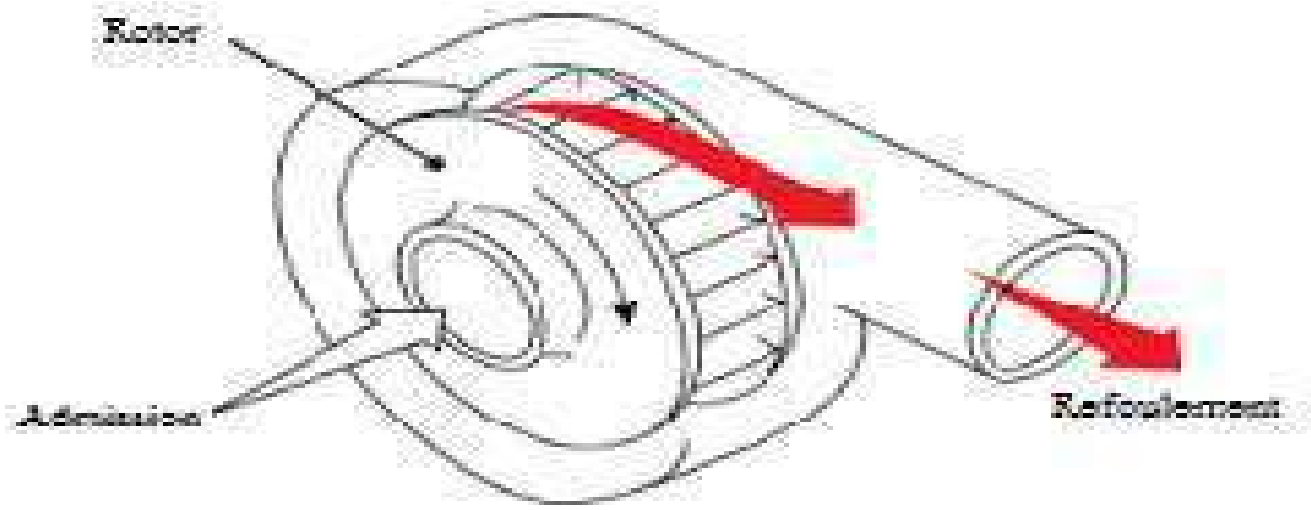


Figure I-9: Pompe centrifuge

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur, et lorsque la pompe sera pleine d'eau, la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine, de ce fait engendre une dépression. Cela provoque un appel des tranches suivantes et par suite, un écoulement continu de la veine liquide. Les caractéristiques C(v) et Q(v) sont montrés dans la figure I.10 **[Khe11]**

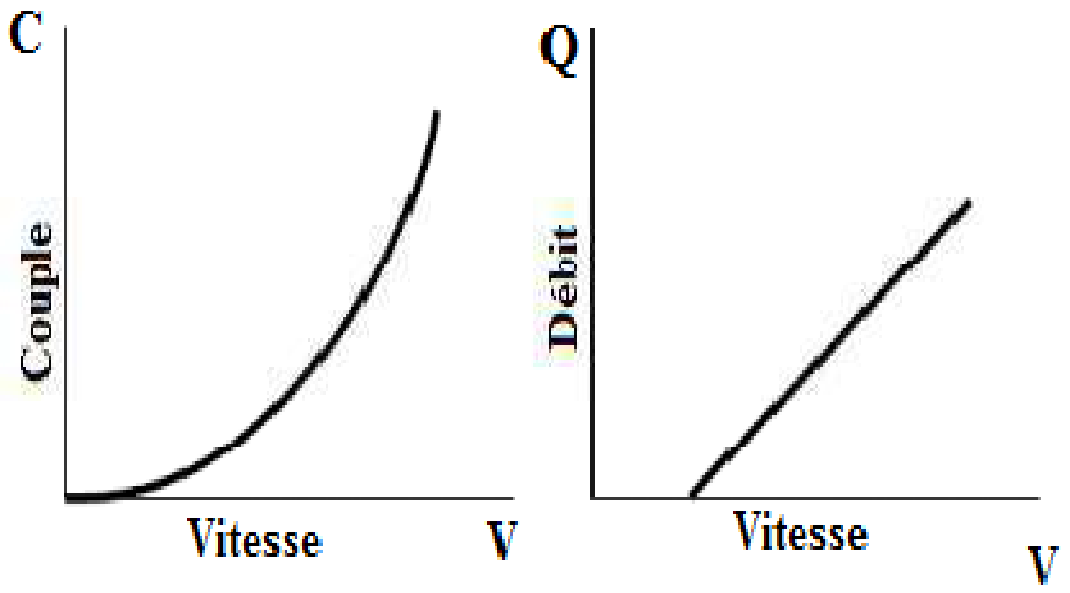


Figure I-10: Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge

I.15.1.1 Composition d'une pompe centrifuge:

Une pompe centrifuge est constituée de:

a) Une roue à aubes tournante autour de son axe, appelée impulseur

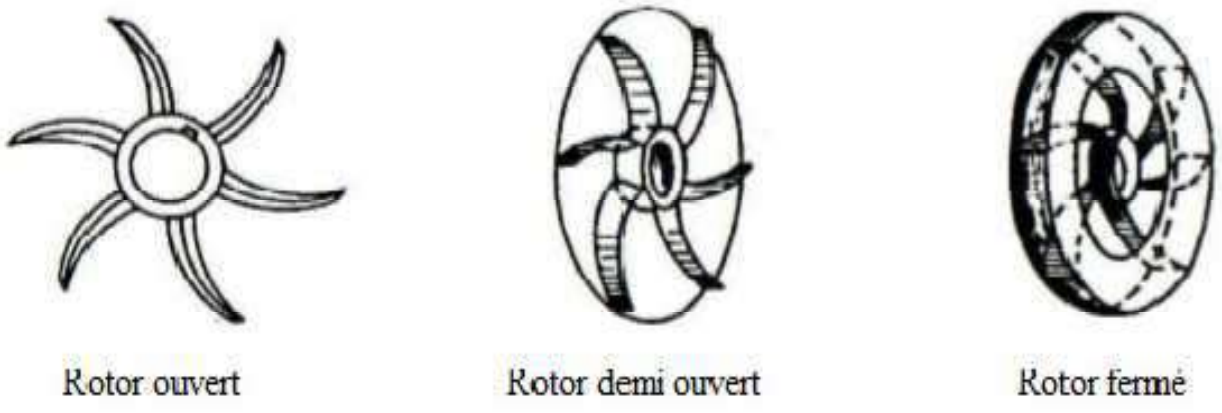


Figure I-11:.Différents types de rotor

b) Un distributeur dans l'axe de la roue. Il sert à distribuer l'eau avec une vitesse et une direction convenables dans l'axe de la pompe appelé « ouïe » ou « oeillard » précédé, à l'amont, par la canalisation d'aspiration ;

c) Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

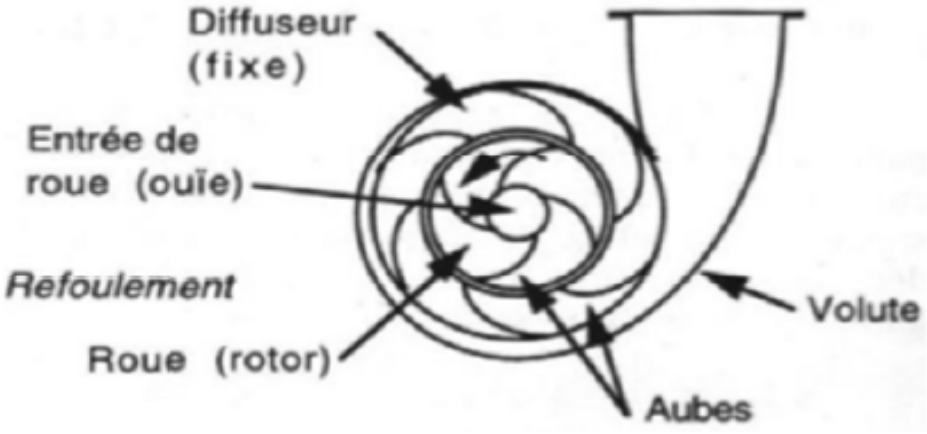


Figure I-12: Composition d'une pompe centrifuge

I.15.2 Les pompes volumétriques:

Les pompes volumétriques sont de deux sorites, alternatives (pompe à piston, pompe à membrane...) et rotative (pompes à vis ... etc.). Dans ces pompes le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Elles sont destiné au faible débit (inferieur a 5m3/h), aux grandes profondeurs. Elles ont un bon rendement et un couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominale **[Thi10]**



.

Figure I-13: Pompe volumétrique.

I.16 Génératrices synchrones

L'avantage du générateur synchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique de la génératrice synchrone peut être obtenu par

des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boite de vitesses **[Mch12]**.

Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable.

I.16.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents:

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif

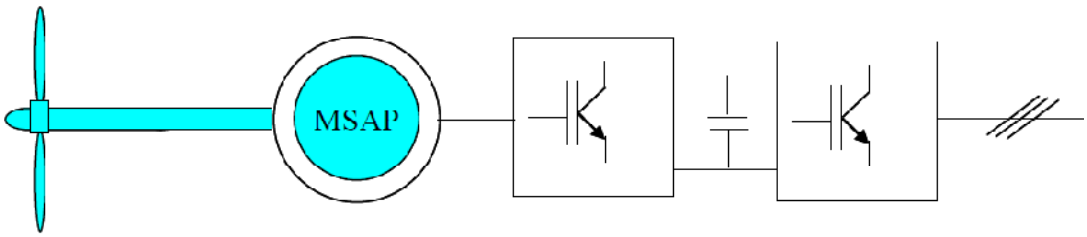


Figure-14: Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

I.17 Convertisseurs utilisées

I.17.1 Structure avec redresseur à diodes (AC/DC):

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances **[Rob07].** Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure I.15 Dans ce cas, il n'y a Aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception Système dédiée

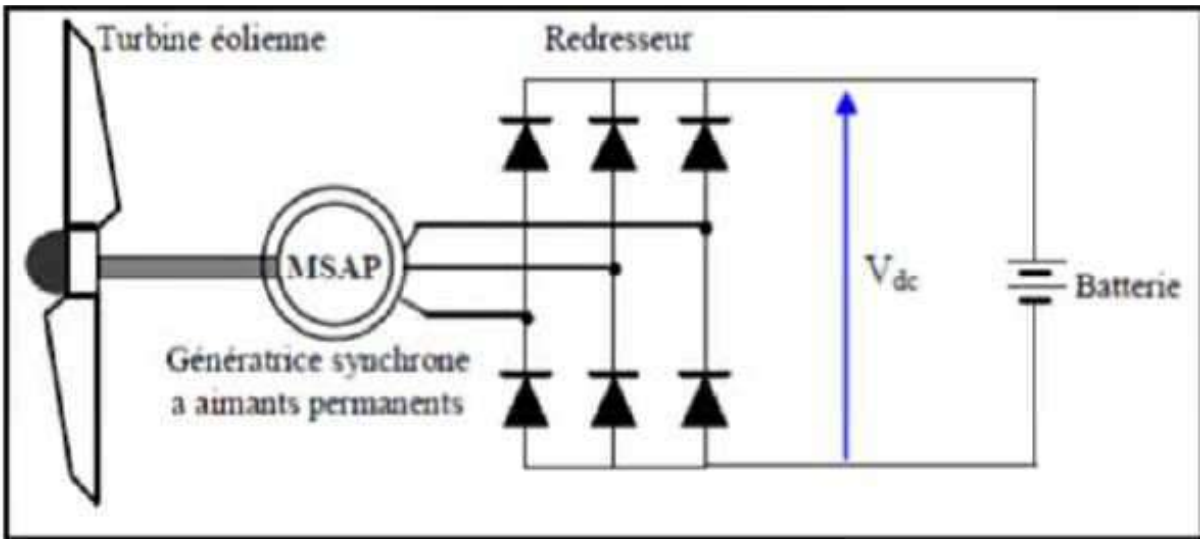


Figure I-15: Machine synchrone avec redresseur à diode

I.17.2 Le convertisseur continu/alternatif (onduleur) :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur de type continu/alternatif **[AfZ17].**

❖ **Onduleur autonome :** délivre une tension avec une fréquence soit fixe, ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner.

❖ **Onduleur non autonome :** c'est un montage redresseur tout thyristor en commutation naturelle et assisté par le réseau auquel il est raccordé.

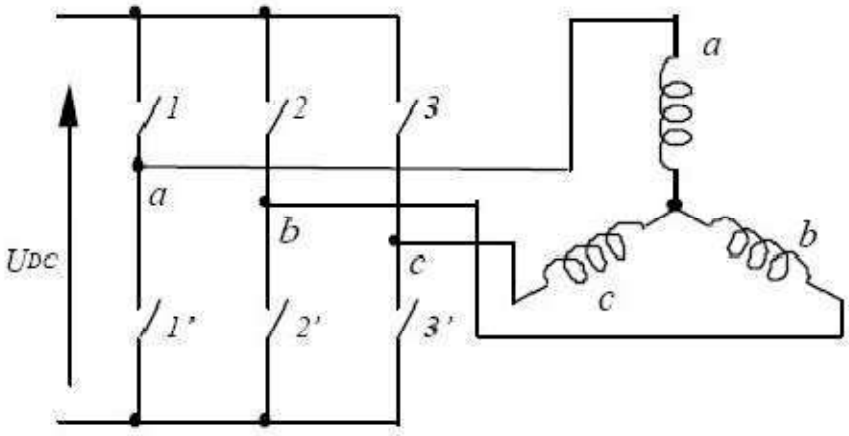


Figure I-16: Schéma d'un onduleur **[Int2]**

I.17.3 Structure avec redresseur/onduleur à IGBT commandés par MLI:

Cette cinquième solution est la plus intéressante, elle consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI

triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur. Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau ou le site isolé (charge variable) peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau/site, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du site isolé **[JMa90].** Dans ce mémoire, notre choix est basé sur cette dernière configuration, ceci permet de piloter directement en couple ou en vitesse les machines utilisé.

I.17.4 Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur:

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe de la (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes **[Cou08].** Comme illustré la figure. I.17

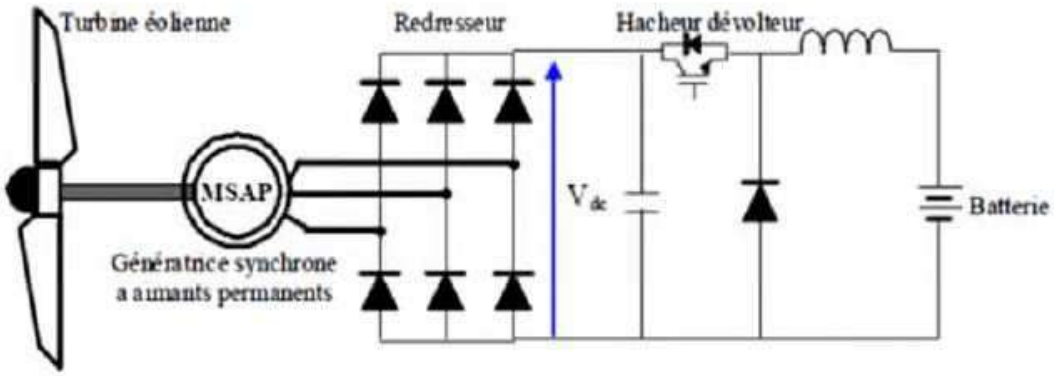


Figure I-17: Machine synchrone avec redresseur à diodes et à hacheur dévolteur

I.18 Machines électriques utilisées dans les aérogénérateurs

En général les machines les plus utilisées sont :

I.18.1 Eolienne à machine asynchrone à cage(MAS):

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

magnétisation au stator. Ces générateurs asynchrones utilisés dans le domaine éolien de moins de 20kw **[Gue19].**

I.18.2 Eolienne à machine synchrone à aimants permanents (MSAP):

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transformation de puissance (transmission directe) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entrainement de la machine. La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. De part son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit, notamment le système bagues balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible. Les éoliennes à base de MSAP présentent un bon rendement, un facteur de puissance élevé et un taux de défaillance minime par rapport aux autre machines, elles ne nécessitent presque aucun entretien puisque il n'y a que des hélices qui sont en mouvement**[MIR05].**c'est pour cela on a choisi dans notre étude la MSAP.

I.18.3 Machines à courant continu:

Ce type présente une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais ces machines sont chères et moins robuste à cause de système balais collecteur et ont un grand poids **[ZAd14].**

I.19 Structure du système de pompage éolien à étudier

Avant de conclure ce chapitre, nous illustrons dans la figure I.18 les différents constituants de notre système de pompage éolien. Ce dernier se compose d'une éolienne a axe horizontale, d'un générateur synchrone a aimant permanent à terre rare, qui permet d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, ainsi qu'un système de commande (via un redresseur et un onduleur), qui est connecté à un groupe motopompe qui se compose d'une machine asynchrone vu sa robustesse, son entretien minimale, et sont faible cout. Et finalement on a opté pour une pompe centrifuge car elle est simple, à un cout réduit, et couvre une large gamme d'utilisation.

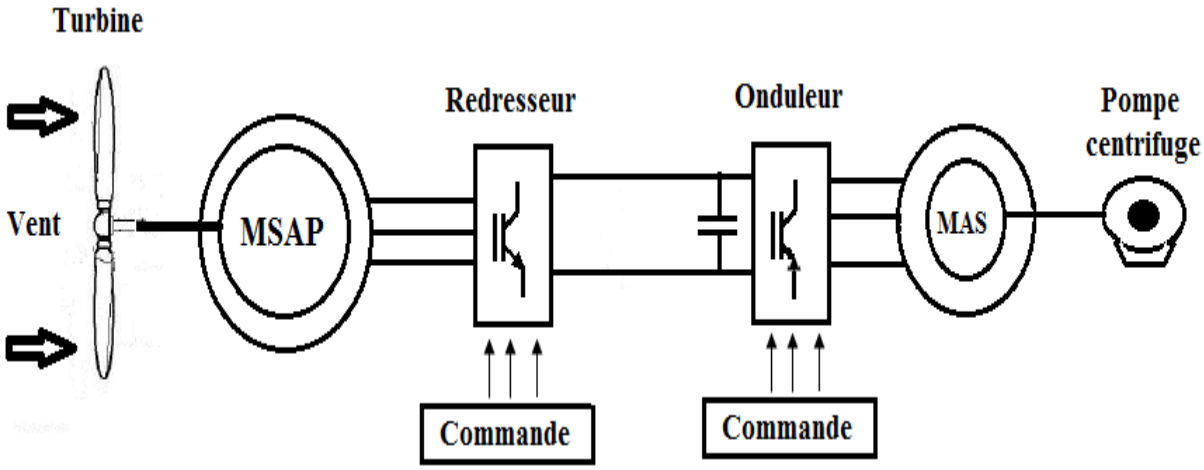


Figure I-18: Structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne

I.20 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les énergies éoliennes dans le monde et d'une façon particulière en Algérie. Ainsi, nous avons consacré l'étude sur l'énergie éolienne, avantages et inconvénient de cette forme d'énergie, le principe de fonctionnement, les composants principaux, et la description d'un système de pompage, ainsi que le pompage éolien, les différents systèmes de pompages, et une structure des systèmes de pompage éolien.

. Pour le prochain chapitre, nous allons le consacré à l'étude et la modélisation des éléments de la chaine de conversion.

II.1 Introduction

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaitre alors les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, nous ferons la modélisation de la chaine de production d'énergie éolienne, la machine synchrone à aimants permanents, convertisseurs statiques, et la pompe centrifuge, ainsi que de MAS**.**

II.2 Modélisation de la turbine éolienne

II.2.1 Modèle du vent:

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, à une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante.

Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent, car la puissance éolienne dans les conditions optimales, et en fonction de la vitesse du vent au cube. La vitesse du vent est tridimensionnelle **[AfZ17].**

La vitesse du vent (V_v) peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$V_v = f(t) \qquad \text{(II.1)}$$

II.2.2 Modèle de la turbine éolienne:

Une turbine éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débuter**.**

On choisit un modèle reflétant le comportement dynamique global de la turbine, on utilisera une courbe du coefficient de puissance en fonction du rapport de la vitesse en bout des pales (Cp(**λ**)) **[Zha97].**

Pour simuler la turbine, on utilisera la relation du couple (II.2) associée à la caractéristique Cp(**λ**). Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante **[Rob01] :**

$$Tt = \frac{1}{2}.CP.\rho.S.\frac{Vv3}{\Omega t} \qquad \text{(II.2)}$$

L'expression de la puissance récupérée par la turbine éolienne est donnée par :

$$Pt = \frac{1}{2}.Cp.\rho.S.Vv^3 \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

C_P: Est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine ;

ρ : Est la densité de l'air, **ρ** = 1.225 kg/m3 ;

S : Est la surface d'aire balayée par la turbine, S = π.R2

V : Vitesse du vent.

La vitesse de la turbine éolienne est donnée par :

$$\Omega t = \frac{Vv.\lambda}{R} \quad \text{(II.4)}$$

Tel que :

λ : vitesse réduite au bout des pales.

R **:** Rayon de la surface balayée par la turbine

II.2.3 Modélisation de l'arbre de la machine:

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaine dans son ensemble**],** L'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre est donnée par :

$$J\frac{d\Omega t}{dt} + f\,\Omega t = C_t - C_g \quad \text{(II.5)}$$

Avec:

C_t: Couple aérodynamique

f: Coefficient de frottement visqueux total du couplage mécanique

J:Inertie totale du système ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine et de la génératrice

C_g : Couple électromagnétique développé par la génératrice

II.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation est une méthode mathématique utilisée pour réduire la machine électrique en un simple système d'équations différentielles. L'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et de la simulation de leurs différents régimes de fonctionnement. L'établissement des équations du modèle repose sur les hypothèses habituelles suivantes **[Zeg08]**:

- La répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale.
- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- L'effet d'amortissement au rotor est négligé.

- Les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées.
- Les phénomènes d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les couplages capacitifs entre les enroulements sont négligés.

II.3.1 Avantages de l'utilisation des MSAP:

Les machines synchrones à aimants permanents sont de plus en plus utilisées dans diverses

applications pour les raisons suivantes :

- Bon rendement.
- Fort couple massique.
- Fort couple volumique.
- Peu de pertes au rotor.
- Pas de système balais collecteur.
- Bon facteur de puissance.
- Pas ou peu d'entretien.
- Simplicité de fabrication

II.3.2 Composition de la MSAP:

La machine synchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor tourne autour de l'axe de symétrie de la machine Figure.II.1 Dans les encoches régulièrement réparties sur la surface interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à ρ paires de pôles; leurs axes sont distants entres eux d'un angle électrique égale à $\frac{2}{3\rho}$

[Meb15].

La structure du rotor est réalisée par un enroulement monophasé excité en courant continu, ou par un aimant permanent. La roue est conçue soit à pôles lisses ou à pôles saillants. Il sera admis que pour cette dernière structure, la machine pourrait être munie d'enroulements amortisseurs qui ont pour rôle:

- Permettent à la machine de s'opposer à des régimes de déséquilibres.
- Augmenter le couple électromagnétique.

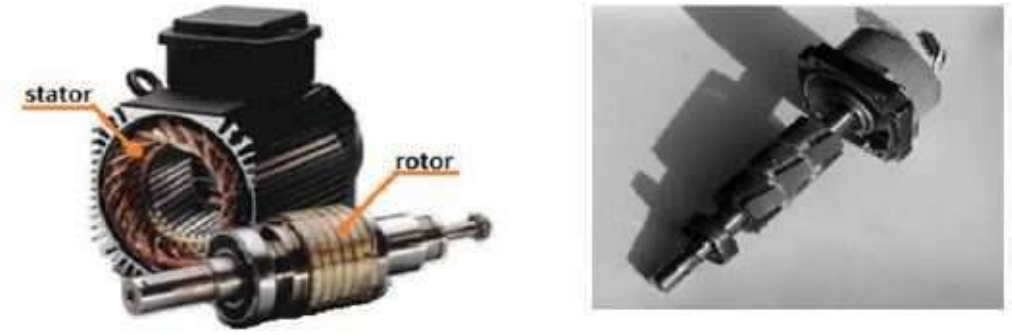


Figure II-1: La constitution de la MSAP

II.3.1 Mise en équations du modèle de MSAP:

La représentation schématique de la machine synchrone à aimants permanents dans l'espace électrique est donnée sur la figure (2.2)

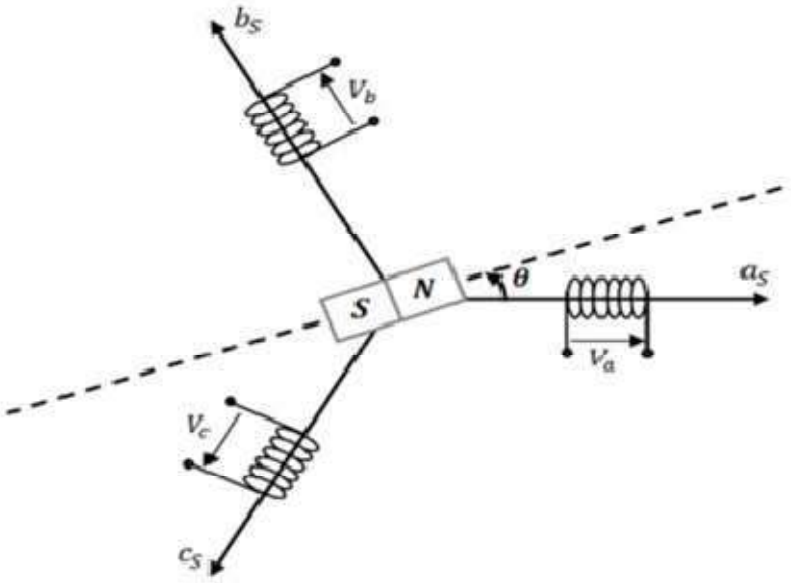


Figure II-2: présentation d'une MSAP dans le repère (abc)

II.3.1.1 Equation mécanique:

$$J\frac{d\Omega g}{dt} + f\,\Omega g = C_g - C_r \qquad \text{(II.6)}$$

Avec: C_r: Couple résistant.

II.3.1.2 Equations électriques:

Les tensions des trois phases sont données par

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \dfrac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = R_s i_a + \dfrac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = R_s i_c + \dfrac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.7)}$$

Avec:

v_a, v_b, v_c **:** Tensions des phases statoriques

$R_a; R_b; R_c$ **:** Résistance statorique

$i_a; i_b; i_c$ **:** Courants de phases statoriques

φ_a; φ_b ;φ_c: Flux totaux traversant les bobinages statoriques

Ce système d'équations peut se mettre sous une forme matricielle suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_S \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ ic \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

Avec $[v_a \quad v_b \quad v_c]^t$ **:** Vecteur tension statoriques;

$[i_a \quad i_b \quad i_c]^t$ **:** Vecteur courants statoriques

$[\varphi_a \quad \varphi_b \quad \varphi_c]^t$ **:** Vecteur flux statoriques

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$ avec [R] : Matrice des résistances statoriques

II.3.1.3 Equations magnétiques:

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [\varphi_{sf}] \quad \text{(II.9)}$$

La matrice $[L_S]$ est une matrice d'ordre 3, elle contient des termes constants et variables, on met les termes constants dans la matrice $[L_{S0}]$ et les termes variable dans la matrice $[L_{S1}(\theta)]$ et on aura:

$$[L_S] = [L_{S0}] + [L_{S1}(\theta)] \text{ et } [\varphi sf] = [\varphi_{fa}\ ; \varphi_{fb}\ ; \varphi_{fc}]^t \quad \text{(II.10)}$$

Avec:

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{S0} & M_{S0} & M_{S0} \\ M_{S0} & L_{S0} & M_{S0} \\ M_{S0} & M_{S0} & L_{S0} \end{bmatrix} \quad \text{(II.11)}$$

et:

$$[L_{S1}(\theta)] = L_{S1}\begin{bmatrix} \cos(2p\theta) & \cos\left(2p\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta-\frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2p\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2p\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2p\pi) \\ \cos\left(2p\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2p\pi) & \cos\left(2p-\frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

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

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

θ: Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator .[φ_{sf}] Vecteur du flux créer par les aimants permanents à travers les enroulements statoriques.

II.4 Transformation de Park

La résolution du système d'équations matricielles s'avère trop complexe, afin de réduire sa complexité on fait appel à des transformations, pour le passage d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (d, q, o) on fait la transformation de Park. Dans notre étude, on a utilisé la transformation de Park modifiée

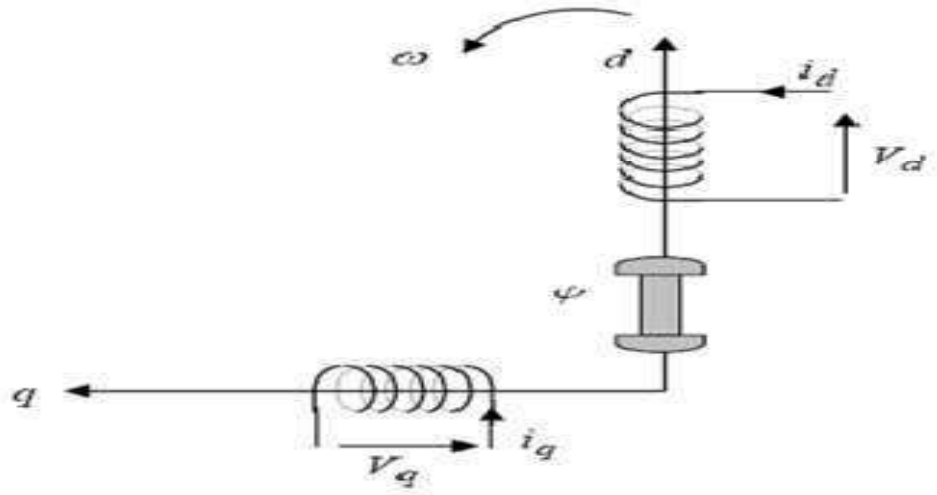


Figure II-3: Représentation de MSAP dans le repère (d, q)

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tournent avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tension, courants ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante**[Thi10].**

$$[v_{dq0}]=[p(\theta)][v_{abc}] \quad \text{(II.12)}$$

$$[v_{abc}]=[p(\theta)]^{-1}[v_{dq0}] \quad \text{(II.13)}$$

Avec:

$[p(\theta)]$ et $[p(\theta)]^{-1}$:Matrices de passage direct et inverse de Park qui conserve la puissance et assure le changement de variable. Elles sont données par les matrices suivantes :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$p^{-1}(\theta) = p^{t}(\theta)$ (θ) c'est une matrice orthonormée

II.4.1 Equations électriques:

Les équations de la MSAP dans le repère de Park sont :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - p\Omega_{mec}\varphi_d \\ v_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} - p\Omega_{mec}\varphi_q \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

II.4.2 Equations magnétiques:

Sur l'axe d, on a : $\varphi_d = L_d i_d + \varphi_{sf}$ (II.15)

Où : φ_d : Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor.

Sur l'axe q, on a : $\varphi_q = L_q i_q$ (II.16)

Le système (II.13) devient :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega_{mec}\varphi_d \\ v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_{sd} p\Omega_{mec} - p\Omega_{mec}\varphi_{sf} \end{cases} \quad \text{(II.17)}$$

Le dernier système obtenu décrit le schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park comme il est illustré dans la figure II.3

II.4.3 Couple électromagnétique:

Le couple électromécanique C_{em} produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les f_{em} dans l'entrefer généré par les courants statoriques **[Bet97]**.

Selon Park l'expression de la puissance produite ou consommée est la suivante :

$$p_a(t) = v_d i_d + v_q i_q \tag{II.18}$$

En remplaçant v_d et v_q par leurs expressions on aura:

$$p_a(t) = R_s\left(i_d^2 + i_q^2\right) + \left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_a}{dt}\right) + \frac{d\varphi}{dt}\left(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d\right) \tag{II.19}$$

Avec:

* $R_s\,(i_d^2 + i_q^2)$: Représente la puissance dissipé en perte Joule dans les enroulements du stator ;

* $\left(i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt}\right)$: Montre la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements de stator ;

* $\frac{d\theta}{dt}\left(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d\right)$: Indique la puissance électromagnétique.

Sachant que ;

$$\omega = p\Omega_{mec} \tag{II.20}$$

Avec : ω pulsations électrique; $p\Omega_{mec}$: vitesse de rotation de la machine (rotor) :

$$c_g = p\left[\varphi_d i_q - \varphi_q i_d\right] \tag{II.21}$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire:

$$c_{em} = [\ (L_q - L_d) i_d i_q + i_q\ \varphi_{sf}\ ]$$

Dans la suit de notre travail, on choisit le rotor à pôles lisses ($L_q = L_d$) et l'équation (II.21) devient :

$$C_g = p i_a \varphi_{sf} \tag{II.22}$$

II.5 Modélisation de bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, étant la partie continue entre le redresseur et l'onduleur permettant le découplage de la fréquence de la source et celle de la charge (figure II.4) :

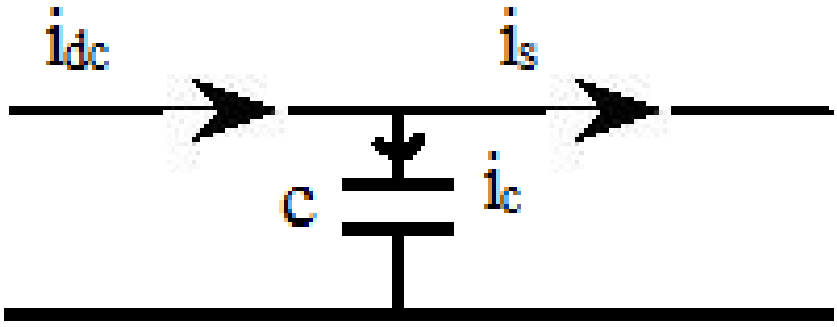


Figure II-4: Schéma simple du circuit du bus continu

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

$$v_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} i_c dt$$

i_c : Courant circulant dans la capacité ;

v_{dc} : Tension du bus continu ;

C_{dc} : Capacité du bus continu.

II.6 Modélisation du redresseur

Parmi tous les convertisseurs AC-DC, la solution de référence est le redresseur triphasé à modulation de largeur des impulsions. Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance

Instantanée, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique ou la vitesse de rotation de la génératrice.

Les inconvénients de cette structure reposent sur la complexité du montage qui comporte trois bras complets donc six interrupteurs et la commande nécessitant généralement un capteur mécanique de position. Nous allons développer cette structure car elle est la plus courante dans les applications éoliennes et donne une indication sur l'efficacité énergétique relative aux autres montages **[AsL19]**.

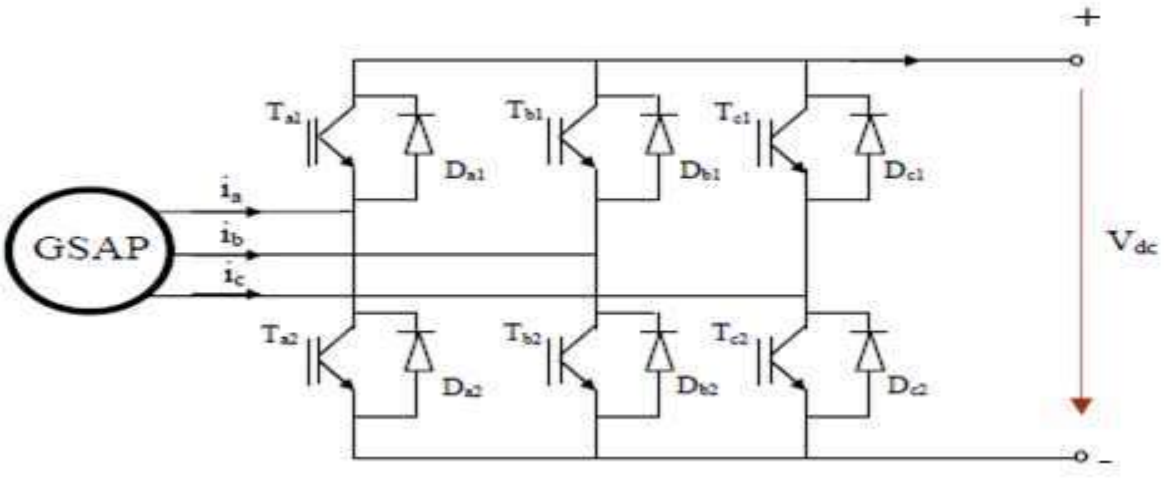


Figure II-5: Schéma d'un redresseur

II.7 Modélisation de l'onduleur

L onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie électrique d'une source de tension continue en une énergie électrique de type alternative, l'utilisation des onduleurs est très vaste dans l'industrie, tels que les variateurs de vitesse pour les moteurs triphasés, les alimentations de secours……etc.

II.7.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur de tension triphasée:

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par une éolienne, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente impédance interne négligeable.

L'onduleur considérés dans notre étude est de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et des diodes montées en antiparallèle commandés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) comme la montre la figure (II.6) :

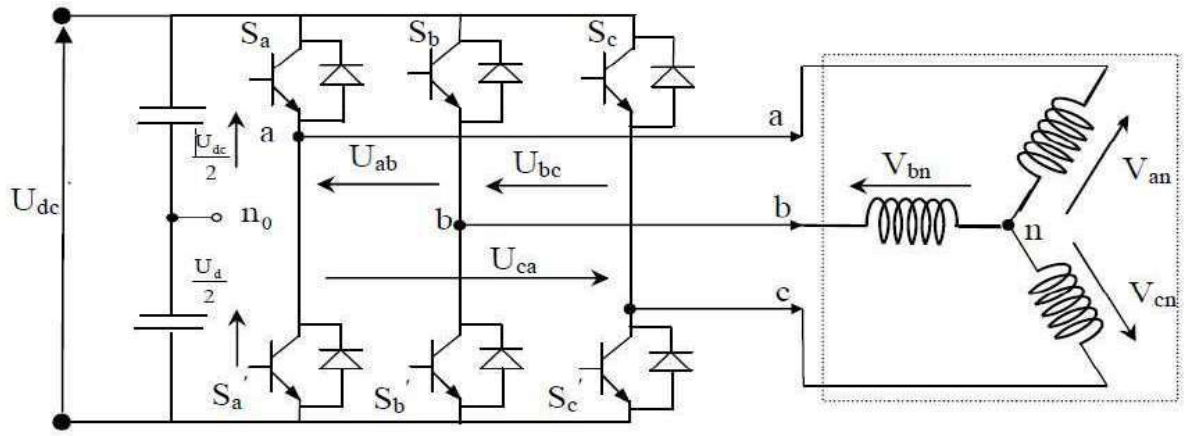


Figure II-6: Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux

L'état des interrupteurs, supposées parfaites preuves être défini par trois grandeurs booléiennes de commande S_i (i = abc)

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i = 1$
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i = 0$

Les tensions composées des trois phases sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif "o" figure (2.6)

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bc} = v_{bo} - v_{co} \\ v_{ca} = v_{co} - v_{ao} \end{cases} \quad \text{(II.23)}$$

Soit "n" le point neutre du coté alternatif (MSAP), alors on a:

$$\begin{cases} v_{ao} = v_{an} + v_{no} \\ v_{bo} = v_{bn} + v_{no} \\ v_{co} = v_{cn} + v_{nO} \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

La charge est considérée équilibrer, il len résulte:

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad \text{(II.25)}$$

La substitution de (II.24) dans (II.25) nous donnons:

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad \text{(II.26)}$$

En remplaçant L'équation (II.26) dans l'équation (II.24) on aura :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{bo} - v_{co}) \\ v_{bn} = -\frac{1}{3}(2v_{bo} - v_{ao} - v_{co}) \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}(2v_{co} - v_{ao} - v_{bo}) \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

A partir des équations (II.26) et (II.27), on tire la matrice qui assure le passage du continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad \text{(II.28)}$$

II.8Modulation de largeurs d'impulsions MLI

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions les plus sinusoïdales possibles. Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI en français et PWM pour Pulse Width Modulation en anglais) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une
tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.
Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est eff ectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les rapports cycliques.
Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples ; cependant, quatre catégories de MLI ont été développées **[Gcl00]**:

* Les modulations sinus-triangle eff ectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général, triangulaire.

* Les modulations pré calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculées hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre.

* Les modulations post calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

* Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des

impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité représentant la loi de commande.

II.9 Principe de la commande par MLI sinus-triangle

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance).

Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

– Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

– Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs

statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

II.9.1 Caractéristiques de MLI:

La technique de MLI se caractérise par deux paramètres:

*** Le coefficient de réglage :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion $M_r = \frac{V_m}{V_p}$

***L'indice de modulation :** Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante $M_I = \frac{f_p}{f_m}$

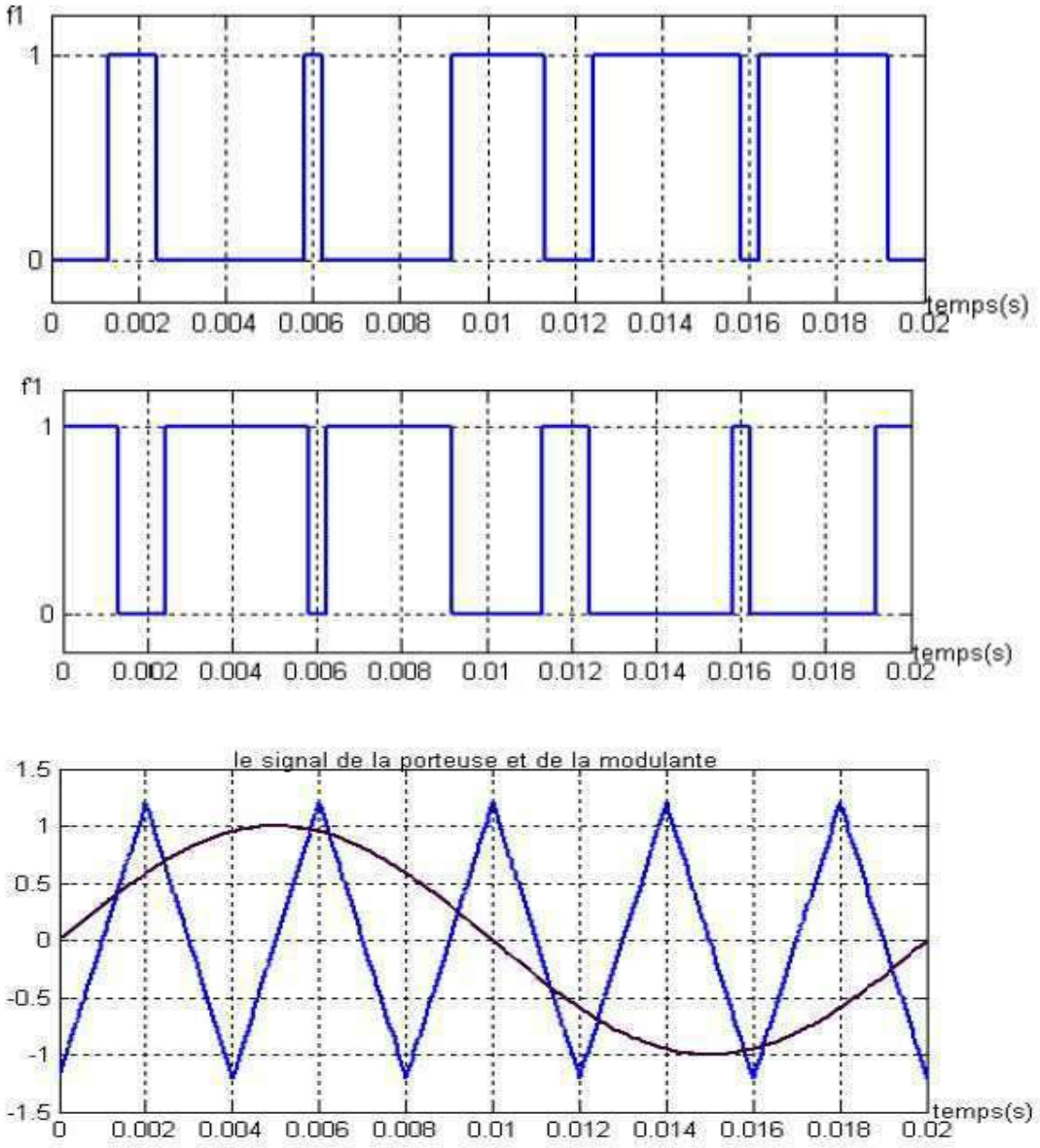


Figure II-7: Principe de la commande MLI sinus-triangle

II.10 Modélisation de la machine asynchrone

II.10.1 Hypothèse simplificatrices :

La machine asynchrone, avec la répartition de ses euroulements et la géométrie propre est très complexe, pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et comme nous l'avons déjà soulevé, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplifications : **[Befa06]**

- Entrefer constant.
- Les courants homopolaires ne peuvent circuler (pas de neutre utilisé)
- La répartition spatiale de l'induction magnétique est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.

- Pertes ferromagnétiques negligees.

II.10.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphasé abc :

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure II-8 et dont les phases sont repérées respectivement par SA, SB, SC. L'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases SA et Ra choisis comme axes de référence [Gued18]

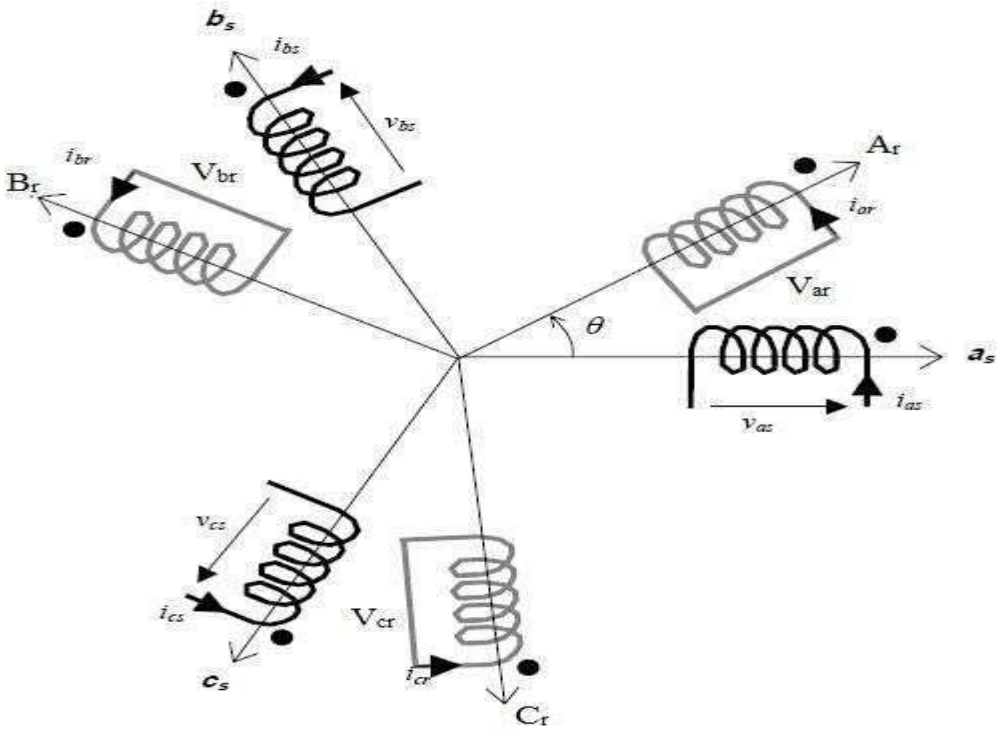


Figure II-8: Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée

➢ **Equations électriques**

Soit une machine asynchrone triphasé au stator et au rotor représentée schématiquement par la fig. (II-8) et dont les phases sont repérées respectivement A,B,C et a,b,c, l'angle électriqueα variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases « A » et « a » choisit comme axes de référence. Les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent, en tenant compte des hypothèses simplificatrices cité précédemment :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \\ v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.29)}$$

R_s, R_r désignent les résistances par phase du stator et du rotor. Ou de manière plus raccourcie :

$$[v_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \frac{d[\varphi_{sabc}]}{dt}$$

(II.30)

$$[v_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d[\varphi_{rabc}]}{dt}$$

(II.31)

Avec :

$[V_{srabc}]$ les vecteurs des tensions statorique et rotorique:

$[I_{srabc}]$ les vecteurs des courants statorique et rotorique:

$[\varphi_{srabc}]$ les vecteurs des flux statorique et rotorique:

Les équations électromagnétiques de liaison entre le stator et le rotor sont :

$$\begin{cases} \varphi_s = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ \varphi_r = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad \text{(II.32)}$$

Avec:

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \qquad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

[Lss]: matrice d'inductances statoriques [Lrr] : matrice d'inductances rotoriques. L'inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(II.33)}$$

la machine est définit par 5 inductances :

1) l'inductance propre d'une phase statorique l_s,

2) l'inductance propre d'une phase rotorique l_r,

3) l'inductance mutuelle entre phase statorique M_s,

4) l'inductance mutuelle entre phase rotorique M_r,

5) l'inductance mutuelle entre phase rotorique et phase rotorique $[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$

L_m : maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor. En remplaçant (II.33) dans (II.31) et (II.32) on obtient :

$$[v_{abc}]s = [R_s][i_{abc}]s + \frac{d}{dt}([L_s][i_{abc}]s + [M_{sr}][i_{abc}]s) \quad (II.34)$$

$$[v_{abc}]r = [R_r][i_{abc}]r + \frac{d}{dt}([L_r][i_{abc}]r + [M_{rs}][i_{abc}]r) \quad (II.35)$$

Du fait des termes trigonométriques contenus dans la matrice des inductances mutuelles (M_{sr}) selon (II.33), les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables, pour cette raison on fait appel à des transformations mathématique, parmi elles la transformation de PARK.

➢**Equation mécanique:**

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire des variations non seulement des paramètres électrique (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) :

$$\frac{d\Omega r}{dt} = \frac{1}{J}(c_{em} - C_r - f_m \Omega_r) \quad (II.36)$$

J: Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine ;

f : Coefficient du frottement visqueux ;

c_{em} : Couple électromagnétique ;

C_r : Couple de charge ;

Ω_r : Vitesse rotorique du moteur.

II.11Application de la transformation de Park à la machine asynchrone

La transformation de Park a pour but de découpler magnétiquement le stator et le rotor et cela en substituant les enroulements de phase a, b, et c dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobiles par rapport au stator par deux enroulements en quadrature d'axes d et q. Pour des raisons de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

► Les composantes homopolaires sont nulles ;

► Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés ;

► La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale.

En appliquant cette transformation, on obtient la représentation suivante :

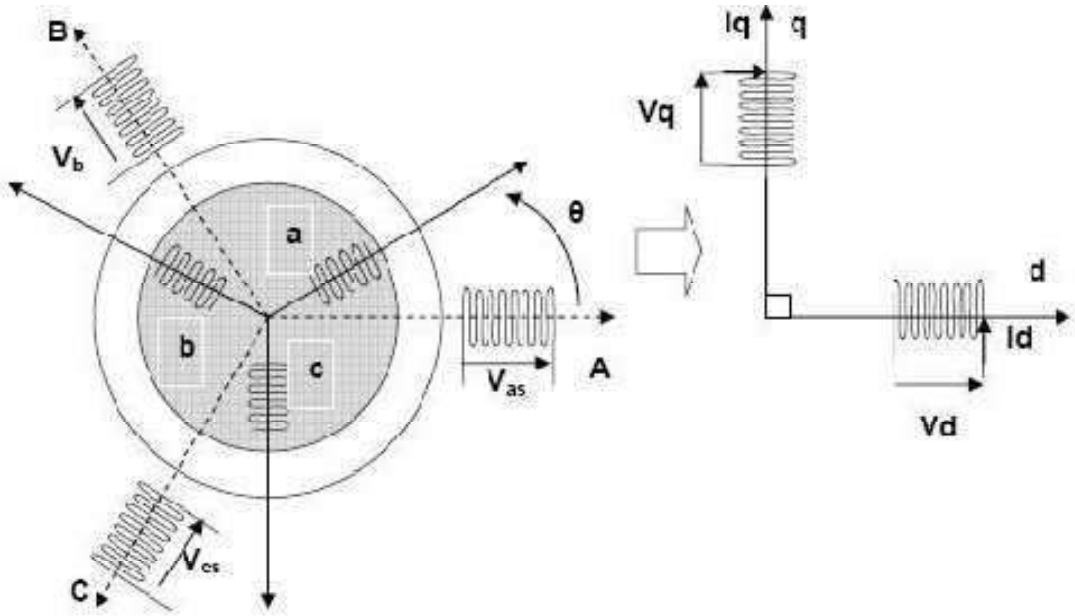


Figure II-9: Modèle de Park d'un moteur asynchrone

A- Equations électriques

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s.\Phi_{sq} + \frac{d[\Phi sd]}{dt} & \text{(II.37)} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s.\Phi_{sd} + \frac{d[\Phi sq]}{dt} & \text{(II.38)} \end{cases}$$

De même, en appliquant aux équations rotorique avec un angle de Θ_r, on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} + \frac{d[\Phi rd]}{dt} & \text{(II.39)} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} + \frac{d[\Phi rq]}{dt} & \text{(II.40)} \end{cases}$$

Avec :

v_{sd} , v_{sq} **:** Tension statoriques direct et quadratique **;**

i_{sd} , i_{sq} **:** Courant statoriques direct et quadratique **;**

Φ_{sd} , Φ_{sq} **:** Flux statoriques direct et quadratique **;**

i_{rd} , i_{rq} : Courant rotoriques direct et quadratique ;

Φ_{rd} , Φ_{rq} : Flux rotoriques direct et quadratique ;

ω_s- ω_r : vitesse statorique et rotorique.

Tel que : $\omega = p.\Omega = \omega_s - \omega_r$: Vitesse mécanique.

En supposant le système parfaitement équilibré, les composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

B- Equations magnétiques :

Les flux statorique et rotorique s'expriment dans le repère de Park, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & 0 & M & 0 \\ 0 & L_S & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad \text{(II.41)}$$

Avec :

$L_s = i_s + M$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r = i_r + M$: Inductance cyclique rotorique ;

l_s, l_r : Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique ;

M : Mutuelle inductance.

C. Equations mécanique :

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\,\Omega \quad \text{(II.42)}$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statorique et courants rotorique est comme suite :

$$C_{em} = \frac{pM}{L_r}\left(\Phi_{rd}\, i_{sq} - \Phi_{rq}\, i_{sd} \right) \quad \text{(II.43)}$$

III.12Modélisation de système de pompage avec l'éolien

Les turbines de petites et moyennes puissances dans trois domaines :

- ✓ Micro-éoliennes: une plage de puissance nominale de 20 à 500 W.
- ✓ Mini éoliennes: une plage de puissance nominale de 500 W à 1 kW.
- ✓ Wind Petit vent: de 1 kW à 100 kW.

Dans notre étude, le système de pompage de l'eau utilisait une éolienne à base de PMSGqui alimentait le moteur à courant continu afin de générer le couple nécessaire pour la centrifugeuse hydraulique **[Gue19]**.

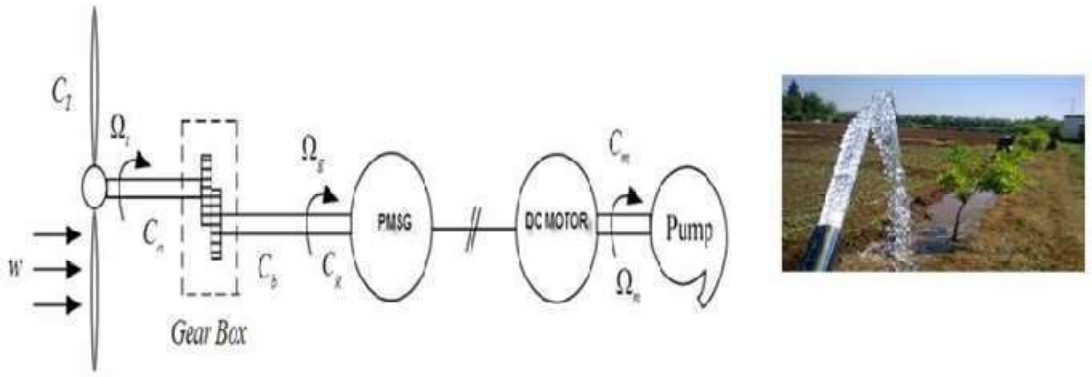


Figure II-10: Structeur de système de pompage avec l'éolien

II.12.1 Model d'un motor DC:

Dans ce travail, la machine à courant continu est exploité en mode moteur avec différentes relations utilisées dans leurs modèles.

Appliquées à la phase machine, les lois d'Ohm décrivant l'enroulement d'induit et l'enroulement de champ sont respectivement données par les relations ci-dessous:

$$V_{ma} = \begin{cases} K.W + Ri_a + \dfrac{Ldi_a}{dt} \\ V_{mf} = Ri_f + \dfrac{Ldi_f}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.44)}$$

Le couple électromagnétique est donné par:

$$C_{em} = Ki_a$$

Après la boîte de vitesses, le système mécanique peut être décrit comme une relation suivante, où Tt et Ta représentent respectivement le couple de vent d'entrée et le couple avant la boîte de vitesses.

II.12.2 Modélisation de la pompe centrifuge:

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est exprimée par l'équation suivante:

$P_{hyd} = \rho.g.H.Q$ (II.45)

Avec :

P_{hyd} : puissance hydraulique (W) ;

ρ: Masse volumique d'eau (1000kg/m^3) ;

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s^2) ;

H : Hauteur manométrique (m) ;

Q : Débit volumique (m^3/s) ;

La puissance mécanique est donnée par l'equation suivante :

$$P_{méc} = P_{hyd} .\eta pm \quad (II.46)$$

Avec :

$P_{méc}$: Puissance mécanique (w) ;

η_{pm} : Rendement de la pompe ;

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$\begin{cases} C_r = K_r . \Omega^2 \\ K_r = \frac{Pn}{\Omega n^3} \end{cases} \quad (II.47)$$

Avec : P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (w) ;

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation de la chaine de pompage éolien (éolienne et génératrice synchrone à aimants permanents), convertisseurs statiques (redresseur, onduleur), et un moteur asynchrone. ainsi que le groupe moteur-pompe qui se compose d'une pompe centrifuge etle DC moteur.

Chapitre III: Commande de la chaine étudiée

III.1 Introduction

Ce chapitre se concentrera sur l'analyse des méthodes de contrôle pour le convertisseur côté générateur (commande MPPT, commande de vitesse et couple, commande de GSAP). Cinq techniques MPPT sont analysées et comparées dans ce chapitre, ces techniques sont expérimentées par un test de robustesse pour choisir la méthode la plus robuste. Ensuite, l'approche de FOC (commande vectorielle à flux orienté) est introduite pour contrôler la vitesse de GSAP.

la principe MPPT repose sur la variation de vitesse de la turbine suivant celle du vent en cas de raccordement indirect de la génératrice avec le réseau.

III.2 Généralités sur la commande vectorielle

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancées en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformer de Park, évaluation de fonction trigonométriques, des intégrations, des régulations, … etc. ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique.

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courant et donc du couple, puisque l'on a vu que le contrôle pouvait s'inscrire directement en fonctions des courants.

Une fois que l'on maitrise la régulation du couple, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. Pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif pour la diminuer il faut un couple négatif. Il apparait alors que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit être à son tour imposé par l'application des courants, c'est le rôle des régulateurs de courants.

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu ou le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. On se trouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple, alors viens la commande vectorielle régler ce problème de découplage des réglages du flux à l'intérieur de la machine de celle du couple. Donc nous abordons la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique

III.3 Commande vectorielle

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variable d'entrés, sortie et internes.

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante de courant et le couple électromagnétique par l'autre composante du courant, pour cela il faut choisir un système d'axe (q, d), une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit:

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- Le flux d'entrefer ;

III.4 Type de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrone dans les applications de commande du couple et de la vitesse **[Ham05]**.

On site deux méthode de commande vectorielle :

- Commande vectorielle directe
- Commande vectorielle indirecte

III.4.1 Commande vectorielle directe:

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator, ces capteurs donnent les valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure comme :

- Le problème de filtrage du signale mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le cout de production est élevé. (capteur, conditionneur, filtre…).

Cette commande n'est pas optimale.

III.4.2 Commande vectorielle indirect:

Cause des inconvénients de la commande précédente, la commande vectorielle indirecte est considérée comme la plus pratique. Dans cette commande, les courants rotorique sont estimés a partir de la mesure des puissances active et réactive.

Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation du circuit magnétique et la variation de la température.

III.5 Avantages et Inconvénients de la commande vectorielle

III.5.1 Avantages de la commande vectorielle:

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait

pas de faire le variateur classique)

- Elle est précise et rapide.
- Il y a un contrôle du couple à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

III.5.2 Inconvénients de la Commande vectorielle:

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse, DSP .).
- Présence de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.
- la vitesse de rotation intervient explicitement dans l'algorithme de commande. Quand on ne mesure pas cette vitesse (variateur sans capteur de vitesse), les erreurs sur l'estimée de cette vitesse dégradent les performances du variateur.

III.6 Commande vectorielle GSAP

III.6.1Principe de la commande vectorielle d'une GSAP:

La commande vectorielle des machines à courants alternatifs est maintenant bien connue. Le principe de la commande vectorielle est de rendre le fonctionnement d'une machine à courants alternatifs identique à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier ou le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes d et q. Habituellement, la composante d'axe **d** du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composantes d'axe **q** joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple **[Kek00].**

Le modèle de la MSAP dans le repère de Park donné par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_d \dfrac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega \\ v_q = R_s i_q + L_q \dfrac{di_q}{dt} + L_q i_d \omega + \varphi_f \omega \end{cases} \qquad \text{(III.1)}$$

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \\ \varphi_f = cons\tan t \end{cases}$$

(III.2)

La stratégie souvent utilisée pour les machines synchrones, consiste à maintenir une référence du courant direct Id à zéro. Ce choix est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe **d** et de travailler à couple maximal.

On impose $i_d = 0$ le système d'équation (III.1) devient :

$$\begin{cases} v_d = -p\Omega_{mec} L_q i_q \\ v_q = R_s i_q + L_q \dfrac{di_q}{dt} + \varphi_{sf} p\Omega_{mec} \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

Donc :

Le couple électromagnétique devient :

$$c_g = p_{iq} \varphi_{sf} \quad \text{(III.4)}$$

Comme l'amplitude du flux des aimants permanents est constante, le couple est directement proportionnel à i_q :

$$c_g = k_t i_q \quad \text{(III.5)}$$

Tel que: $k_t = p\varphi_{sf}$

Pour l'équation mécanique on remplace (III.5) dans (II.41) on obtient :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{j}\left(k_t i_q - c_r - f_m \Omega_r\right) \quad \text{(III.6)}$$

III.6.2 Description:

La structure de la commande est constituée de l'association d'une machine synchrone à aimants permanents dans le repère (d, q). La référence du courant direct i_{dref} est fixée à zéro et la sortie du régulateur de la tension du bus continu constitue la consigne du couple. Le couple dépend seulement du courant i_q Alors, on peut contrôler le couple uniquement par la composante i_q Le courant de référence i_{qref} est obtenu par la relation (III.5) dont le couple de référence est issu de la régulation de la tension du bus continu. Les références des courants passent par une transformation biphasé vers triphasé ce qui nous donne les trois courants de référence qui sont

comparés par les courants réels. La sortie de comparateur passe par un régulateur à hystérésis. Les signaux logiques destiné à attaquer les semi-conducteurs du redresseur. La figure (III.1) représente le schéma bloc de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents avec régulation du bus continu.

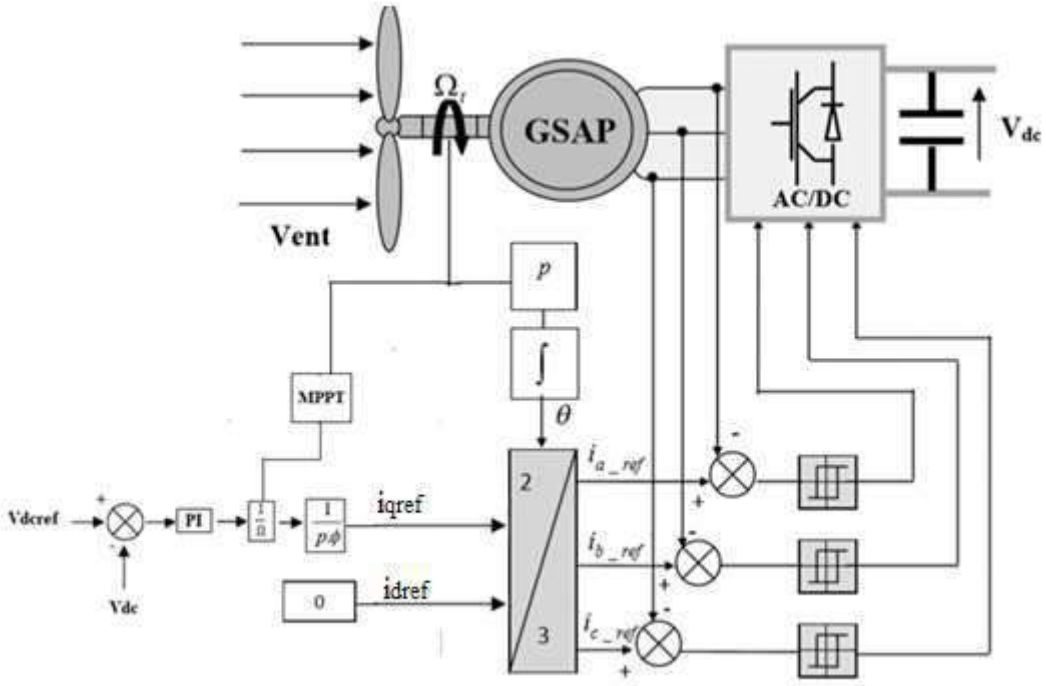


Figure III-1: Schéma bloc de commande du générateur éolien

III.7 la commande MPPT

On peut distinguer entre deux grandes catégories de stratégies MPPT : des stratégies ne nécessitant pas la connaissance de cette courbe caractéristique et des stratégies nécessitant la connaissance préalable de la caractéristique $Cp\ (\lambda)$ de l'éolienne, point de vue rapidité du système facilite de commande et simplicité de mettre en oeuvre **[Ada05]**

III.7.1 Méthode MPPT sans asservissement de vitesse:

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en Connaissant la caractéristique de la voiture éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent **[Krm13].** La courbe spécifique d'une turbine possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par

la vitesse réduite optimale (λ_{opt}) et le coefficient de puissance maximal (c_{opt}) La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation(II.7) est égale à :

$$v_v = \frac{R\Omega_t}{\lambda} \tag{II.7}$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine est donnée par

$$p_t = \frac{1}{2}\rho C_p(\lambda,\beta)SV_V^3 \tag{III.8}$$

En remplaçant (III.7) dans (III.8) on obtient:

$$P_t = \frac{1}{2}C_p(\lambda,\beta)SR^3\frac{\Omega_t^3}{\lambda^3} \tag{III.9}$$

Si on divise cette dernière sur la vitesse de rotation, on aura l'expression du couple :

$$C_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^5 C_P(\lambda,\beta)\Omega_t^2 \tag{III.10}$$

On considère que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (III.10) permet le calcul de la valeur optimale du couple.

$$C_{topt} = K_{opt}\Omega_t^2 \tag{III.11}$$

Avec : $K_{opt} = \frac{1}{2\lambda^3}\rho\pi R^5 C_P(\lambda,\beta)$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple, à l'aide de la vitesse de rotation mesurée, détermine le couple de référence montrée par la figure (III.2).

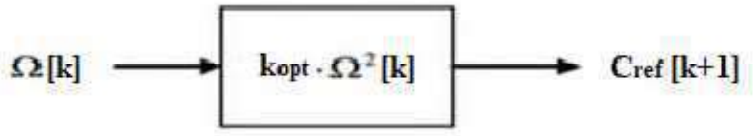


Figure III-2: Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal. La Figure (III.3) donne l'illustration graphique de ce mode de recherche du point maximal de puissance:

- La mesure de la vitesse de rotation Ωengendre le calcul du couple c_{ref} Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromagnétique de la génératrice : $c_t - c_g = j\frac{\Omega_t}{dt} + f\Omega_t$

- Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique

pour atteindre au pas de calcul suivant la vitesse Ω_t où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée ;

- Après quelques itérations, on atteint l'optimum à (c_{opt}, Ω_{opt}) correspondant à la puissance optimale $p_{opt}(\lambda_{opt}, c_{popt})$.

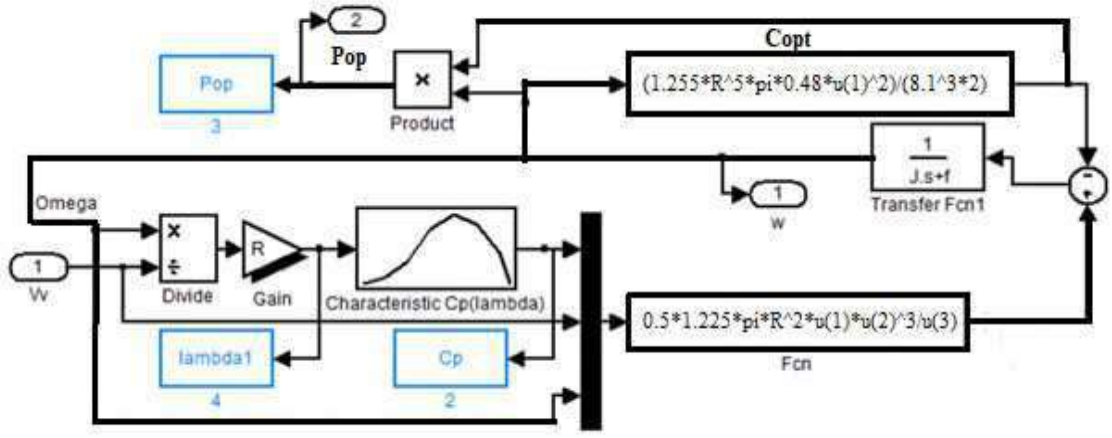


Figure III-3: Diagramme Simulink de la turbine avec MPPT classique

III.8 Principe du Contrôle vectorielle à flux orienté

L'objectif de ce type de contrôle est d'obtenir un modèle simple de la machine asynchrone qui rend compte de la commande séparée de la grandeur flux « φ » et de la grandeur courant I, générateur du couple.

Il s'agit donc de retrouver la quadrature entre courant (I) et flux (φ) naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant d'excitation – producteur de flux ; et courant d'induit producteur de couple).

La difficulté va résider justement dans le fait que, pour une machine à induction, il est difficile de distinguer le courant producteur de couple du courant producteur de flux fortement couplés.

La commande par orientation de flux consiste à régler le flux par une composante du courant «Ids » et le couple par l'autre composante «Iqs ». Pour ce la, il faut choisir un système d'axe d, q et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux.

Le principe de la commande vectorielle est représenté par la figure (III.4).

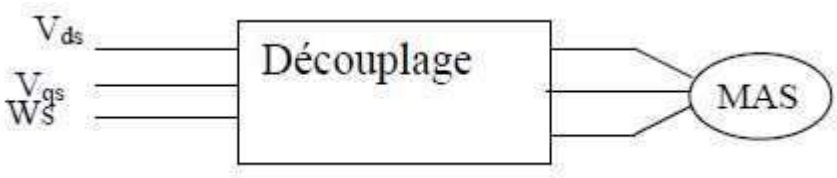


Figure III-4: Schéma de principe de la commande de vectorielle

III.9 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Nous avons vu dans le chapitre précédant que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère (d, q) comme un produit croisé de courant et de flux. Nous prenons l'écriture.

on remarque que si l'on élimine le deuxième produit ($\varphi_{rq}\, i_{sd}$); alors le couple ressemble fort à celui des machines à courant continu, pour cela, il suffit d'orienter le repère (d,q) de manière à annuler la composante de flux en quadrature

c'est-à-dire choisir l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d), donc avoir :

$\varphi_{rq}=0$ et $\varphi_{dr}=\varphi_r$ (III.12)

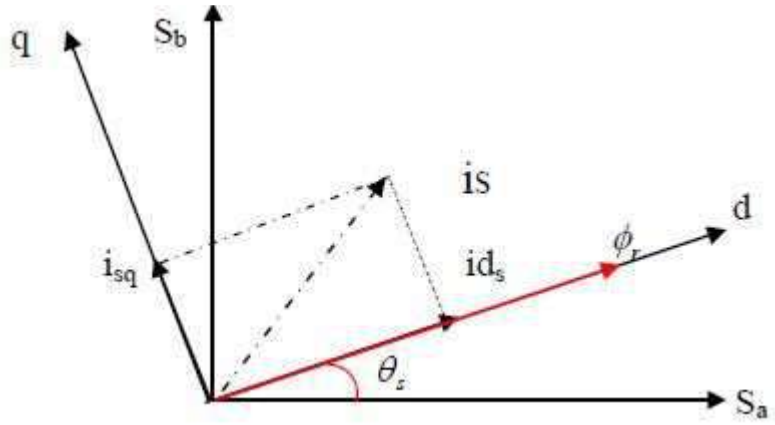


Figure III-5: Principe du contrôle vectoriel dans un référentiel lié au flux rotorique

Le couple s'écrit alors :

$$c_{em} = \frac{p_m}{l_r}\left(\varphi_{rd} i_{sq}\right) \quad \text{(III.13)}$$

La stratégie consistera donc à contrôler de façon indépendante le terme flux et terme courant pour imposer un couple.

En remplaçant φ_{rd} dans (II.45), on obtient :

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \dfrac{d\varphi_r}{dt} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + (w_s - w_r)\varphi_r \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

III.9.1 Estimation de φ_r

Seul les grandeurs statoriques sont facilement accessible pour les grandeurs rotoriques, il faut donc l'estimé à partir des grandeurs statoriques.

on a :

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \dfrac{d\varphi_r}{dt} \\ \varphi_r = l_r i_{rd} + M i_{sd} \end{cases} \quad \text{(III.15)}$$

A partir de (III.15), on peut ecrire :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r i_{rd} \quad \text{(III.16)}$$

$$i_{rd} = \frac{\varphi_r}{l_r} - M\frac{i_{sd}}{l_r} \quad \text{(III.17)}$$

En remplaçant (III.17) dans (III.16), on obtient:

$$T_r \frac{d\varphi_r}{dt} + \varphi_r = M i_{sd}$$

(III.18)

Tel que : $T_r = \dfrac{L_r}{R_r}$: Constante de temps rotorique.

Avec la transformé de Laplace, on aura :

$$\begin{cases} \varphi_r \cdot [1 + pT_r] = M i_{sd} \\ \varphi_r^* = \dfrac{M}{[1 + pT_r]} i_{sdmes} \end{cases} \quad \text{(III.19)}$$

III.9.2 Estimation des angles $\varphi_r et \varphi_s$

$$\begin{aligned} \varphi_{sest} &= \int w_{sest} dt \\ w_{sest} &= w_{est} + w_r \end{aligned} \quad \text{(III.20)}$$

tel que $w_r = p\Omega_r$

Donc on obtient : $w_{sest} = w_{est} + p\Omega_r$ (III.21)

Et d'aprés l'equation (III.14), on peut ecrire :

$$w = -\frac{R_r}{\varphi_r} i_{rq} \qquad \text{tel que : } w_s - w_r = w \tag{III.22}$$

D'après (II.37), on déduit i_{rq}

$$i_{rq} = -\frac{M_{isq}}{L_r} \tag{III.23}$$

on remplace (III.23) dans (III.22) on obient

$$\varphi_{sest} = \int \left(\frac{M}{T_r \varphi_r} i_{sqmes} + p\Omega_r \right) dt \tag{III.24}$$

III.10 Calculs des régulateurs

Pour l'obtention des performances exigées par le système de commande on ajoute à ce dernier des organes extérieurs appelés régulateurs. La qualité de régulation est assurée par ces derniers en fonction des lois de régulations qui relient mathématiquement leurs grandeurs de sortie et d'entrée.

III.10.1 Réglage de la boucle de vitesse :

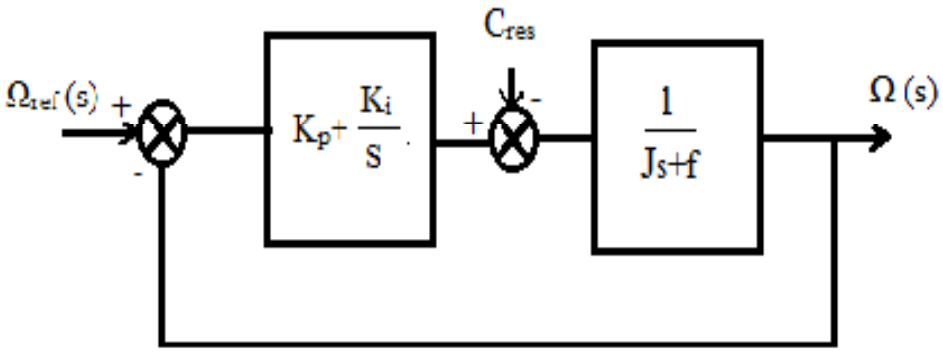


Figure III-6: Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul s'écrit :

$$\frac{w(s)}{w_{ref}(s)} = \frac{k_p \cdot s + k_i}{js^2 + (k_p + F)_s + k_i}$$

(III.25)

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2eme ordre, dont la forme canonique est de la forme suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{w_o^2} S^2 + \frac{2\xi}{w_o} \cdot s + 1} \tag{III.26}$$

Par comparaison et avec un coefficient d'amortissement ξ = 0,7 et une pulsation w_o donnée, on obtient :

$$\begin{cases} k_i = j \cdot w_o^2 \\ k_p = 2 \cdot \xi \cdot w_o - F \end{cases} \quad \text{(III.27)}$$

III.10.2 Régulateur de flux :

Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé. Il convient de régler le flux en agissant sur la composante du courant statorique I_{ds}.

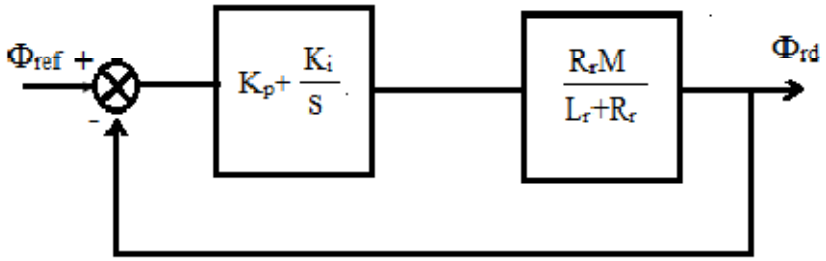


Figure III-7: Schéma bloc de régulation de flux par un régulateur PI

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$\frac{\varphi_{rd}}{\varphi_{ref}} = \frac{\left(k_p \cdot s + k_i\right) \cdot R_r \cdot M}{L_r \cdot s^2 + \left(R_r \cdot M \cdot K_P + R_r\right) \cdot s + R_r \cdot M \cdot k_i} \quad \text{(III.28)}$$

Avec la même procédure vue précédemment, on trouve les éléments du régulateur de flux :

$$\begin{cases} k_i = \dfrac{L_r \cdot w_o^2}{R_r \cdot M} \\ k_p = \dfrac{2 \cdot \xi \cdot L_r \cdot w_o}{R_r \cdot M} - \dfrac{1}{M} \end{cases}$$

III.11 Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants ne sont pas indépendants l'un de l'autre, ils sont reliés par des termes ou des coefficients non linéaires ωrIq,$rIdetIdIq$.

$$\begin{cases} V_d = \left(L_d \dfrac{d_{id}}{dt} + R_s I_d\right) - W_r L_q I_q \\ V_q = \left(L_q \dfrac{d_{iq}}{dt} + R_s I_q\right) + W_r \left(L_d I_d + \varphi_f\right) \end{cases} \quad \text{(III.29)}$$

Le couplage entre les axes d et q est représentée par la figure(III.8)

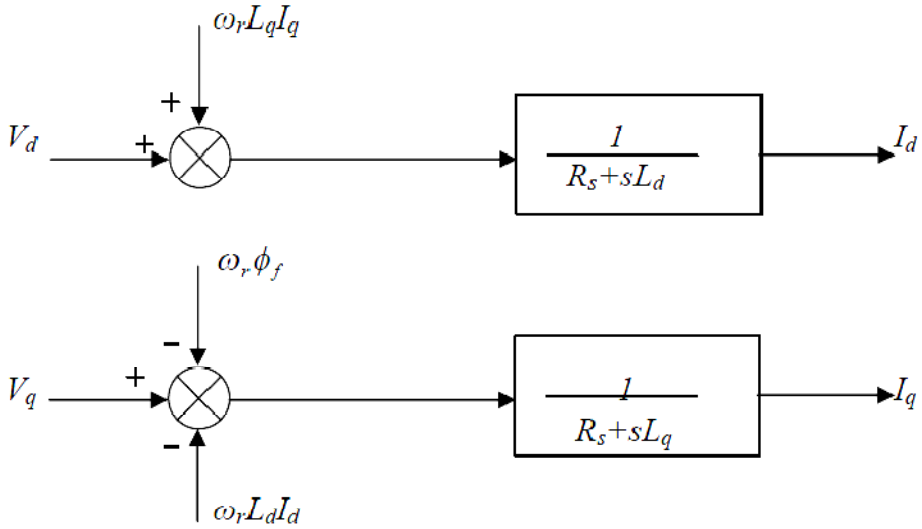


Figure III-8: Description des couplages

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes *d* et *q* complètements indépendant**.**

III.12 Contrôle de la connexion au réseau

III.12.1 Mode de Synchronisation:

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter

Les conditions suivantes:

1. la tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau
2. la fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau
3. la tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau
4. la séquence des phases de l'alternateur doit être la même que celle du réseau

La mise en pratique de ces conditions est appelée Procédure de synchronisation. En agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau.

III.12.2 Contrôle des courants par la commande du convertisseur de puissance:

L'onduleur à MLI est situé entre le bus continu et le transformateur. La REM de l'ensemble du modèle continu équivalent et de la commande obtenue par inversion de la liaison au réseau est donné sur la figure **III-9**

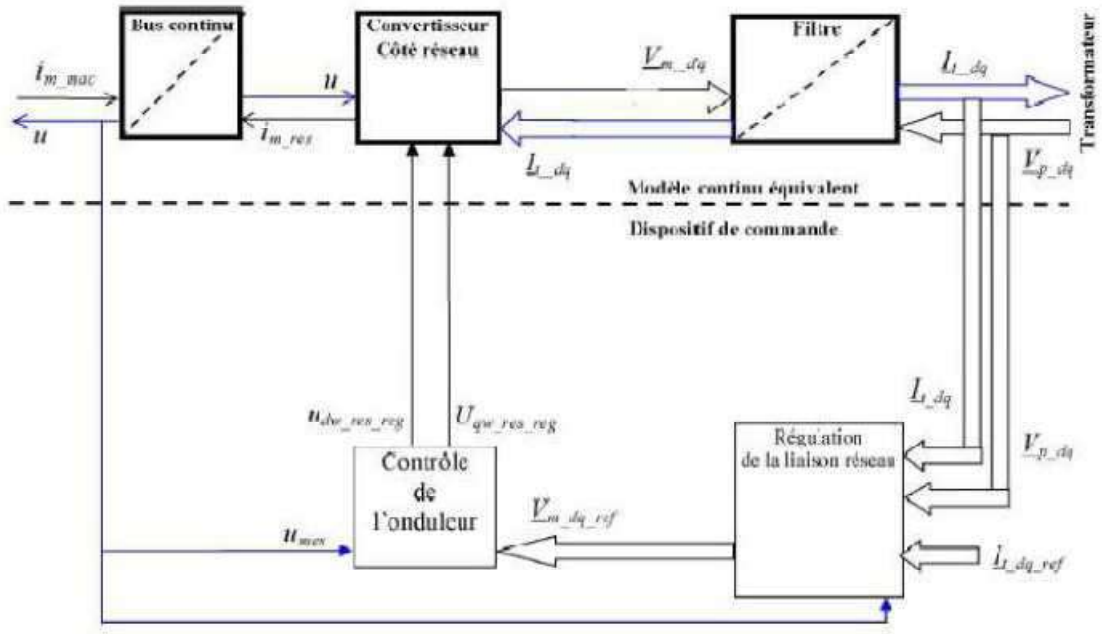


Figure III-9:REM du système de commande du convertisseur du côté réseau **[Bou06]**

La topologie du convertisseur permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau. L'objectif du convertisseur relié au réseau électrique est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de la puissance. Le convertisseur coté réseau a été commandé de manière à contrôler les courants transités par le filtre. Un contrôle vectoriel dans le repère de Park des courants a été réalisé en utilisant un repère synchronisé avec les tensions du réseau.

A partir de la mesure de la tension du bus continu, le convertisseur est commandé de manière à imposer des références aux tensions simples selon la relation inverse du modèle continu équivalent du convertisseur. Cette relation inverse est donnée pour une référence à un point milieu fictif de la tension du bus continu :

$$U_d - res - reg = V_d - reg \cdot \frac{2}{u} \qquad \text{(III.30)}$$

$$U_q - req - reg = V_q - reg \cdot \frac{2}{u} \qquad \text{(III.31)}$$

Par réglage de ces deux tensions simples de référence, les composantes de Park des courants *(id, iq)* sont régulées à l'aide d'un correcteur Proportionnel Intégral PI **[Bou06]**

III.12.2.1 Contrôle des courants envoyés au réseau:

Le dispositif de commande des courants transités au réseau à été obtenu à partir de l'inversion du modèle de la liaison au réseau dans le repère de Park. Il comprend trois actions spécifiques :

- Une compensation de la tension au secondaire du transformateur :

$$e_q - est = L_t \cdot w_s \cdot i_q \quad \text{(III.32)}$$

$$e_d - est = L_t \cdot w_s \cdot i_d \quad \text{(III.33)}$$

- Une action de découplage des courants :

$$\begin{aligned} v_{md} - reg &= v_{bd} - ref - e_q - rest + v_{pd-mes} \\ v_{md} - reg &= v_{bq} - ref - e_d - rest + v_{pq-mes} \\ v_d - reg &= v_d - ref - e_q - est + v_{d-mes} \end{aligned} \quad \text{(III.34)}$$

$e_q - est$ = f.e.m estimée

v_{d-mes} = tension mesuré sur l'axe d

-Un contrôle en boucle fermée des courants :

$$v_{bd-ref} = C_i \cdot \left(i_{tq-ref} - i_{tq-mes}\right)$$

$$v_{bq-ref} = C_i \cdot \left(i_{tq-ref} - i_{tq-mes}\right) \quad \text{(III.35)}$$

Ci : le contrôleur de courant

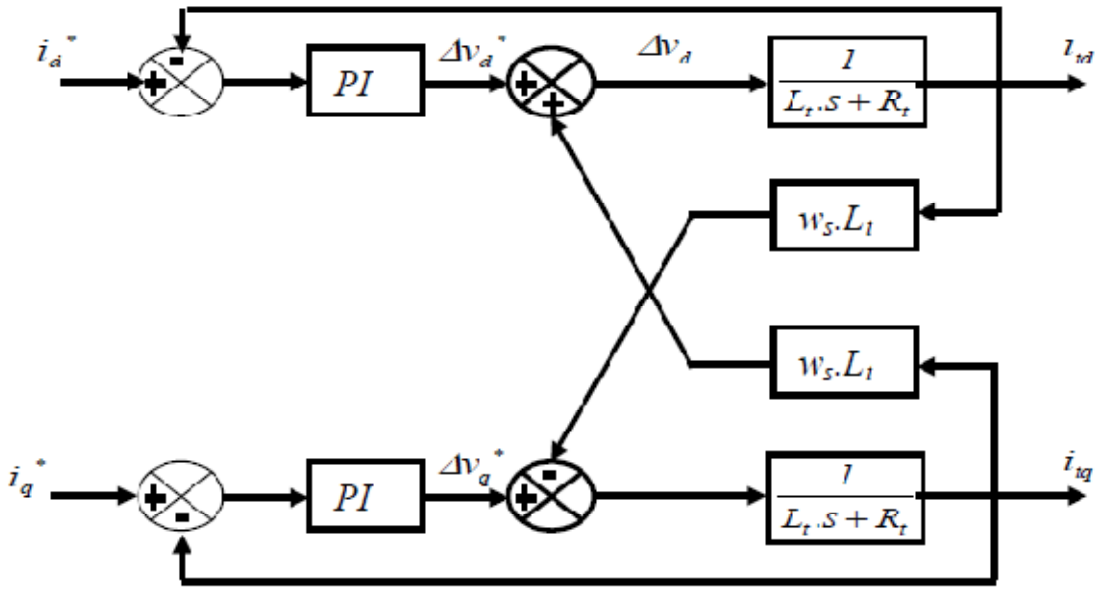


Figure III-10: Schéma du découplage entre les courants transités au réseau

III.12.2.2 Régulation des puissances:

Le dispositif de commande précédemment expliqué permet d'imposer égaux les courants transités à leurs références. Cela entraîne les puissances actives et reactive transitées suivantes :

$$\begin{aligned} p &= v_{pd} \cdot i_{td} + v_{pq} \cdot i_{td} \\ Q &= v_{pq} \cdot i_{td} - v_{pd} \cdot i_{td} \end{aligned} \qquad \text{(III.36)}$$

Par inversion des relations il est alors possible d'imposer des références pour la puissance active et réactive en imposant les courants de référence suivants :

$$\begin{aligned} i_{tq-ref} &= \frac{p_{ref} \cdot v_{pq-mes} + Q_{ref} \cdot v_{pd-mes}}{v_{pd-mes}^2 + v_{pq-mes}^2} \\ i_{td-ref} &= \frac{P_{ref} \cdot v_{pd-mes} + Q_{ref\cdot} \cdot v_{pq-mes}}{v_{pd-mes}^2 + v_{pq-mes}^2} \end{aligned} \qquad \text{(III.37)}$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI). La composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée. Un contrôle indépendant des puissances active et réactive circulant entre le convertisseur et le réseau sera expliqué. Le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des courants sinusoïdaux au primaire du transformateur d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau. Une puissance réactive nulle peut alors être imposée (Q_{ref}=0).

III.13 Conclusion

Dans ce troisième chapitre nous avons défini le principe de la commande vectorielle pour la machine asynchrone et la machine synchrone a aimant permanent, Cette commande nous a permet, de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur afin de garantir une tension constante et stable au site isolé quelques soit les perturbations engendrées par la vitesse du vent. Une technique MPPT appliqué à la turbine afin d'extraire le maximum d'énergie et de garder le fonctionnement à tous moment au point optimal quelque soit les variations du vent. La deuxième partie a été consacrée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la MAS, l'objectif étant la régulation de la vitesse, La troisième partie étudié le contrôle des courant et puissance envoyer au réseau.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire master présente, d'une façon générale, le contrôle d'un système éolien de pompage basé sur la machine synchrone à aimants permanent et à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).et la la commande flux.

Les machines à aimants permanents est une solution intéressante pour l'utilisation desénergies renouvelables. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques à savoir: une durée de vie élevée, un rendement élevé, une maintenance réduite…etc. La structure de MSAP à intégrer dans le système de conversion d'énergie éolienne envisagé a été modélisée et commandée.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres:

Premièrement, on a présenté brièvement l'état de l'art sur différents types d'éoliennes existant avec leurs différents structures d'alimentation, à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal, et le système de pompage .et les différents types de convertisseurs et de groupe motopompe utilisés puis on a illustré un schéma globale du système a étudié.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments de la chaine de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne à axe horizontale, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice synchrone a aiment permanant. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord défini le principe de la commande vectorielle, puis nous avons développé quelques équations, permettent le découplage entre le flux et le couple, et on a expliqué le principe d'optimisation pour la turbine sans asservissement de vitesse et les schémas de principe sont illustré.

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et l'association d'un système de stockage d'énergie.
- Faire un système de control pour des vents fort .
- Concrétisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.

Références bibliographie

[Frèd03] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , soutenue le 19/12/2003.

[REp] Repower (http:/ / www. repower. fr/)

[Bsm13] BOUDIA Sidi Mohammed «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. 2013

[TBe10] Toual Belkacem « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », thèse de doctorat de Université de Batna, 2010.

[Guet13] A. Guettaf « Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.

[Aha17] "Ammar Hachemi «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage», Doctorat en sciences en : Hydraulique Université Mohamed Khider – Biskra 2017

[Mch12]M. Chadel « dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012.

[Mtl10] M.T.Letreche« Commande floue de la machine synchrone a aiment permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », mémoire de magister, université de Sétif, 2010.

[Mir05] A.Mirecki**.** « étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiée a une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[Idj05] K.idjdarene. « Analyse et control d'une chaine de conversion électrique par énergie éolienne », mémoire de magister, université de Bejaia, 2005.

[Aich03] L. Aiche-Hamane et A.Khellaf « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie », International congress of photovoltaics and Wind énergies (ICPWE-2003), Tlemcen, Algérie, 2003.

[MIR05] A.MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

[Rob07] B. Robyn, B. François, F. Degobert et J. P. Hautier « Commande Vectorielle de la machine asynchrone, désensibilisation et optimisation par la Logique floue », Editions Technip, France, Juillet 2007.

Références bibliographie

[Zaft17] Z.AFTISet Y.ASLOUNI," Commande non linéaire d'un système de pompage éolien", Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2017.

[Nben16] N.BENBELAID et R.MAIZ IA «Commande et optimisation d'un système de pompage hybride (photovoltaïque-éolien)», mémoire de Master, Université Abderahmane Mira- Bejaia,2016.

[Befa06] Berrezzek Farid (Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone) Memoire Magister Universite Annaba 2006

[Gued18] Guedda Smail et Alia Salim « Commande Vectorielle d'une Machine à Induction» mèmoire master academique Université El-Oued 2018stratégies

[Asb19] ASLOUNE. Bachir;« Etude D'un système éolien de pompage » ; Mémoire de Master université Bejaïa 2019

[JMa90] J. Martin « Energies éoliennes », Techniques de l'ingénieur, vol. B 1360,1990.

[Cou08] V.Courtesuisse, «supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de célectrique, Ecole nationale d'Arts en métiers, 2008.

[ZAd14] Ziami Adnane ; « optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimant permanents » ; conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc ; 03/06/2014

[Gue19] Guerida Siham, Ouafi Othmane << Modélisation et contrôle d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne>> mémoire Master Université Ahmed Draia Adrar 2019

[Khw12] A. El Khabote et A. Wardi, J.P. Compte. « Problématique de l'alimentation en eau des populations rurales au Maroc, 2012 »

[Chad12] M. Chadel « dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012

[Thi10] KY. Thierry, S.Maurice « système photovoltaïque dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goute a goute », Mémoire de DEA en physique appliqué, université de Ouagadougou, 2010.

[Equ93] B.Equer « le pompage photovoltaïque manuelle de cours », Energie solaire photovoltaïque Edition ellipses 1993

[Khe11] N. Ait Khelifa « Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone a commutation naturelle », Mémoire de master, Université de Bejaia 2011.

[AfZ17] Mr AFTIS Zahir et Mr ASLOUNI Youcef**: «**Commande non linéaire d'un système de pompage éolien », Mémoire de fin de cycle *de* Master *en* Électrotechnique universitaire bèjaia 2017

[Zha97] L. Zhang,C .Watthanasarn et W. Shepherd application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly-fed induction generator, Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'97),23rd International Conference on volume 2,9-14Nov, 1997, pp.906-911

[Rob01] B.Robyns, M.Nacer**: «** Modélisation et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage ». Electrotechnique du futur EF'2001, Nancy, France, 14-15 nov 2001, pp.77-82

[Zeg08] Mr Zegueb Boubaker < Commande d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents Sans Capteur de Vitesse. Utilisation d´Un Observateur Non Linéaire > mèmoire 2008 Batna

[Meb15] Meghni Billel « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaine énergétique éolienne » Doctorat *3ème Cycle* Universite badji mokhtarannaba 2015.

[Bet97] A.Betka, « optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil », thèse de magister, centre universitaire, Biskra, 1997.

[Ham08] N. Hamdi « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », mémoire de magister en électrotechnique, université de Constantine, 2008

[Kek00] M.Kekouaz**, «** Commande vectorielle d'une machine synchrone à aiment permanents alimentée par un onduleur de tension », PFE, Université Annaba, 2000.

[Krm13]R. Kot, M. Rolak, M. Malinowski « Comparison of maximum peak power trackingalgorithms for a Small Wind turbine », Mathematics and Computers in Simulation 91 29– 40, 2013.

[Bou06] B. Boukhezzar, << Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable >>, Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paris XI ORSAY, 2006.

Références bibliographie

[Ada05] Adam MIRECKI, «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,» INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2005.

[Zar10] B.Zarour « Etude technique d'un système d'énergie hybride Photovoltaïque-Eolien hors réseau », Thèse Doctorat, Université de Mentouri de Constantine, 2010.

[Idjd10] K.Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome » Thèse de doctorat, Université Abderahmane Mira-Bejaia, 2010.

[Gcl00] G.Grellet, G.Clerc "Actionneurs électriques : Principes, modèles et commandes", Eyrolles, Paris, France, 2000.

[Int1] https://www.researchgate.net/publication/268256419.