

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université A.MIRA Bejaïa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies Renouvelables

Thème

*Contrôle d'un système de
pompage éolien*

Encadré par:

- M^r Kassa Idjdarene
- M^{me} Sofia Belaid

Réalisé par :

- M^{elle} Behnous Meriem
- M^{elle} Nasri Lydia

*Année universitaire
2015 - 2016*

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur le système de pompage éolien	
I.1. Introduction	3
I.2. Energie éolienne	3
I.2.1. Origine des vents	3
I.2.2. Gisement éolien en Algérie	3
I.2.3. Les différents types d'éoliennes	4
I. 2.3.1. Eolienne à axe horizontal	4
I. 2.3.2. Eolienne a axe vertical	5
I.2.4. Constitution d'un aérogénérateur	5
I.2.5. Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes	7
I.2 .6. Zones de fonctionnement de l'éolienne	8
I.3. Application de l'énergie éolienne	9
I.3.1. Le pompage	9
I.3.1.1. Différent systèmes de pompage	9
I.3.1.1.1. Éoliennes de pompages mécaniques.....	9
I.3.1.1.2. Éoliennes de pompage électrique	10
I.3.1.2. Types de pompes utilisées	11
I.3.1.2.1. Pompes à piston	11
I.3.1.2.2. Pompes centrifuges	12
I.3.1.2.2.1. Constitution d'une pompe centrifuge	12
I.3.1.2.2.2. Fonctionnement d'une pompe centrifuge	12

I.4. Configuration des systèmes de pompages éoliens suivant le moteur d'entraînement	13
I.4.1. Machine asynchrones à cage (MAS)	13
I.4.2. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)	14
I.5. Convertisseurs statiques	16
I.5.1. Le convertisseur alternatif/continu (redresseur)	16
I.5.2. Le convertisseur continu-alternatif (onduleur)	17
I.6. Commande des systèmes non linéaires	17
I.6.1. La commande prédictive	18
I.6.2. Commande floue	18
I.6.3. Mode glissant	18
I.7. Etat de l'art sur les systèmes de pompage éolien	19
I.8. Conclusion	21

Chapitre II Modélisation des éléments du système de pompage éolien

II.1. Introduction	22
II.2. Modèle du vent	22
II.3. Modèle de la turbine	22
II.4. Modèle du multiplicateur de vitesse	23
II.5. Modélisation de l'arbre de la machine	24
II.6. Modélisation de la machine asynchrone	24
II.6.1. Hypothèses simplificatrices	24
II.6.2. Mise en équations du modèle de la machine asynchrone	24
II.6.3. Équations générales d'une machine asynchrone	25

II.6.4. Transformation de Park	28
II.6.5. Application de la transformation de Park à la machine asynchrone	29
II.6.6. Expression du couple électromagnétique	30
II.6.7. Résultat de simulation de la machine asynchrone	30
II.7. Modèles des convertisseurs de puissance	32
II.7.1. Modélisation de l'onduleur	32
II.7.2. Modélisation de redresseur	33
II.8. Modélisation du bus continu	35
II.9. Modèle mathématique du dispositif	36
II.10. Modélisation de pompe centrifuge	37
II.11. Conclusion	38

Chapitre III Commande vectorielle de système de pompage éolien.

III.1. Commande vectorielle	39
III.1.1. Types de commande vectorielle	39
III.1.1.1. Commande vectorielle directe	39
III.1.1.2. Commande vectorielle indirect	39
III.2. contrôle de la machine asynchrone	40
III.3. commande vectorielle par orientation du flux rotorique	40
III.4. Résultats de simulation de la commande vectorielle	43
III.6. Conclusion	46

Chapitre IV : Contrôle du système de pompage.

IV.1. Introduction	47
--------------------------	----

IV.2. Historique de la commande par mode glissant	47
IV.3. Conception de la commande par mode de glissement	47
IV.3.1. Le choix de la surface de glissement	48
IV.3.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant	49
IV.3.3. Calcul de la commande	50
IV.4. Les avantages et les inconvénients de la commande par mode glissant	51
IV.5. Application de la commande	52
IV.5.1. La surface de régulation de flux rotorique	52
IV.5.2. La surface de régulation de la vitesse	53
IV.6. Résultats de simulation de la commande	53
IV.6.1. Résultats de simulation de la commande vectorielle avec des régulateurs PI classiques	54
IV.6.2. Résultats de simulation de la commande vectorielle avec des régulateurs par Mode Glissant	55
IV.7. Conclusion	57
Conclusion générale	58

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos plus vifs remerciements à nos encadreurs Mr Kassa Idjdarene et Mme Sofia Belaid qui nous ont aimablement orientés et assidument dirigé notre travail, sans oublier Mr Adel Aberbour qui nous a été d'une grande aide.

Nous présentons aussi nos sincères remerciements au président du jury et les membres de jury examinateurs d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont aidé et soutenu durant tout notre parcours trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

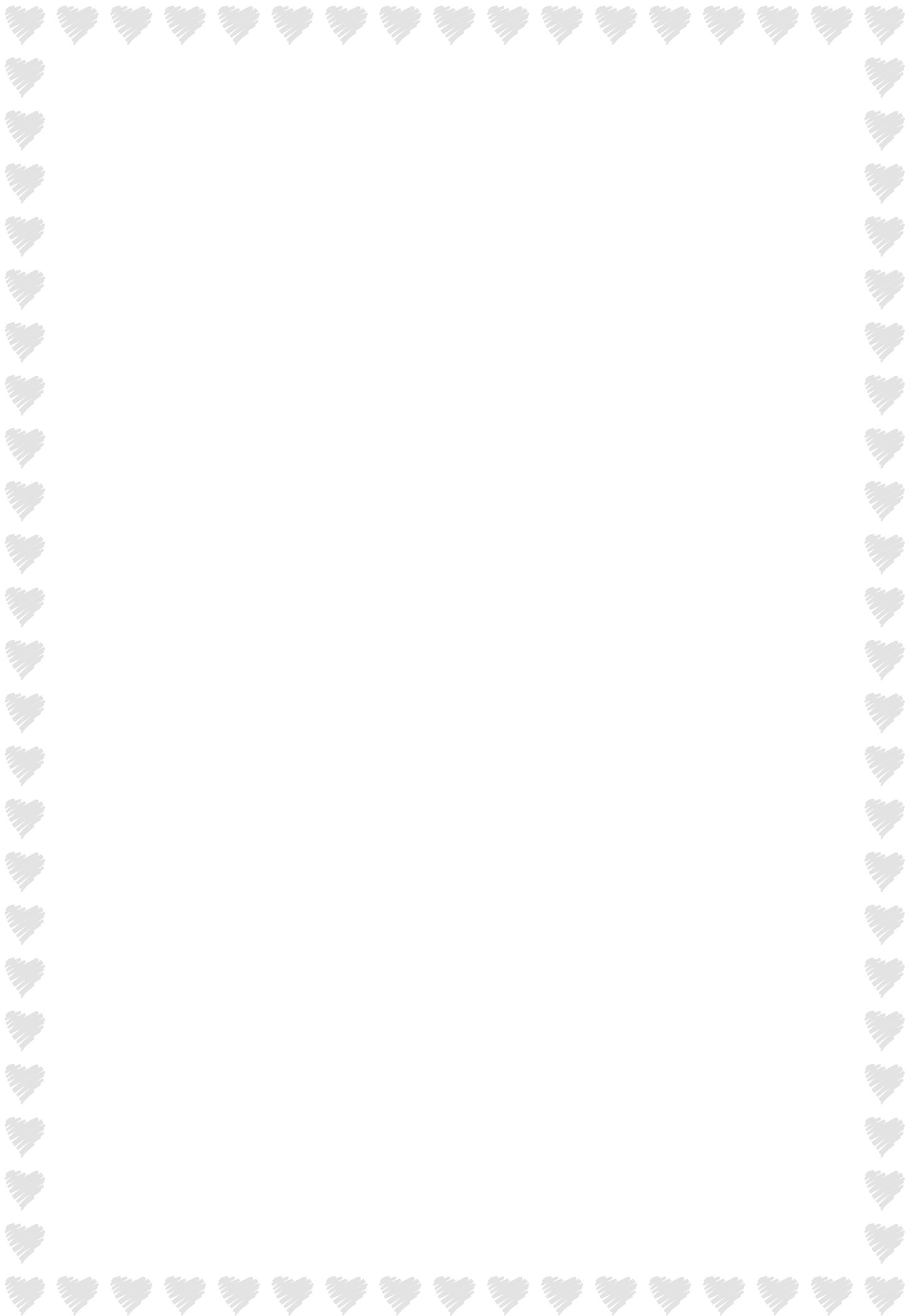
Behnous et Nasri.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ❖ *A la mémoire de Mon père, J'aurais aimé vous voir assister à ma soutenance,*
- ❖ *A l'être le plus chère à mes yeux sans qui je ne serai jamais arrivée là, à celle qui m'a soutenue, qui a sacrifié sa vie pour que je ne manque de rien, à celle qui a été pour moi une mère et un père, je lui exprime mes plus profonds sentiments de gratitude, de respect et d'amour. Merci maman. que dieu te protège,*
- ❖ *A mes chers frères, MOHAMED, NASSIME et AZZODDINE,*
- ❖ *A mon fiancé Locif et sa famille*
- ❖ *A toute ma famille,*
- ❖ *A mon binôme Lydia,*
- ❖ *A toutes mes amies.*

Maya.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ *En premier lieu à ma mère qui a consenti beaucoup de sacrifices pour me permettre de réaliser mes objectifs.*
- ❖ *A mon beau père.*
- ❖ *A mon petit frère Wassim.*
- ❖ *A mes grands parents.*
- ❖ *A mes tantes et oncles.*
- ❖ *A mes très chères amis, Mourad, Chanez, et Ounissa.*
- ❖ *A mon binôme Maya.*
- ❖ *A la mémoire de mon grand père Ali, et mon amie Sabine.*
- ❖ *A tous mes camarades et amis.*

Lydia.

1. La turbine

P_v	: La puissance fournie par le vent (w).
P_t	: Puissance de la turbine éolienne (w).
ρ	: Masse volumique de l'air (kg/m^3).
S_t	: Surface balayée par la turbine éolienne (m^2).
R_t	: Rayon de la turbine éolienne(m).
V	: La vitesse du vent (m/s).
Ω_t	: Vitesse de la turbine éolienne (rad /s).
C_p	: Coefficient de puissance.
λ	: Le rapport de la vitesse en bout des pales.
C_t	: Couple de la turbine éolienne(N.m).
β	: L'angle de calage des pales (rad).

2. La Machine

Grandeurs statoriques (Machine réelle)

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	: Tension d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) (V).
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	: Courants statoriques (A).
R_s	: Résistance d'une phase statorique (ohm).
L_s	: Inductance propre d'une phase statorique.
ω_s	: Pulsation du champ statorique (rad/s).
$[v_{sabc}]$: Matrice des tensions statorique (V).
$[i_{sabc}]$: Matrice des courants statoriques.
$[\phi_{sdqo}]$: Matrice des flux statoriques.
$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

Machine modélisée

- v_{sd}, v_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d,q) (V).
- i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d,q) (A).
- ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park (d,q) (A).
- T_s : Constante de temps statorique (s).
- θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park.
- $[v_{sdqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
- $[i_{sdqo}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
- $[\phi_{sdqo}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Grandeurs rotoriques (Machine réelle)

- I_{ra}, i_{rb}, i_c : Courants rotoriques (A).
- R_r : Résistance d'une phase rotorique (ohm).
- L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.
- ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).
- $[i_{rabc}]$: Matrice des courants rotoriques .
- $[\phi_{rabc}]$: Matrice des flux statoriques.
- $[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

Machine modélisée

- v_{rd}, v_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d,q) (V).
- i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d,q) (A).
- ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d,q) (A).
- T_r : Constante de temps rotorique (s).
- θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d »

du repère de park.

- $[V_{rdqo}]$: Matrice des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
 $[i_{rdqo}]$: Matrice des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
 $[\phi_{rdqo}]$: Matrice des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Grandeurs communes stator/rotor (Machine réelle)

- M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).
 ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).
 P : Nombre de paires de pôles de la machine.
 θ : Angle électrique de position de la machine (rad).
 g : Glissement de la machine.

Machine modélisé

- M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

Grandeurs mécaniques

- J : Inertie totale ramenée à l'arbre du moteur.
 f : Coefficient de frottement visqueux.
 Ω : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
 C_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone (N.m).
 G : Gain du multiplicateur.

3. Les convertisseurs

Le redresseur

- V_a, V_b, V_c : Tension de référence (V).
 i_a, i_b, i_c : Courants de référence (A).
 i_{dc} : Courant modulé par le redresseur (A).
 S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

L'onduleur

- v_a, v_b, v_c : Tensions à la sortie de l'onduleur (V).
 v_{ao}, v_{bo}, v_{co} : Tensions à l'entrée de l'onduleur (V).
 v_{an}, v_{bn}, v_{cn} : Tensions de phase de la charge (V).
 $i_{ach}, i_{bch}, i_{cch}$: Courants de sortie (A).
 S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

4. Le bus continu

- V_{dc} : Tension du bus continu (V).
 I_c : Courant capacitif (A).
 C : Capacité du bus continu (F).

5. La pompe

- Q : Débit de la pompe (m^3/s).
 H : Hauteur totale du pompage (m).
 W_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad /s).
 P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (Watt).
 C_r : Couple résistant de la pompe (N.m).

6. Convention et abréviations

- MLI : Modulation par largeur d'impulsion.
GAS : Génératrice asynchrone.
MAS : Machine asynchrone.
MADA : Machines asynchrones à double alimentation.
S : Opérateur de Laplace.

Liste des figures

Figure. I.1 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol	3
Figure. I.2 : Eolienne à axe horizontal	3
Figure. I.3 : Eoliennes à axe vertical	4
Figure. I.4 : Les constituants de l'aérogénérateur	5
Figure. I.5 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	7
Figure. I.6 : Schéma d'une éolienne multipale	9
Figure. I.7 : Schéma d'un aérogénérateur alimentant une pompe	9
Figure. I.8 : Schéma synoptique du pompage électrique et mécanique	10
Figure. I.9 : Pompe à piston	10
Figure. I.10 : Constitution d'une pompe centrifuge	11
Figure. I.11 : Pompe centrifuges	12
Figure. I.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable ...	13
Figure. I.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor	14
Figure. I.14 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par la chaîne rotorique	14
Figure. I.15 : Pont redresseur triphasé à diode	15
Figure. I.16 : Pont redresseur triphasé mixte	15
Figure. I.17 : Pont redresseur triphasé à thyristor	16
Figure. I.18 : Schéma de l'onduleur	16
Figure II.1 : Schéma de la turbine éolienne	22

Figure II.2 : Présentation des axes de la machine	24
Figure II.3 : Passage du système ABC au système dqo	29
Figure II.4 : Allure de la vitesse du moteur asynchrone	30
Figure II.5 : Allure de couple électromagnétique	31
Figure II.6 : Les courants statorique du moteur asynchrone	31
Figure. II.6.B : Zoom sur l'allure des courant statoriques	31
Figure II.7 : Circuit de l'onduleur relié à la machine	32
Figure II.8 : Circuit de Redresseur MLI	33
Figure II.9 : Schéma simple du circuit du bus continu	35
Figure II.10 : Auto-amorçage par un convertisseur à MLI	36
Figure III.1 : Principe du contrôle vectoriel	41
Figure. III.2 : Allure de la vitesse de l'arbre du rotor Ω_r (rad/s)	43
Figure. III.3 : Allure de la tension V_{dc}	44
Figure. III.4 : Allure du flux rotorique	44
Figure. III.5 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant	44
Figure. III.6 : Allure du courant i_{sd} et i_{sq}	45
Figure. III.7 : Allure du courant i_{dc}	45
Figure. III.8 : Zoom sur l'allure des courant statoriques	45
Figure IV.1 : Différentes modes pour la trajectoire	48
Figure. IV.2 : Fonction <i>sign</i> (non linéarité tout ou rien)	50
Figure. IV.3 : Phénomène de broutement	51

Figure. IV.4 : Fonction de saturation	52
Figure. IV.5 : Allure de la puissance éolienne	54
Figure. IV.6 : Allure de la vitesse de l'arbre du rotor Ω (tr/min)	54
Figure. IV.7 : Allure du flux rotorique Φ_r (wb)	54
Figure. IV.8 : Allure de la vitesse Ω (tr/min)	55
Figure. IV.9 : Allure du flux rotorique Φ_r (wb)	55
Figure. IV.10 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant	55
Figure. IV.11 : Allures du courants statorique i_{sd} et i_{sq}	56
Figure. IV.12 : Zoom sur l'allure des courants statoriques i_{sabc} (A)	56
Figure. IV.13 : Allure de débit de la pompe	56

Introduction générale

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables.

Face à la demande en électricité, toujours croissante de nos jours, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables [1].

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! [2].

Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre [3].

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique [2].

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 répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes [4].

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. Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entraînement 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 entraînements à vitesses variables. Des commandes assez laborieuses ont été mis au point pour réaliser un contrôle découplé de la MAS en utilisant des repères appropriés. Afin de bien situer notre travail, nous l'avons structuré suivant quatre chapitres :

Le premier, chapitre portera des définitions et généralités sur le système éolien.

Le deuxième chapitre, traitera la modélisation de la partie mécanique ainsi que la partie électrique à savoir la MAS, le redresseur, l'onduleur de tension pour la commande. Cette modélisation est d'apport précieux car elle permet de réaliser une image de ce que l'on peut observer expérimentalement.

Le troisième chapitre ainsi que le dernier seront consacrés à l'application de la commande vectorielle classique (Régulateur PI) et la commande vectorielle par mode glissant.

Finalement une conclusion générale et des perspectives seront données à la fin de ce mémoire.

Chapitre I

Généralités sur le système de pompage éolien

I.1. Introduction

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie en plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes de nombreux systèmes, de différents types ont été conçus et développés. Sachant que nous nous intéressons à un système de pompage éolien, nous devons nous familiariser avec tous les éléments le constituant. Alors dans ce premier chapitre nous parlerons de l'éolien en générale, du pompage, aussi nous définirons tous les éléments de la structure, ainsi nous présenterons les différentes structures du pompage éolien.

I.2. Energie éolienne

L'énergie du vent ou l'énergie éolienne est le résultat des déplacements de l'air et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Elle peut être utilisée de deux manières : directe (Conservation de l'énergie mécanique) et indirecte (Transformation en énergie électrique) [5].

I.2.1. Origine des vents

L'atmosphère composée de l'oxygène, de l'azote et de l'eau, est caractérisé par sa pression, sa température et son humidité, dont les paramètres varient avec l'altitude à cause de la rotondité de la terre. Le rayonnement solaire est absorbé de façon très différente aux pôles et l'équateur : l'énergie absorbée a l'équateur est très supérieur a celle des deux pôles ces variations de température provoquent différentes densités de masses d'air, entraînant ainsi leur déplacement d'une latitude a une autre. Le déplacement de ses densités s'effectue des zones ou l'air (pression atmosphérique) est élevé vers celle ou celui-ci est faible. Ces déplacements sont considérablement influencés par la force de Coriolis, qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. Le vent est donc caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps [6] :

- La vitesse
- La direction

I.2.2. Gisement éolien en Algérie

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement du à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes, le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté

par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [7].

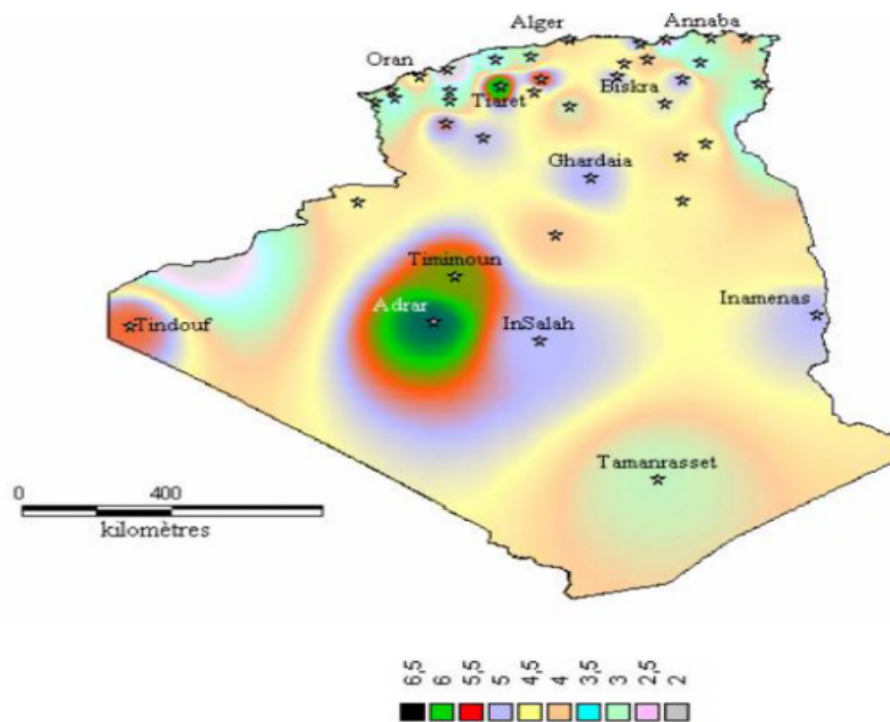


Figure. I.1 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

I.2.3. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées selon deux catégories : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

I.2.3.1. Éolienne à axe horizontal

Ces éoliennes sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement plus élevé, démarrent de façon autonome et occupent une faible emprise au niveau du sol. On peut distinguer deux éoliennes à axes horizontales : Les éoliennes dont l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent et les éoliennes dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent [8].



Figure. I.2 : Eolienne à axe horizontal.

I.2.3.2. Éolienne à axe vertical

Ce type d'éolienne ne nécessite pas de système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent, et offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice directement au sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol ce qui ne permet pas de développer de grandes puissances. Ce type d'éolienne n'a qu'un très faible rendement ne dépassant pas 50% de la limite de Betz. De plus certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage ce qui nécessite un moteur électrique au démarrage [9].

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence. Parmi les turbines à axe vertical on trouve le rotor de Darrieus et le rotor de Savonius.



Figure. I.3 : Eoliennes à axe vertical.

2.4. Constitution d'un aérogénérateur

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut

être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées [10].

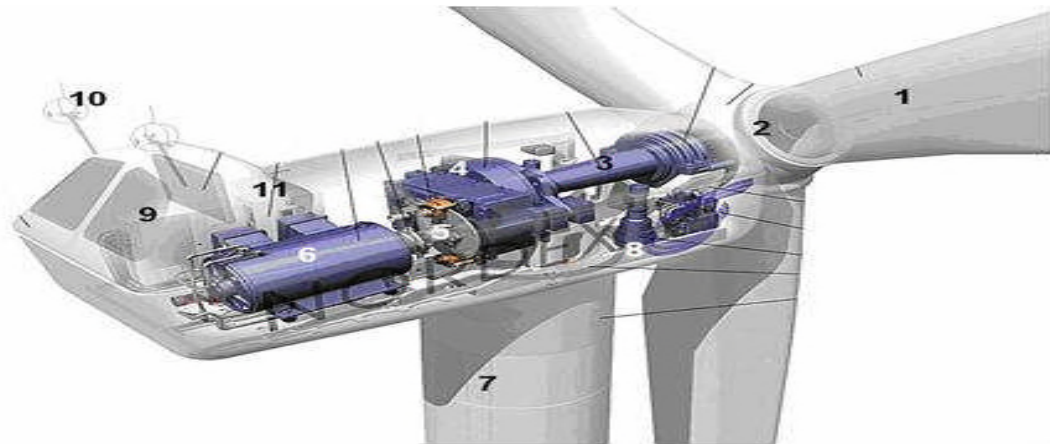


Figure I.4 : Les constituants de l'aérogénérateur.

1. **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

11. **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

12. Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

I.2.5. Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes [11]

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

Type	Avantages	Inconvénients
Eolienne à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> -choix le plus vaste -installateurs compétents -technologie éprouvée -le prix -le meilleur rendement 	<ul style="list-style-type: none"> -fonctionnement par intermittence -doit être orientée selon les vents -mauvais rendement avec des vents turbulents -emprise au sol du mat si haubannage -installation déconseillée sur un bâtiment -nuisances sonores éventuelles
Eolienne a axe vertical de type savonius	<ul style="list-style-type: none"> -faible encombrement (selon les modèles) -peut être intégrée au bâtiment (selon les modèles) -démarrage même avec un vent de faible intensité -peu Bryant -pas de contraintes selon la direction du vent -bon comportement aux vents forts 	<ul style="list-style-type: none"> -rendement faible -le poids peut être important -le prix
Eolienne a axe vertical de type darrius	<ul style="list-style-type: none"> -peut être installée au sol -faible encombrement -peut être intégrée Au bâtiment -pas de contraintes selon la 	<ul style="list-style-type: none"> -démarrage difficile -rendement faible -prix

	direction du vent -bon comportement aux vents forts -peu bruyante	
--	---	--

I.2.6. Zones de fonctionnement de l'éolienne

La courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [12] :

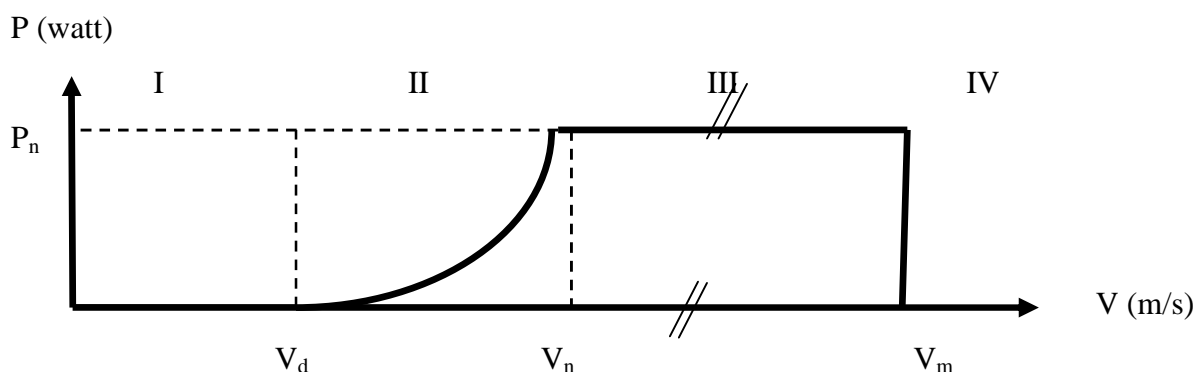


Figure. I.5 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

V_d : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_d varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V_n varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

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

- **Zone I :** $V < V_d$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- **Zone II :** $V_d < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

- **Zone III** : $V_n < V < V_m$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.
- **Zone IV** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie

I.3. Application de l'énergie éolienne

La technologie de systèmes éoliens, très faible et très souple est destinée depuis des siècles à de multiples usages. On cite :

- La signalisation maritime
- Le dessalement
- La télécommunication
- La radio fusion
- Les communautés éloignées
- L'usage domestique
- Finalement le pompage qui est à présent le plus répandu des usages.

I.3.1. Le pompage

L'utilisation de système de pompage éolien est une solution pour satisfaire les besoins en eau dans un site isolé est assez bien venté. Un tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité [13].

Deux types de systèmes de pompage existent :

- Le système mécanique.
- Le système électrique.

I.3.1.1 Différent systèmes de pompage

I.3.1.1.1 Éoliennes de pompes mécaniques

Le principe de fonctionnement est le suivant : un rotor éolien d'une vingtaine de pales entraîné par un système de bielle-manivelle, et une pompe à piston plongée au fond du puits (Figure.6.7). 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'eau pompées sont faibles, et les

risques de rupture de la tringleriez de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécaniques [4].

Les éoliennes de pompage mécanique ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont généralement fiables, d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits [13].

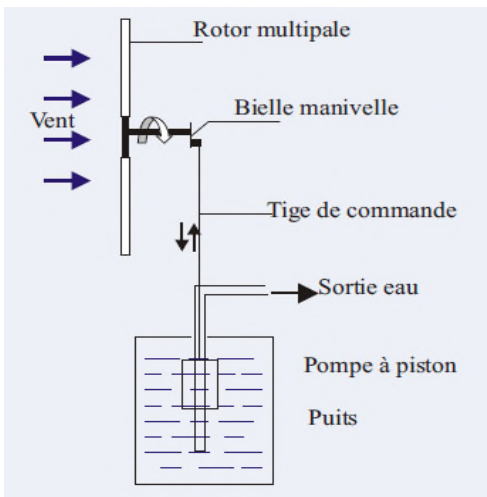


Figure. I.6 : Schéma d'une éolienne aérogénérateur multipale

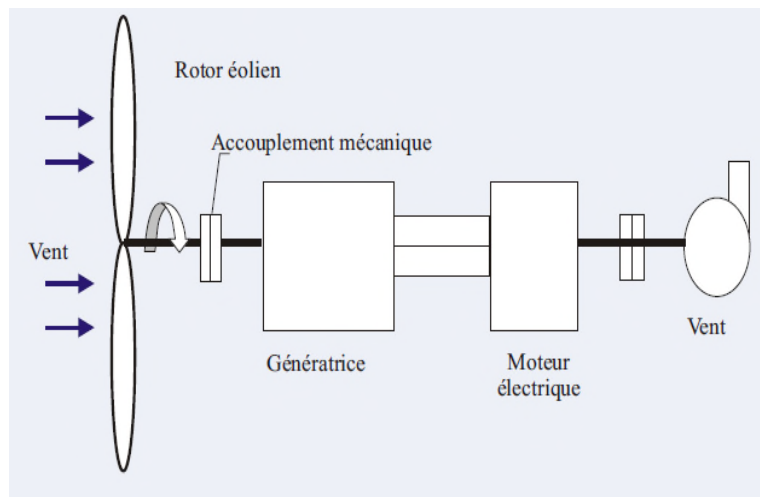


Figure. I.7 : Schéma d'un système éolien alimentant une pompe

I.3.1.1.2. Éoliennes de pompage électrique

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang ou un système d'irrigation). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électriques ne comprennent pas de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie [13].

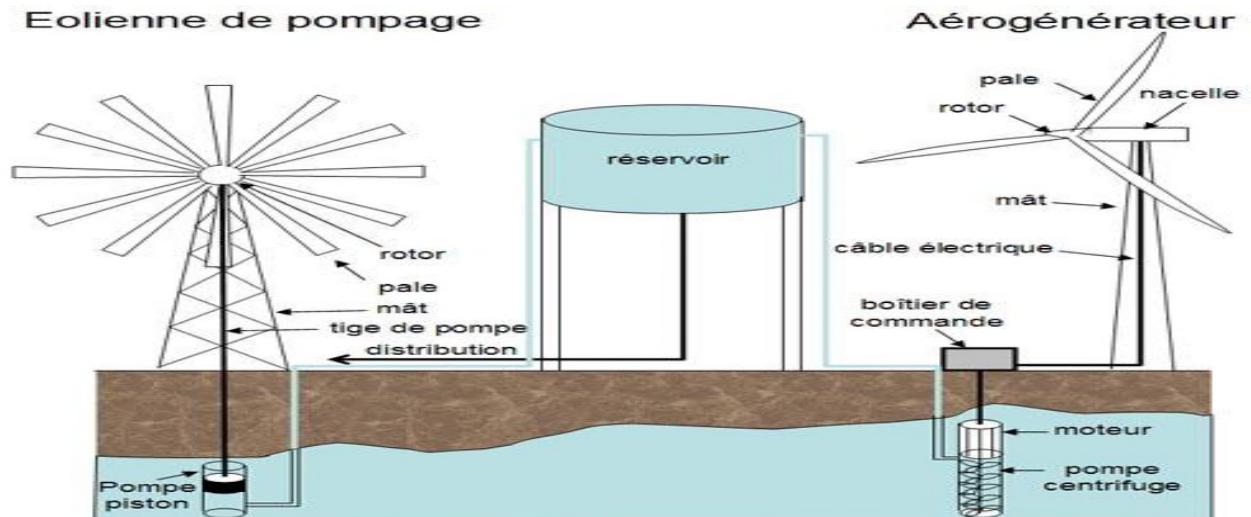


Figure. I.8 : Schéma synoptique du pompage électrique et mécanique.

I.3.1.2. Types de pompes utilisées

On distingue généralement les pompes à piston et les pompes centrifuges.

I.3.1.2.1. Pompes à piston

C'est l'un des types de pompe les plus utilisés. La roue de l'éolienne sur laquelle sont fixées des pales tourne sous l'action du vent. Cette roue est fixée sur un arbre dont le mouvement de rotation est transformé en mouvement vertical alternatif par l'intermédiaire d'un plateau manivelle ou d'une bielle. Le va et vient ainsi créé entraîne en contrebas par l'intermédiaire d'une tringle d'acier un piston de la pompe à eau généralement immergée du forage. Le couple de fonctionnement nécessaire étant très élevé, il faut pouvoir utiliser le moindre souffle de vent. L'hélice devra donc comporter un assez grand nombre de pales. Celui-ci varie le plus souvent entre 15 et 18. La courbure et le nombre de pales assurent à l'éolienne un démarrage plus ou moins facile par vent assez faible et conditionnent pour une large part son rendement [14].



Figure. I.9 : Pompe à piston

I.3.1.2.2. Pompes centrifuges

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est 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 consommée, proportionnelle à $Q \cdot HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres), [15] [16].

I.3.1.2.2.1. Constitution d'une pompe centrifuge

- 1- Cône divergent
- 2- Axe de la pompe
- 3- Corps de la pompe
- 4- Aube
- 5- Limaçon
- 6- Roue

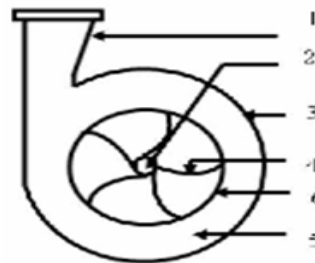


Figure. I.10 : Constitution d'une pompe centrifuge.

Les pompes se constituent de deux éléments essentiels :

- Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur.
- Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor [17] [18].

I.3.1.2.2.2. Fonctionnement d'une pompe centrifuge

Lorsque la pompe est pleine d'eau, sous l'effet de la rotation de la turbine entraînée par le moteur. L'eau qui arrive dans la région axiale est projetée à la périphérie de ce fait engendre une dépression. Cela provoque un appel des tranches suivantes et par suite, un écoulement continu de la veine liquide. Cette dernière est recueillie par la volute ou par le diffuseur et dirigée dans la conduite de refoulement [19].



Figure. I.11 : Pompe centrifuge.

Ce sont les pompes les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût.

I.4. Configuration des systèmes de pompes éoliens suivant le moteur d'entraînement

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

I.4.1. Machine asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée, mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc rarement exploitée. La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante. Le maintien de cette vitesse fixe, permet de contrôler l'énergie réactive

des condensateurs d'auto-amorçage, et ce au détriment du rendement de conversion, contrairement aux systèmes fonctionnant à vitesse variable. Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible [4].

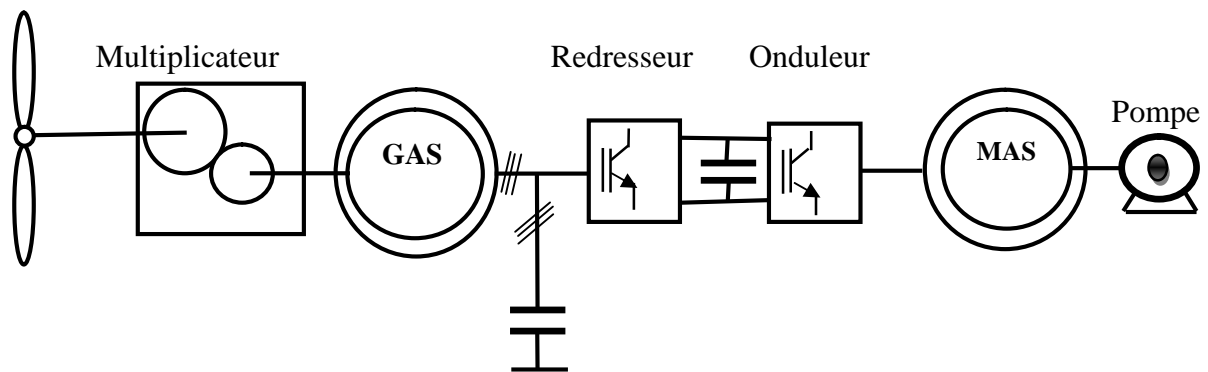


Figure. I.12 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

I.4.2. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

Dans cette configuration, le stator de la génératrice est couplé directement au moteur d'entraînement, alors que le rotor est lié au stator via deux convertisseurs statiques en cascade, garantissant une vitesse variable en dessous et en dessus du synchronisme.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil alors le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important [4].

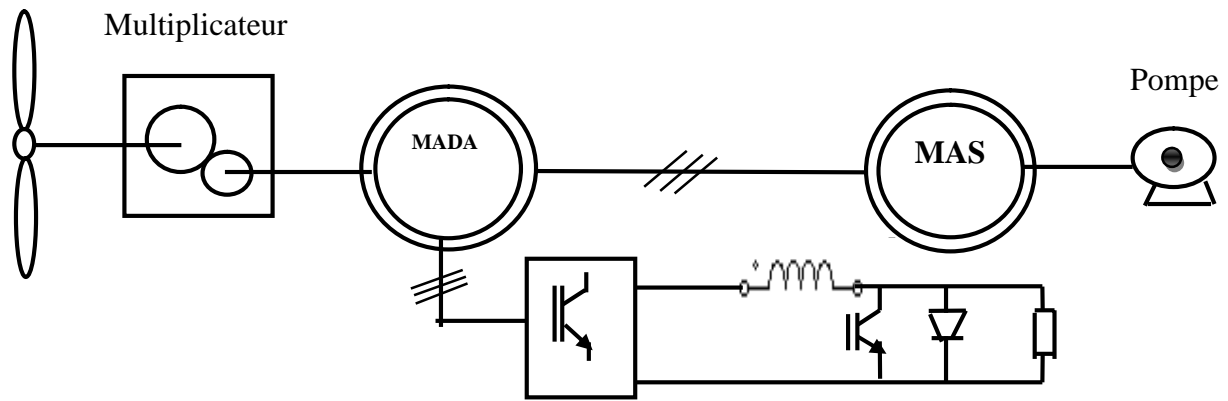


Figure. I.13 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.

Une autre solution très intéressante et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30 % autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux convertisseurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur. En général, le dimensionnement de la chaîne de rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30 % de la plage de vitesse [4].

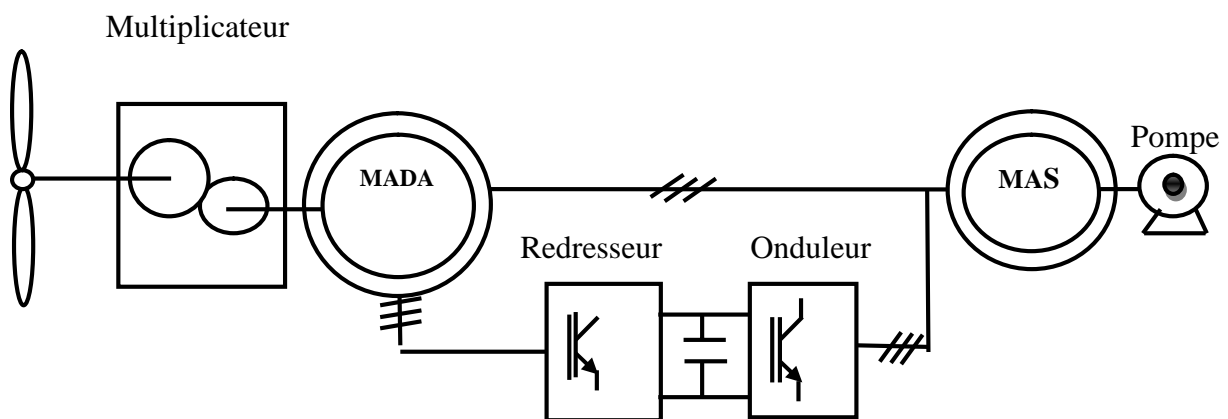


Figure. I.14 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par la chaîne rotorique.

I.5. Convertisseurs statiques

I.5.1. Le convertisseur alternatif/continu (redresseur)

Un redresseur est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite de l'être par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est, la plupart du temps, un générateur de tension [20].

On classe les divers redresseur on trois catégorie :

- Les redresseurs non commandés : ne comportent que des diodes, sont utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.

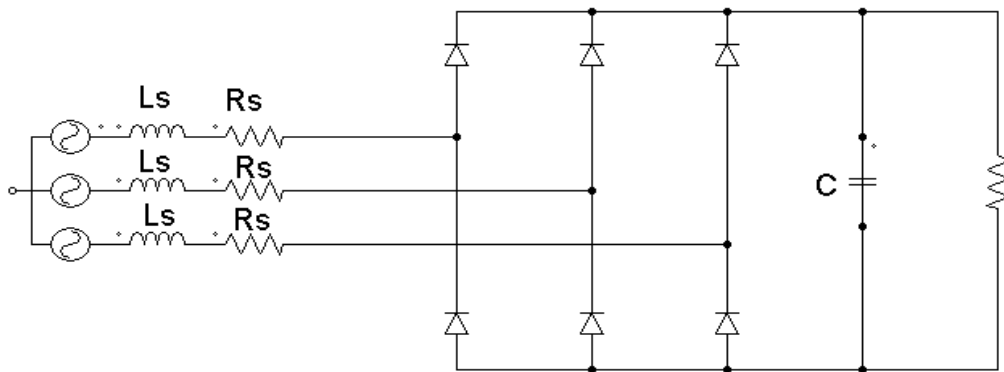


Figure. I.15 : Pont redresseur triphasé à diode.

- Les redresseur semi commandés : comporte des thyristors et des diodes qui empêchent la tension au borne de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne. Les redresseurs non commandés et les redresseur semi commandés sont appelés des convertisseurs unidirectionnels car la puissance peut circuler que de l'alimentation alternative vers la charge continue.

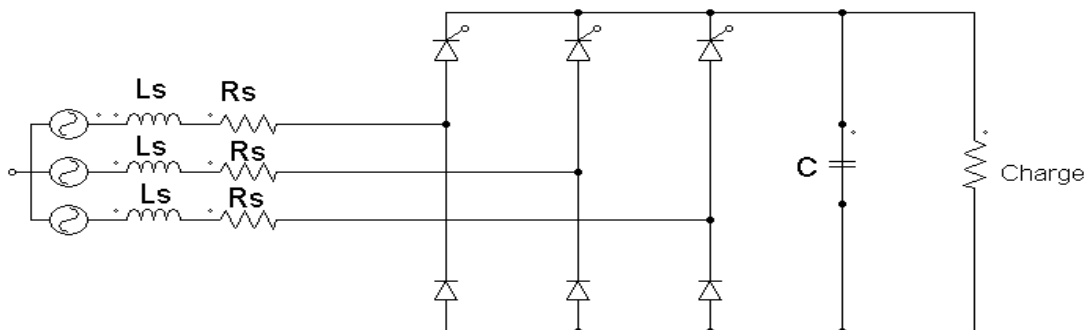


Figure. I.16 : Pont redresseur triphasé mixte.

- Les redresseurs commandés : ne comporte que des thyristors ils sont appelés des convertisseurs bidirectionnels car la puissance peut circuler dans les deux sens.

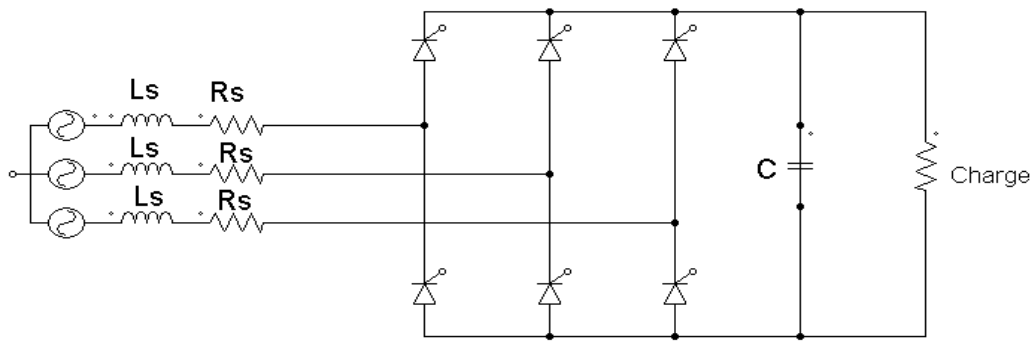


Figure. I.17 : Pont redresseur triphasé à thyristor.

I.5.2. 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 [8].

- Onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner.
- Onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors en commutation naturelle est assistée par le réseau auquel il est raccordé.

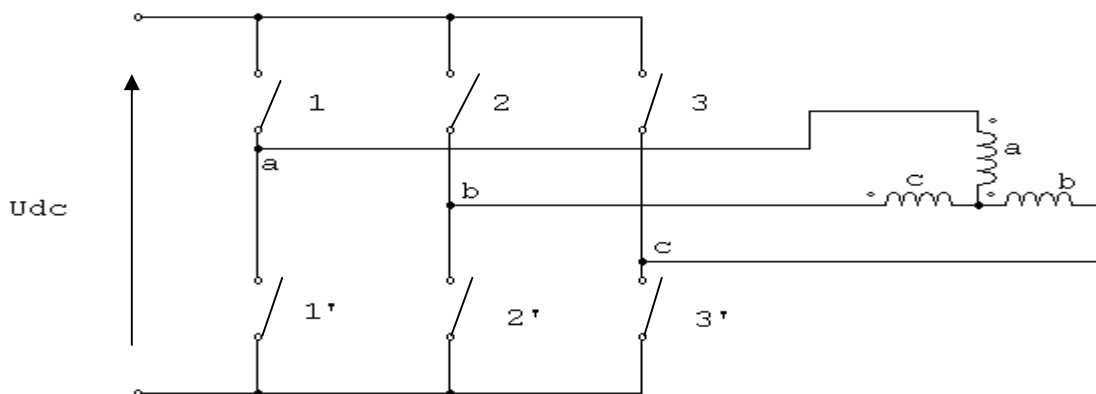


Figure. I.18 : Schéma de l'onduleur.

I.6. Commande des systèmes non linéaires

Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont

strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités (prédictive, floue et mode glissant).

I.6.1. La commande prédictive

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle est largement utilisée dans le domaine industriel et a été appliquée avec succès pour différents applications, le terme commande prédictive ne désigne pas une stratégie de commande spécifique mais un ensemble d'algorithmes qui utilise explicitement le modèle de système dans un problème d'optimisation, à résoudre pour déterminer la commande à appliquer [21].

Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Elle est utilisée dans diverse applications, notamment dans les systèmes robotiques, des machines électriques, la surveillance et la conduite des procédés biotechnologiques.

I.6.2. Commande floue

Le principe de la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables utilisées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire) mais des variables linguistiques, proches du langage humain courant. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide de règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système. Ainsi, la théorie de la logique floue, fondée sur des aspects de la théorie des possibilités, fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés "ensembles flous" caractérisant les différentes grandeurs du système à commander. Le raisonnement flou emploie un ensemble de règles floues établies par l'expert et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de décision [22].

Ainsi, les éléments de base de la logique floue sont les suivants :

- Les variables linguistiques et les ensembles flous.
- Les fonctions d'appartenance.
- Les opérateurs.

I.6.3. Mode glissant

Le principe de la commande par modes glissants consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers une région convenablement sélectionnée en un temps fini pour y ensuite

rester. La région considérée est alors désignée comme surface de glissement ou de commutation représentant une relation entre les variables d'état du système [23].

I.7. Etat de l'art sur les systèmes de pompage éolien

L'énergie du vent fut utilisée pour le pompage de l'eau depuis l'antiquité. Hammou rabi, est le premier qui aurait conçu un projet d'utilisation du vent pour assurer l'irrigation des plaines de Mésopotamie en 1700.

Leupold et Belidor ont donné des descriptions valables de moulins pour pompage. Le plus intéressante machine est celle que propose Jacob Leuplod en 1724, une roue à huit aubes entraînée par un vilebrequin, une tige et une pompe à piston simple effet suivant une disposition reprise 2 siècles plus tard par les éoliennes dites américaines.

Après l'industrialisation ya eu une grande évolution concernant le pompage éolien. Les ingénieurs sont arrivés à concevoir 2 types de groupe de pompage éolien :

- Les éoliennes lentes avec pompe à piston
- Les éoliennes rapides accouplées à des pompes à hélice ou à des pompes centrifuges

Les réalisations récentes caractérisent l'évolution des techniques nouvelles.

1. Les éoliennes lentes avec pompe à piston

Tachons de savoir qu'une installation de pompage de petite puissance soit équipée avec une pompe à piston mais l'importance des hauteurs de refoulement, aussi la nécessité d'utiliser un matériel simple conduisent généralement, pour les petites puissances, à l'emploi de pompes à piston lentes.

L'éolienne utilisée est une machine à faible vitesse spécifique avec presque souvent un démultiplicateur. Ce genre de machine possède un couple de démarrage élevé qui s'accorde avec les exigences des pompes à piston.

D'autre part, la pompe à piston étant très sensiblement une pompe à couple constant, la puissance de l'éolienne est mal utilisée au grand vent. Pour de petites machines ce dernier point n'est pas grave, mais, pour de grosses machines où la notion de rendement a plus d'importance, cette mauvaise utilisation serait inacceptable.

Les roues à marche lente sont généralement constitués par un ou plusieurs anneaux concentriques sur les quels sont disposées des ailettes.

2. Les éoliennes rapides accouplées à des pompes à hélice ou a des pompes centrifuges

Les inconvénients qui viennent d'être signalés condamnent l'emploi de pompe à piston pour le pompage de grande puissance, sauf, si la hauteur de refoulement l'exige. On est alors conduit, suivant les débits et les hauteurs, à utiliser des pompes centrifuges ou des pompes à hélice. Ces pompes doivent tourner vite, d'où l'emploi d'éoliennes à grande vitesse spécifique, généralement avec multiplicateur. Le faible couple de démarrage des machines n'est pas un inconvénient grave, puisque le couple de démarrage des pompes rotatives est également faible [13] [24] [25] 26].

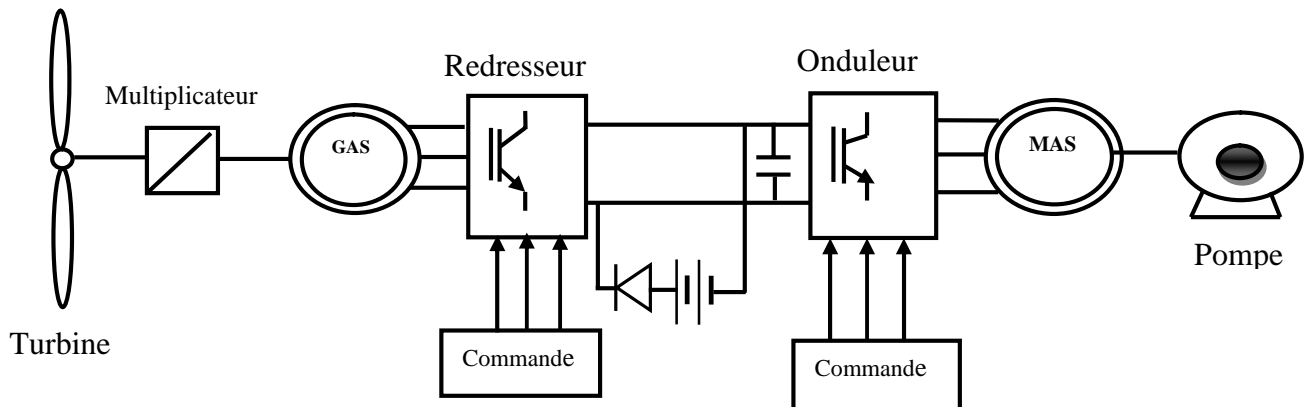
M. Guerri Wahiba a été l'auteur de la réhabilitation de l'éolienne de la station d'Adrar en janvier 2003. Il ya eu lieu du réglage du mat, la pose de l'armoire de contrôle, finalement un premier essai a été effectué avec la montée de l'eau grâce à l'énergie fournie par l'aérogénérateur [27].

A. Harrouz et al. 2014 ont employé le système de conversion d'énergie éolienne pour entrainer un générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) afin d'alimenter la charge d'isolement composé d'un moteur à courant continu commandé puis une pompe centrifuge. Afin de maximiser l'énergie extraite de l'énergie éolienne ils ont appliqué les stratégies dépistant le point de puissance maximal (MPPT), La commande MPPT appliquée pour les systèmes de pompage éolien basé sur la machine à courant continu est développée, ils ont essayé d'augmenter l'efficacité du système en utilisant la machine synchrone à aimants permanents qui est plus efficace comparé à la machine d'induction [28].

A. Kuma et al. 2015 ont employé deux sources d'énergie renouvelables, l'éolien et le photovoltaïque, pour pomper l'eau, ils ont intégré ces énergies à une barre omnibus, commun à courant continu utilisée pour conduire le moteur à induction commandé couplé à la pompe à eau. une batterie relié par le (CC-CC) bidirectionnel est aussi utilisée pour maintenir la barre omnibus C.C à la tension requise pendant les coupures, le système est simulé dans le Matlab-Simulink et ils ont trouvé des résultats pour différentes insolation et vitesses du vent [29].

L'ampleur de l'utilisation de l'énergie éolienne nous amène à étudier un système de pompage éolien d'eau composé d'un générateur asynchrone à cage et des convertisseurs

statiques couplés directement à un moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge. Finalement la structure à étudier est tel que montré sur la figure ci-dessous :



Cette structure est constitué d'une éolienne un multiplicateur une génératrice asynchrone un redresseur un onduleur une machine asynchrone une pompe ainsi un système de commande.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques définitions et généralités sur l'énergie éolienne, puis un bref aperçu sur les différents types d'éoliens et différents types de pompes. Aussi, nous avons cité quelques commandes et convertisseurs les plus utilisés.

Les machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique sont aussi présentés avec quelques spécifications propres liées aux structures d'alimentation différentes. Nous avons présenté aussi un état de l'art du pompage éolien.

Chapitre II

Modélisation des éléments du
système de pompage éolien

II.1. Introduction

La modélisation des éléments de la structure est une phase primordiale pour l'élaboration des lois de commande. En effet aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi des méthodes de modélisation adaptées à la commande. Aussi, l'établissement des diverses relations qui constituent le système est en vue de la commande de ce dernier, car la conception d'un système de commande en temps réel passe nécessairement par une étape de modélisation.

Dans ce chapitre nous ferons la modélisation de la turbine, du multiplicateur, de l'onduleur, du redresseur, du bus continu, de la pompe centrifuge, ainsi que de MAS.

II.2. Modèle du vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps $V = f(t)$.

Elle est modélisée par la somme d'une composante lente et une composante oscillante :

$$V = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t) \quad (\text{II. 1})$$

a_n, b_n : Coefficients de fourrier.

II.3. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure. II.1).

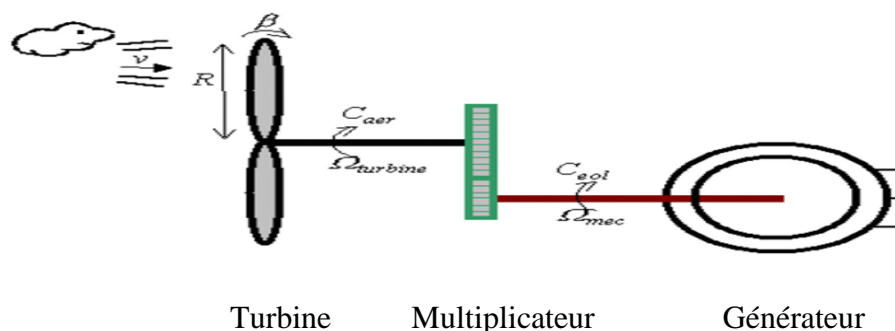


Figure.II.1 : schéma de la turbine éolienne.

La puissance cinétique du vent est donnée par :

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

La puissance $P_{\text{aéro}}$ captée par la turbine éolienne est alors liée à la puissance P_v par un coefficient, appelé coefficient de puissance, dont l'expression est donnée sous la forme suivante :

$$C_p = \frac{P_{\text{éol}}}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \quad (\text{II. 3})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique $C_{\text{aéro}}$ est donné par l'expression suivante :

$$C_{\text{éol}} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II. 4})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{\text{éol}} = C_p(\lambda) \cdot P_v = C_p(\lambda) \frac{\rho S v^3}{2} \quad (\text{II. 5})$$

- Ω_t est la vitesse de la turbine,

- ρ est la densité de l'air, $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$.

- S est l'aire balayée par la turbine, $S = \pi R^2$

- v est la vitesse du vent.

- C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine

II.4. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement sont négligés. Les pertes énergétiques dans cet organe sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Omega_{\text{Turbine}} = \frac{\Omega_{\text{génératrice}}}{G} \quad (\text{II. 6})$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{G\acute{e}n\acute{e}r\acute{a}t\acute{r}i\acute{c}e} = \frac{C_{T\acute{u}r\acute{b}i\acute{n}e}}{G} \quad (\text{II. 7})$$

II.5. 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 chaîne dans son ensemble [26]. L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine - génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t) \cdot \Omega_t \quad (\text{II. 8})$$

II.6. Modélisation de la machine asynchrone

Toute étude concernant la commande d'un processus doit être précédée par une étape de modélisation visant à l'établissement de son modèle. Cette modélisation est une aide intéressante pour élaborer certaines commandes [30]. Le modèle généralement retenu pour la machine asynchrone triphasée repose sur plusieurs hypothèses.

II.6.1. Hypothèses simplificatrices

- Entrefer constant et effet des encoches négligeables,
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- Circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté,
- Pertes ferromagnétiques négligeables,
- Influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas pris en compte.

II.6.2. Mise en équations du modèle de la machine asynchrone

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentées dans le schéma ci-dessous, ou les trois bobines rotoriques sont court-circuitées et déphasées de 120°.

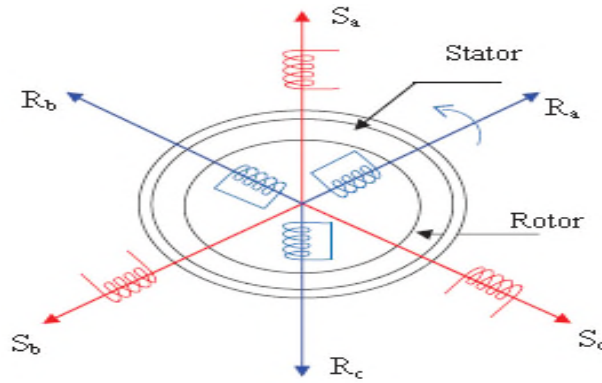


Figure. II.2 : Présentation des axes de la machine.

II.6.3. Équations générales d'une machine asynchrone

On considère que la machine est alimentée par un système de tensions sinusoïdales triphasés équilibrées (V_{as}, V_{bs}, V_{cs}) de pulsation ($\omega_s = 2\pi.f$).

Dans le cadre des hypothèses précédentes et pour une machine équilibrée et montée en étoile on distingue trois types d'équations qui définissent entièrement son comportement à savoir :

1. Les équations électriques.
2. Les équations magnétiques.
3. Les équations mécaniques.

- **Equations électriques**

Les tensions des trois phases statorique et rotorique s'écrivent :

A- Les équations liées au stator

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{as} = R_s i_{as} + \frac{d}{dt} \phi_{as} \\ V_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \phi_{bs} \\ V_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \phi_{cs} \end{array} \right. \quad (\text{II. 9})$$

Et sous forme matricielle, on obtient :

$$[V_{abc}]_s = [R_s] [i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]_s \quad (\text{II. 10})$$

Avec:

$$[V_{abc}]_s = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[I_{abc}]_s = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}]_s = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}$$

B- Les équations liées au rotor

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \phi_{ar} = 0 \\ V_{br} = R_r i_{br} + \frac{d}{dt} \phi_{br} = 0 \\ V_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \phi_{cr} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II. 11})$$

$$[V_{abc}]_r = [R_r] [i_{abc}]_r + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]_r = [0] \quad (\text{II. 12})$$

Avec:

$$[V_{abc}]_r = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[I_{abc}]_r = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad [\phi_{abc}]_r = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = R_s$$

$$R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r$$

R_s : résistance propre d'une phase statorique.

R_r : résistance propre d'une phase rotorique.

- **Equations magnétiques**

L'entrefer étant constant, le stator et le rotor étant triphasés et de construction symétrique, les inductances propres et mutuelles ente phases d'un même enroulement sont constantes et égaux. Les équations magnétiques s'écrivent alors de la même manière suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

Tel que : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \phi_r \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_{sr} & \cos \left(\theta_{sr} + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{sr} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_{sr} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_{sr} & \cos \left(\theta_{sr} + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_{sr} + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{sr} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_{sr} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

La dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

M_{sr} : représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle ente une bobine statorique et une bobine rotorique lorsque celles-ci sont en retard l'une de l'autre.

Finalement:

$$[V_{abc}]_s = [R_s][i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} \left([L_s][i_{abc}]_s + [M_{sr}][i_{abc}]_s \right) \quad (\text{II. 15})$$

$$[V_{abc}]_r = [R_r][i_{abc}]_r + \frac{d}{dt}([L_r][i_{abc}]_r + [M_{rs}][i_{abc}]_r) \quad (\text{II. 16})$$

L_s : inductance propre d'une phase statorique.

L_r : inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : inductance mutuelle entre deux phases de stator.

M_r : inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

θ_{sr} : écart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

- **Equation mécanique**

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

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J_m}(C_{em} - C_r - f_m\Omega_r) \quad (\text{II. 17})$$

J_m : moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

f_m : coefficient du frottement visqueux.

C_{em} : couple électromagnétique.

C_r : couple de charge.

Ω_r : vitesse rotorique du moteur.

II.6.4. Transformation de Park

L'objectif primordial de la transformée de Park est rendre le système (modèle de la machine) linéaire. On utilise alors cette transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Elle consiste à faire des projections sur deux axes orthogonaux de toutes les grandeurs du système. La condition qui permet de remplacer la machine triphasée par son modèle biphasé est sa symétrie [31].

La transformée de Park est définie comme la substitution de trois enroulements immobiles, dont les axes magnétiques (OA OB OC) sont décalés dans l'espace de 120° et alimentés par un système de courant triphasé, par deux enroulements orthogonaux (Od Oq), mobiles et alimentés par des courants constants. Dans les deux cas de figure on aura un champ magnétique tournant [32].

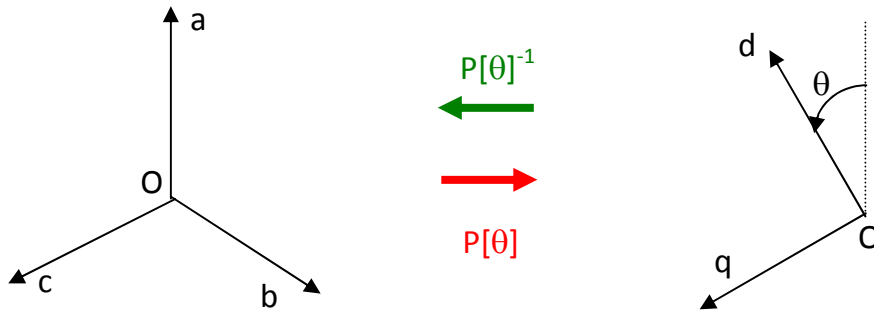


Figure. II.3 : Passage du système ABC au système dqo

Les matrices de Park et son inverse sont les suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

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

II.6.5. Application de la transformation de Park à la machine asynchrone

Dans ces conditions les différentes équations deviennent comme suit :

- **Equations électriques**

Le modèle mathématique exprimé dans le référentiel (d, q) tournant à la vitesse de synchronisme ω_s est :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \cdot \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \cdot \phi_{dr} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(II. 20)} \\ \text{(II. 21)} \\ \text{(II. 22)} \\ \text{(II. 23)} \end{array}$$

- **Equations magnétiques**

Les flux couplés d'axe (d, q) sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M_{sr} \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M_{sr} \cdot i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M_{sr} \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M_{sr} \cdot i_{qs} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(II. 24)} \\ \text{(II. 25)} \\ \text{(II. 26)} \\ \text{(II. 27)} \end{array}$$

II.6.6. Expression du couple électromagnétique

L'expression scalaire du couple électromagnétique est la suivante :

$$C_{em} = p * (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad \text{(II. 28)}$$

II.6.7. Résultat de simulation de la machine asynchrone

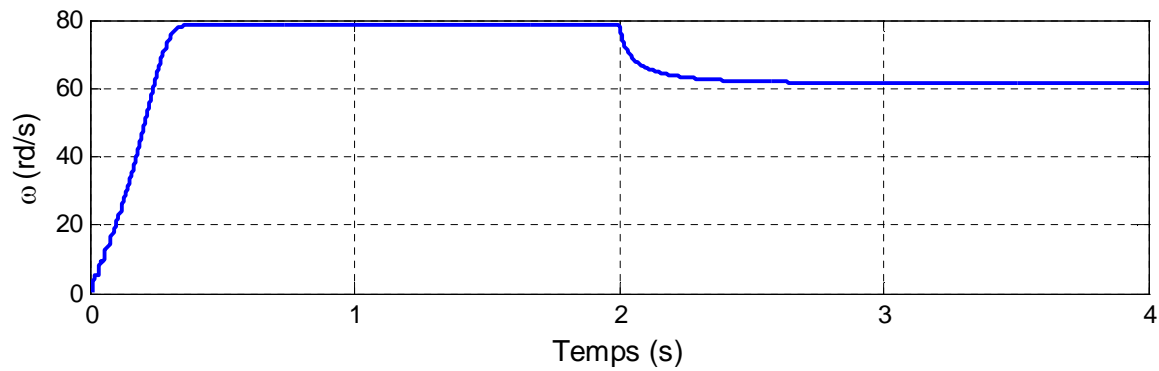


Figure. II.4: Allure de la vitesse.

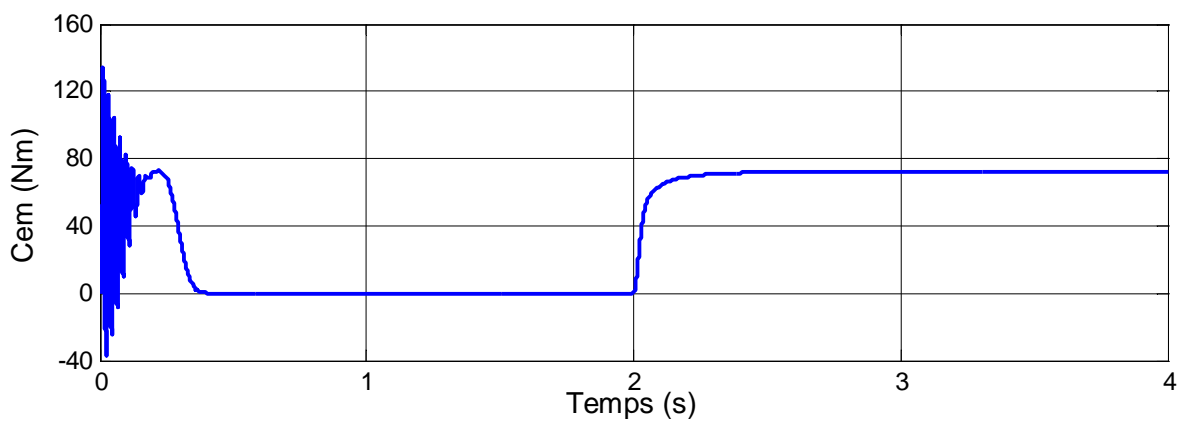


Figure. II.5 : Allure de couple électromagnétique.

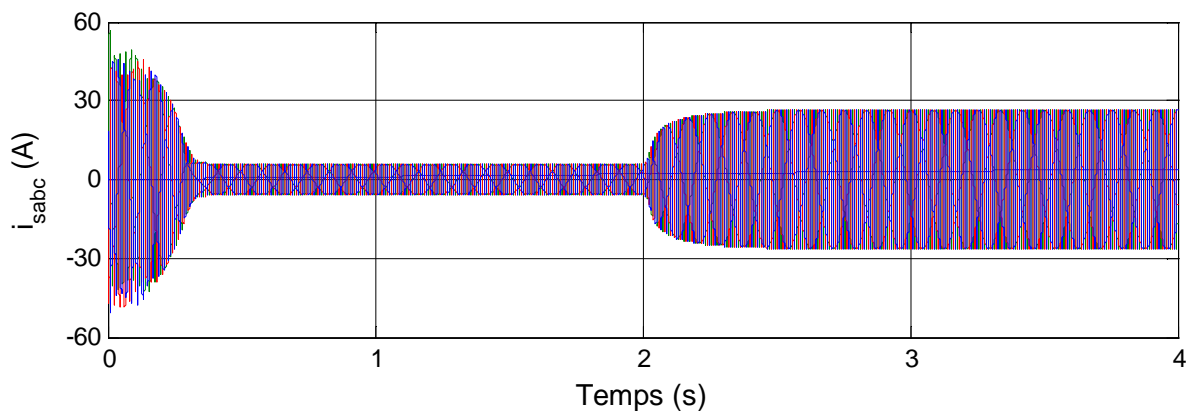


Figure. II.6.A : Les courants statoriques du moteur asynchrone.

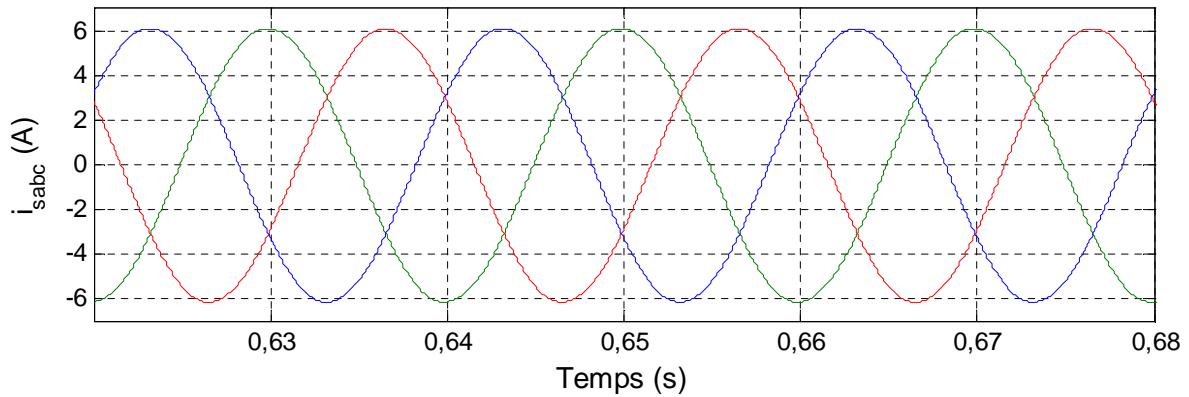


Figure. II.6.B : Zoom sur l'allure des courants statoriques.

Analyse des résultats

- Nous avons simulé le fonctionnement de la MAS à cage directement par une source (220/380V), sans application du couple de charge, puis à l'instant ($t=2s$) on a appliqué un couple résistant ($C_r=72 \text{ N.m}$).

L'examen des courbes montre :

- Pendant le régime transitoire, la vitesse est légèrement pulsatoire, présentant aux premiers instants des ondulations puis se stabilise à la valeur (78.5 rd/s), et à partir de l'instant $t=2s$ après l'introduction du couple résistant la vitesse diminue jusqu'à atteindre (62 rd/s).

- L'allure de la courbe du couple électromagnétique présente au démarrage des ondulations importantes dans un intervalle de temps court, puis se stabilise à zéro puisque la machine est à vide jusqu'à l'instant $t=2s$ ou on remarque l'augmentation de ce couple jusqu'à atteindre (72 N.m).

- Pour les courants statoriques on remarque des transitions au début qui dépassent la valeur nominale du courant, sachant qu'au démarrage les MAS ont besoin à un grand courant. Puis ils se stabilisent à la valeur nominale, en appliquant le couple résistant, la MAS appelle un courant plus élevé.

II.7. Modèles des convertisseurs de puissance

II.7.1. Modélisation de l'onduleur

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 une impédance interne négligeable. A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II. 7), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier

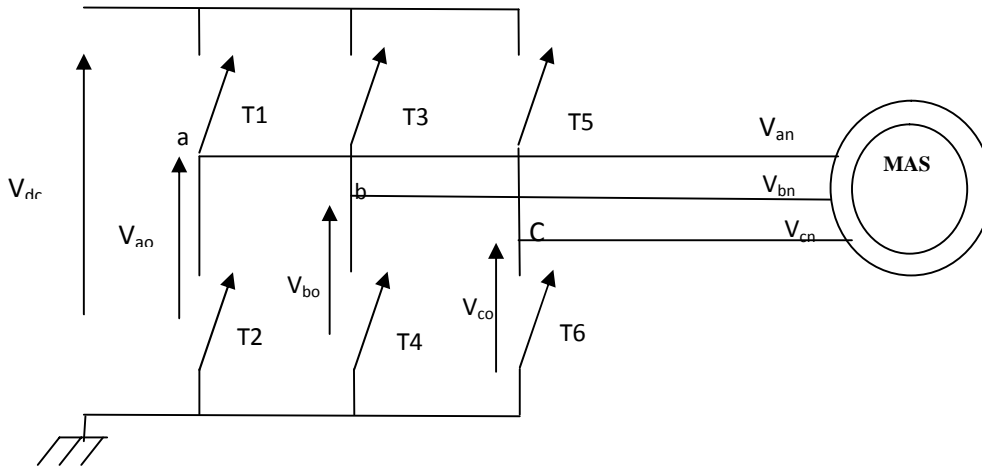


Figure. II.7 : Circuit de l'onduleur relié à la machine.

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point « o » comme référence pour ces dernières tensions.

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur.

Donc les tensions à la sortie de l'onduleur sont :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 29})$$

S_i est l'état de l'interrupteur T_i tel que :

$$\begin{cases} S_i = 1 & T_i \text{ fermé} \\ S_i = 0 & T_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$i_{dc} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (\text{II. 30})$$

II.7.2. Modélisation de redresseur

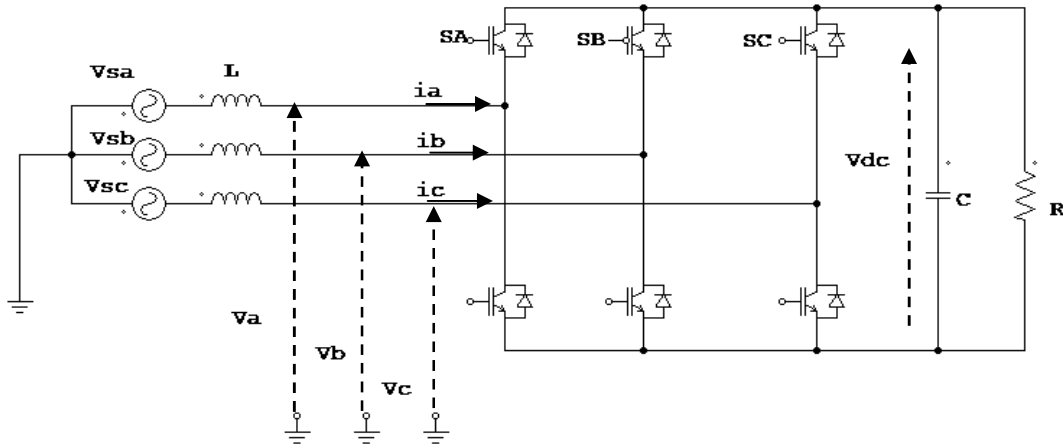


Figure. II.8 : Circuit du redresseur MLI.

La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant.

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors bipolaires antiparallèles avec des diodes (figure. 8). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0' la tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice-redresseur- charge et onduleur), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties : le coté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le coté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le coté alternatif et le bus continu.

La figure (II. 8) donne le schéma de principe du redresseur de tension triphasé alimentant le bus continu. Ce bus est entièrement géré par le redresseur, la valeur de la

capacité de filtrage doit être suffisante afin d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de la génératrice asynchrone [3] [33][34].

Les équations décrivant le coté alternatif sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

A l'entrée du redresseur, les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_A - V_B \\ U_{BC} = V_B - V_C \\ U_{CA} = V_C - V_A \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 33})$$

$$i_{dc} = S_A i_a + S_B i_b + S_C i_c \quad (\text{II. 34})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressée.

S_A, S_B, S_C : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.8. Modélisation du bus continu

Le bus continu 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 9).

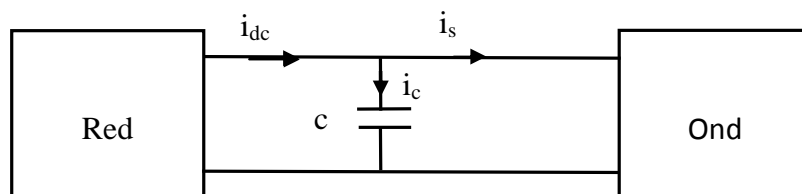


Figure. II.9 : Schéma simple du circuit du bus continu.

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

$$\frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{c} \cdot i_c(t) \quad (\text{II. 35})$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur (figure 10):

$$i_c = i_{dc} - i_s \quad (\text{II. 36})$$

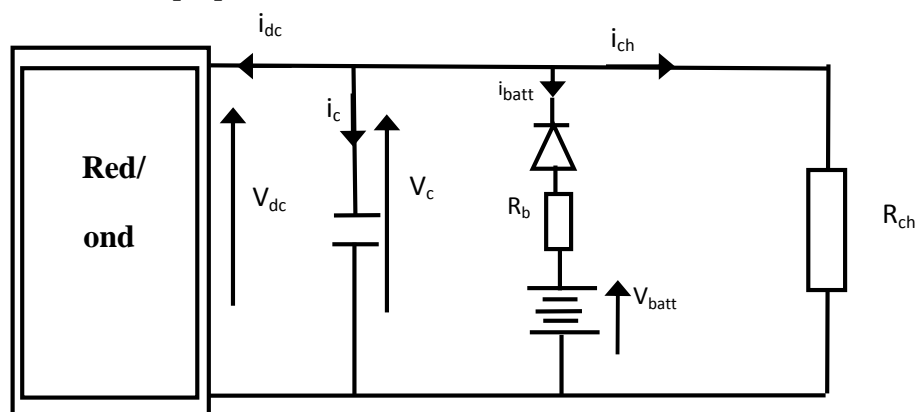
On a également :

$$V_{dc} = \int \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc}(t_0) \quad (\text{II. 37})$$

Où $u_{dc}(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant initial t_0 .

II.9. Modèle mathématique du dispositif d'auto-amorçage

Le système ne peut s'amorcer seul puisqu'à l'instant de la mise sous tension, aucune énergie réactive n'est disponible. On utilise alors la réversibilité du convertisseur en connectant une batterie du côté continu qui fournit le réactif durant la phase d'amorçage. Une diode découple la batterie du redresseur dès que la tension générée en sortie du redresseur est supérieure à celle côté batterie [35].

**Figure. II.10 :** Auto-amorçage par un convertisseur à MLI.

Outre le modèle de la machine et celui du redresseur à MLI supposé composé d'interrupteurs parfaits, il faut introduire les équations du circuit électrique à la sortie du redresseur. Deux cas de figure sont à considérer :

- Lorsque $V_{dc} < V_{batt}$ la diode est passante, on peut écrire les équations suivantes:

$$i_{dc} = i_c + i_{batt} + i_{ch} \quad (\text{II. 38})$$

$$\Rightarrow i_{dc} = \frac{V_{batt} - V_{dc}}{R_b} - C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II. 39})$$

$$\Rightarrow \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + V_{dc} \left(\frac{1}{R_{ch}} + \frac{1}{R_b} \right) - \frac{V_{batt}}{R_b} \right] \quad (\text{II. 40})$$

Par conséquent, la tension redressée V_{dc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + V_{dc} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_b} \right) - \frac{V_{batt}}{R_b} \right] \quad (\text{II. 41})$$

- Lorsque $V_{dc} > V_{batt}$ la diode se bloque:

$$i_{dc} = -i_c - i_{ch} \quad (\text{II. 42})$$

$$\Rightarrow i_{dc} = -C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (\text{II. 43})$$

$$\Rightarrow \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \right] \quad (\text{II. 44})$$

Dans ce cas, la tension redressée V_{dc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \right] \quad (\text{II. 45})$$

Avec :

R_{ch} : Représente la résistance vue du côté continu.

R_b : La résistance interne de la batterie.

V_{batt} : Tension aux bornes de la batterie.

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

i_c : Courant dans la capacité.

i_{ch} : Courant dans la charge résistive.

II.10. Modélisation de pompe centrifuge :

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant de ventilation, variant avec le carré de vitesse :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (\text{II. 46})$$

Avec:

$$K_r = P_n / \omega_n^3$$

Où : P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (w)

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

K_r : Constante qui dépend de la pompe.

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée comme suit :

$$P_{hy} = \rho \cdot H \cdot g \cdot Q \quad (\text{II. 47})$$

Avec :

P_{hy} : la puissance hydraulique (w).

ρ : Masse volumique d'eau (1000Kg /s²)

g : Accélération de la pesanteur (9.81m /s²)

H : Hauteur manométrique (m)

Q : Débit volumique (m³/s)

D'où la puissance mécanique est :

$$P_{méc} = P_{hy} \cdot \eta_{pm} \quad (\text{II. 48})$$

Avec :

$P_{méc}$: puissance mécanique (w)

η_{pm} : Rendement globale du groupe moteur pompe (%)

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents composants du système de pompage éolien, aussi leur modélisation, afin de faciliter l'accès à la simulation du système qui se fera dans les chapitres suivants. Finalement nous avons simulé la MAS alimentée par une source (220/380 v).

Chapitre III

Commande vectorielle de la
génératrice asynchrone autonome

III.1. Commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante ou il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple [37].

III.1.1. Types de commande vectorielle

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones dans les applications de l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse [36] [37].

On cite deux méthodes de commande vectorielle :

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte.

III.1.1.1. Commande vectorielle directe

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des 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 soit:

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...).

Remarque :

Cette commande n'est donc pas optimale.

III.1.1.2. Commande vectorielle indirect

A cause des inconvénients vus dans la précédente commande, la commande vectorielle indirecte est considérée comme la plus pratique.

Dans cette commande, les courants rotorique sont estimés à 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.2. Contrôle de la machine asynchrone

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 transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations... 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 courants et donc du couple, puisque l'on a vu que le couple pouvait s'écrire directement en fonction des courants:

$$C_e = p * M (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}). \quad (\text{III. 1})$$

Une fois que l'on maîtrise 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 apparaît 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 vient 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 par orientation du flux rotorique

Nous avons vu dans le chapitre précédent que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère (dq) comme un produit croisé de courants ou de flux.

Nous prenons l'écriture :

$$C_e = p^* \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}). \quad (\text{III. 2})$$

On remarque que si l'on élimine le deuxième produit ($\phi_{qr} \cdot i_{ds}$), alors le couple ressemblerait fort à celui d'une machine à courant continu, pour ce, il suffit d'orienter le repère dq 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 directe(d), donc avoir :

$$\phi_{qr} = 0 ; \phi_{dr} = \phi_r.$$

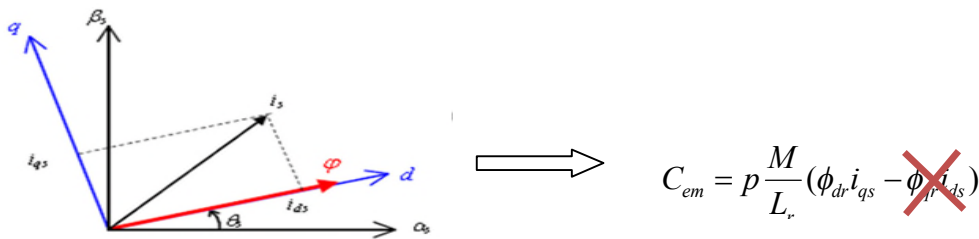


Figure. III.1 : Principe du contrôle vectoriel.

$$\text{Le couple s'écrit alors : } C_e = p^* \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot i_{qs} \quad \Rightarrow \quad i_{qs} = \frac{L_r \cdot C_e}{p \cdot M \cdot \phi_{dr}} \quad (\text{III. 3})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{III. 4})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{III. 5})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{dr} = \phi_r = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \end{array} \right. \quad (\text{III. 6})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{qr} = 0 = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{III. 7})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{III. 8})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \end{array} \right. \quad (\text{III. 9})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{III. 10})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = R_r \cdot i_{qr} + \omega_r \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{III. 11})$$

A partir de l'équation (III. 7), On tire l'équation de i_{qr} :

$$i_{qr} = -\frac{M}{L_r} i_{qs} \quad (\text{III. 12})$$

A partir de l'équation (III. 11), On tire l'équation de ω_r :

$$\omega_r = -\frac{R}{\phi_{dr}} i_{qr} \quad (\text{III. 13})$$

A partir de l'équation (III. 10), On tire l'équation de i_{dr} :

$$i_{dr} = -\frac{1}{R} \frac{d}{dt} \phi_{dr} \quad \text{après la T.L} \quad \Leftrightarrow \quad i_{dr} = -\frac{1}{R} \cdot S \cdot \phi_{dr} \quad (\text{III. 14})$$

En remplaçant i_{dr} dans (III. 6) on obtient : $\phi_r = \frac{M}{1 + \frac{L_r}{R}} i_{ds}$ (III. 15)

$$\Leftrightarrow \quad i_{ds} = \frac{1 + T_r \cdot S}{M} \cdot \phi_r \quad (\text{III. 16})$$

Avec : $T_r = \frac{L_r}{R}$, la constante de temps rotorique

S : la variable de la transformée de Laplace

Donc on doit agir sur i_{qs} pour régler le couple et sur la composante i_{ds} pour régler le flux. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine courant continu.

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter sa vitesse on impose i_{qs}^* positif. Le régulateur du courant i_{qs} imposera ce courant.

- **Le régulateur de vitesse**

Il prend en entrée la vitesse de référence et la vitesse mesurée, il agit sur le couple (c'est-à-dire sa sortie est le couple de référence) pour réguler la vitesse.

- **Le régulateur de flux**

Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé et agit sur i_{ds}^*

$$\phi_r = \frac{M}{1+S.T_r} i_{ds} \Rightarrow i_{ds}^* = \frac{1+S.T_r}{M} \phi_r \quad (\text{III. 17})$$

- **Le régulateur du couple**

Il prend en entrée le couple et ϕ_{ref} , pour réguler i_{qs}^*

$$T_e = \frac{p.M}{L_r} \phi_{dr} i_{qs} \Rightarrow i_{qs}^* = \frac{L_r.T_e}{p.M.\phi_{dr}} \quad (\text{III. 18})$$

III.4. Résultats de simulation de la commande vectorielle :

Le système de production d'énergie éolienne, constitué d'une génératrice asynchrone à cage et d'un redresseur commandé est simulé en appliquant une variation en échelon de la vitesse mécanique dont le profil est présenté sur la figure (III. 2). La commande vectorielle est appliquée à la machine, les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (III.3-8)

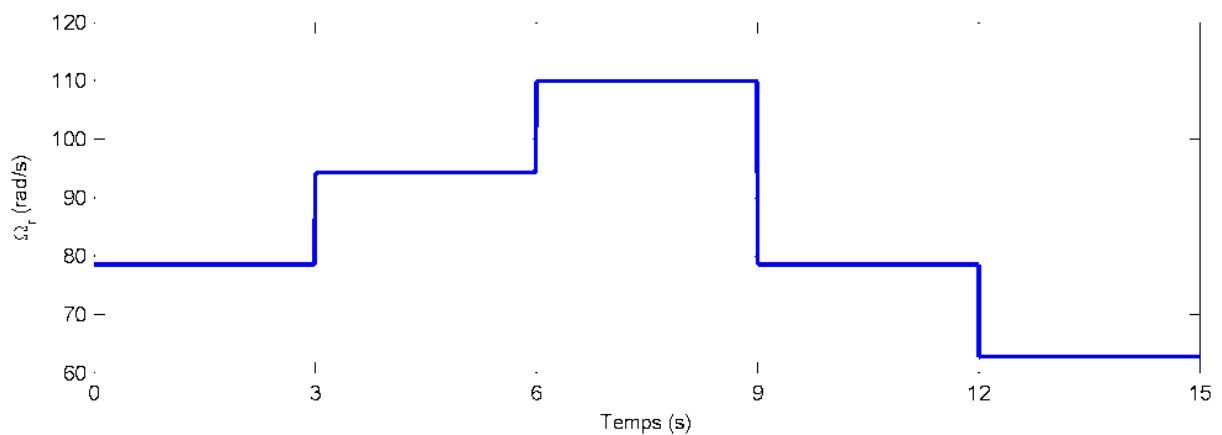


Figure. III.2 : Allure de la vitesse de l'arbre du rotor Ω_r (rad/s).

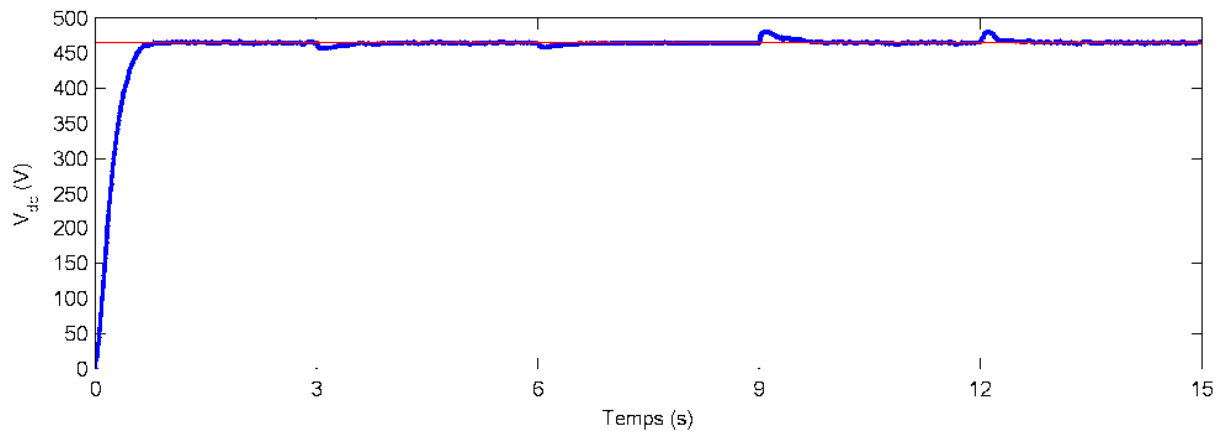


Figure. III. 3 : Allure de la tension V_{dc} .

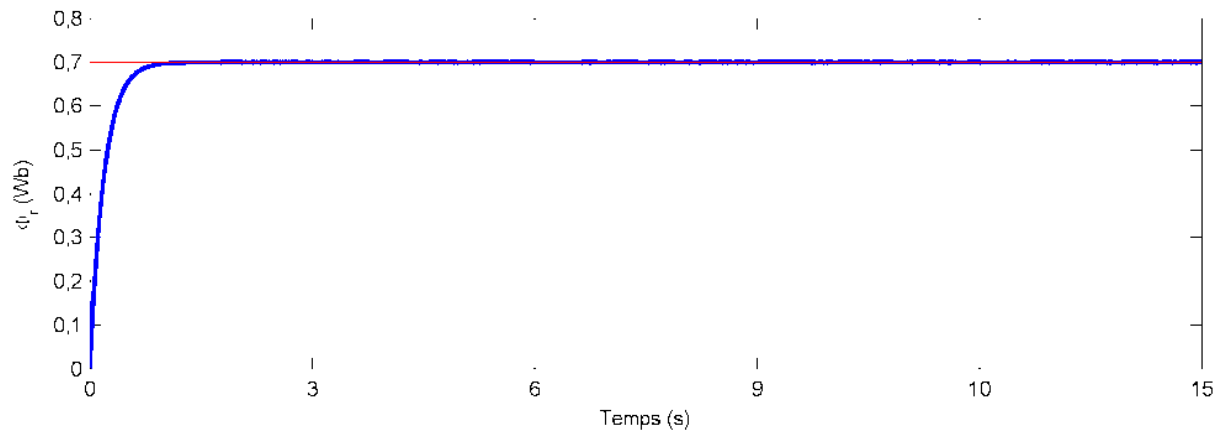


Figure. III.4 : Allure du flux rotorique.

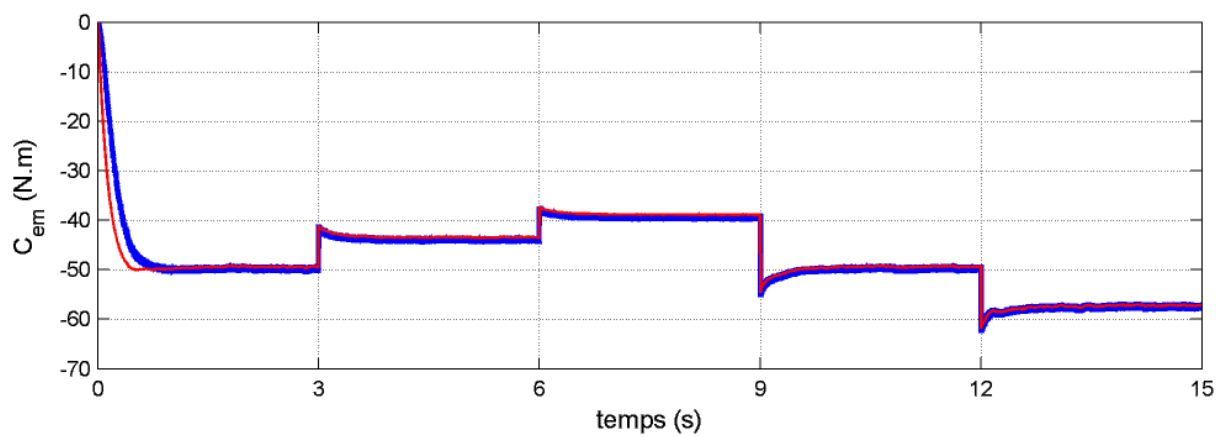


Figure. III.5 : Allure du couple C_{em-ref} (rouge) et du C_r (bleu).

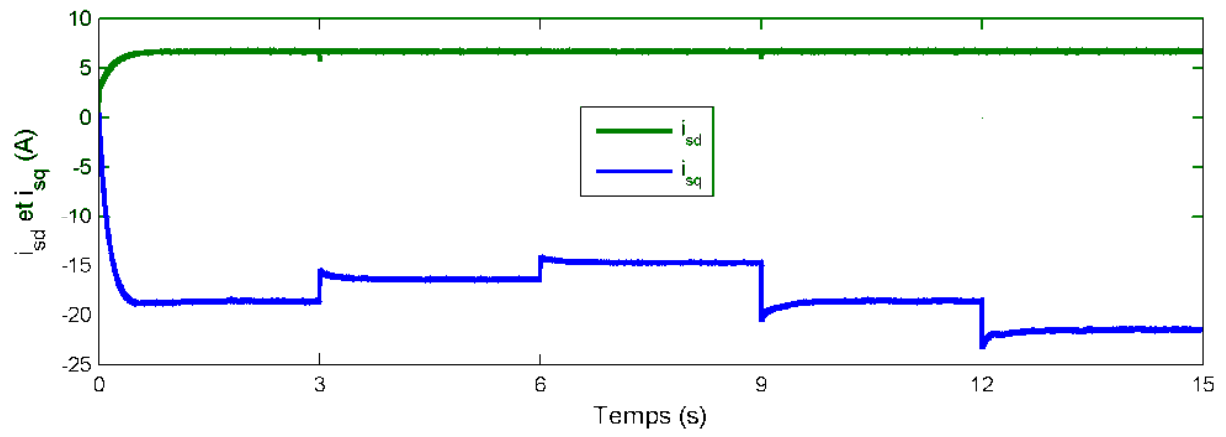


Figure. III.6 : Allure du courant i_{sd} et i_{sq}

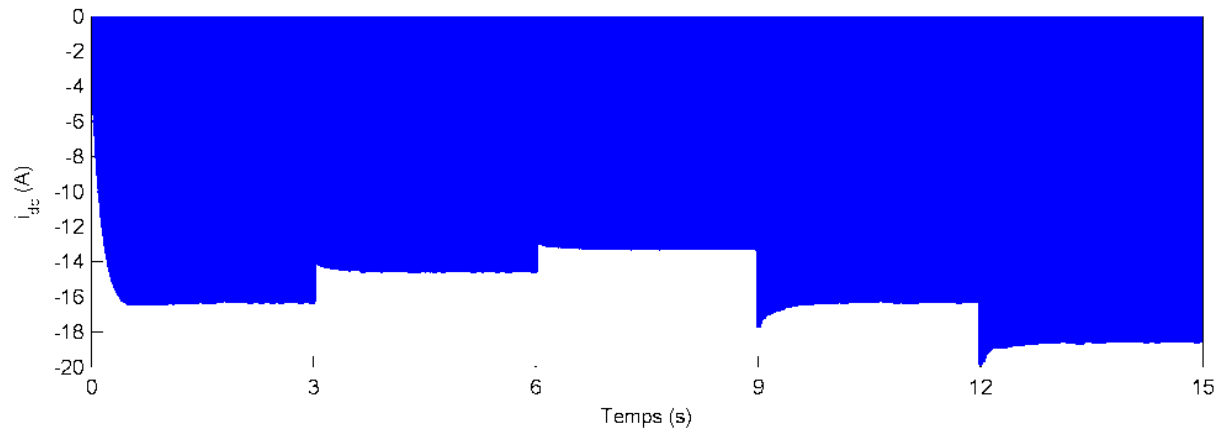


Figure. III.7 : Allure du courant i_{dc} .

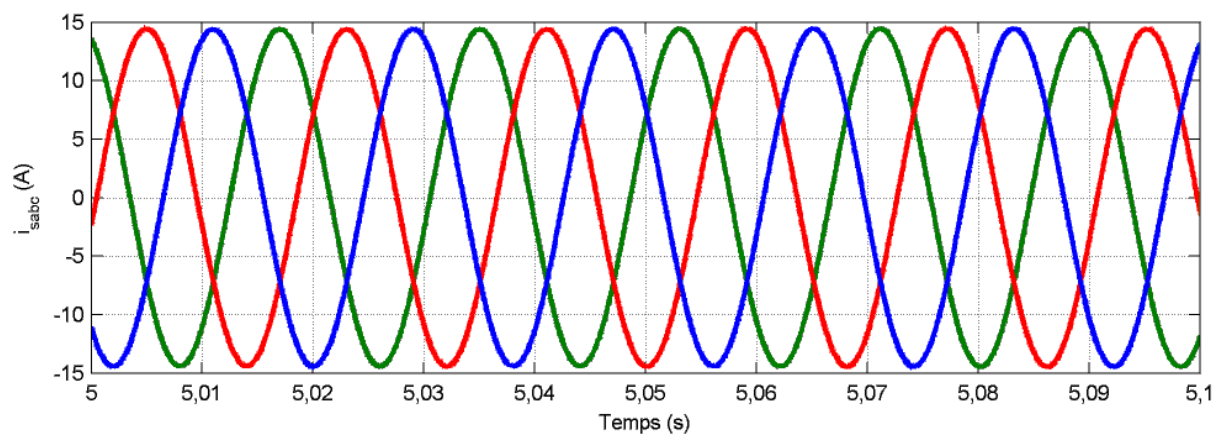


Figure. III.8 : Zoom sur l'allure des courants statoriques.

- **Interprétation des résultats :**

La figure (III. 3) illustre l'allure de la tension redressée V_{dc} , il apparaît que V_{dc} est bien régulée à sa valeur de référence de 465V même lors de variation de la vitesse d'entraînement de la GAS.

La figure (III. 4) présente la courbe du flux rotorique de la génératrice asynchrone à cage, on voit bien que le flux rotorique suit sa référence de (0.7Wb).

La figure (III. 5) illustre l'allure du couple électromagnétique (C_{em}), on remarque que le couple (C_{em}) suit bien sa référence et il est de signe négatif, cela reflète que la puissance est générée ce qui correspond le fonctionnement en mode générateur de la machine asynchrone.

La figure (III. 6) montre les allures des courant direct i_{ds} et en quadrature i_{qs} . Les deux courants sont régulés indépendamment l'un de l'autre (le découplage de la GAS est respecté). L'évolution du courant i_{sd} est similaire à celle du flux, et l'évolution du courant i_{sq} est similaire à celle du couple.

La figure (III. 7) montre que le courant i_{dc} est négatif, ce qui est logique puisque c'est un courant généré.

La figure (III. 8) montre un zoom des allures temporelles des courants, ces derniers sont évidemment parfaitement sinusoïdaux.

III.6. Conclusion

Dans ce 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. A la fin de ce chapitre, une simulation sous l'environnement Matlab-Simulink, a été réalisés et les résultats obtenus montrant le découplage effectué.

Chapitre IV

Contrôle du système de pompage

IV.1. Introduction

Le développement de l'informatique industrielle et l'automatique appliquée aux systèmes de conversion électrique met à notre disposition des moyens qui permettent d'implanter des lois de commande (de position, de vitesse et de couple) de plus en plus performantes et robustes pour les machines électriques. Ces lois de commandes sont traditionnellement conçues sur la base de boucles imbriquées (asservissement en cascade) [38].

Le contrôle des systèmes de pompage a pour but d'améliorer leurs performances et d'augmenter la quantité d'eau pompé. Donc le contrôle de la vitesse de rotation de la machine est nécessaire à chaque instant [39].

Le mode de glissement est un mode de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. Dans ce chapitre, nous nous proposons d'appliquer une commande vectorielle au réglage de vitesse de la machine asynchrone à cage avec deux stratégies de réglage. La première stratégie est basé sur des régulateurs classique de type PI et la seconde est basé sur des régulateurs issus de la technique par mode glissant.

IV.2. Historique de la commande par mode glissant

La commande par mode glissants est une commande à structure variable. Les premiers travaux sur ce type de commande ont été menés dans l'ancienne U.R.S.S à partir des années 60. Elle est basée essentiellement sur la résolution des équations différentielles à seconde membre discontinu, initiée par le mathématicien soviétique A.G. Filippov. Le véritable essor de l'utilisation de cette technique date de la parution des livres d'Itkis et d'Utkin [40]. Ensuite, les travaux ont été repris aux Etats-Unis par Slotine et au Japon par Young, Ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par mode glissement des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes nom linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis [42].

IV.3. Conception de la commande par mode de glissement

La technique de la commande par mode glissant (MG) consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes (Figure IV.1)

- **Le mode de convergence (MC)**: durant le quel la variable à réguler se déplace à partir du point d'équilibre initial et tend vers la surface de commutation $S(x) = 0$ caractérisé par le critère de convergence.
- **Le mode de glissement (MG)**: durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement caractérisé par le choix de la surface de glissement.
- **Le mode de régime permanent (MRP)** : il est nécessaire pour l'étude de comportement du système autour du point d'équilibre.

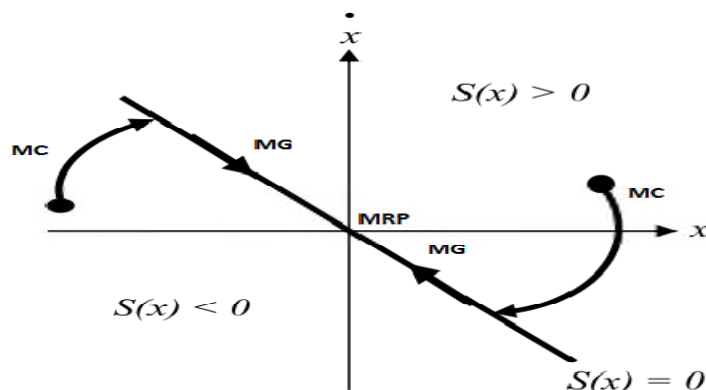


Figure. IV.1 : Différent modes pour la trajectoire.

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et les performances désirées d'une façon systématique (régulation, poursuite de trajectoires et poursuite de modèles). La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes [38] :

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence
- La détermination de la loi de commande.

IV.3.1. Le choix de la surface de glissement

On considère le modèle d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ X \end{bmatrix} = [A][X] + [B][U] \quad (\text{IV.1})$$

Où $[X]$ est le vecteur d'état, $[U] \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande, avec $n > m$ généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande [41]. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x^* , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante [42] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{IV. 2})$$

Avec :

λ : gain positif.

$e(x) = x^* - x$: écart de la variable à réguler.

r : degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois

qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande, tel que : $\frac{ds}{dx} \neq 0$ assurant la contrôlabilité.

$S(x)$: est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c'est l'objectif de la commande.

IV.3.2. Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

La deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer ($S=0$). Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que S soit attractif. Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante :

$$V(s) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{IV. 3})$$

Pour qu'une variable de glissement $s(x, t)$ tende vers 0 est que la dérivée temporelle de V soit définie négative :

$$\dot{S} \cdot S < 0 \quad (\text{IV. 4})$$

Si la condition (IV. 4) est vérifiée, alors la variable de glissement et sa dérivée sont de signe contraire quel que soit le temps et que 0 est un centre attracteur pour S .

Le temps de convergence, ou le temps d'atteinte « reaching time » t_r dépend directement du choix de S .

Pour une convergence en temps fini, la condition (IV. 4) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité et donnée par :

$$\dot{S} \cdot S \leq -\eta |s|, \quad \eta > 0 \quad (\text{IV. 5})$$

IV.3.3. Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la condition nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. La méthode choisie est celle de la commande équivalente, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est composée de deux thèmes U_{eq} et U_d :

$$U = U_{eq} + U_d \quad \text{avec} \quad U_d = -k \text{sign}(s) \quad (\text{IV. 6})$$

k est une constante positive, sign est la fonction signe et U_d est la commande discontinue

$$\text{Sign}(s) = \begin{cases} +1 & \text{si } s > 0 \\ 0 & \text{si } s = 0 \\ -1 & \text{si } s < 0 \end{cases} \quad (\text{IV. 7})$$

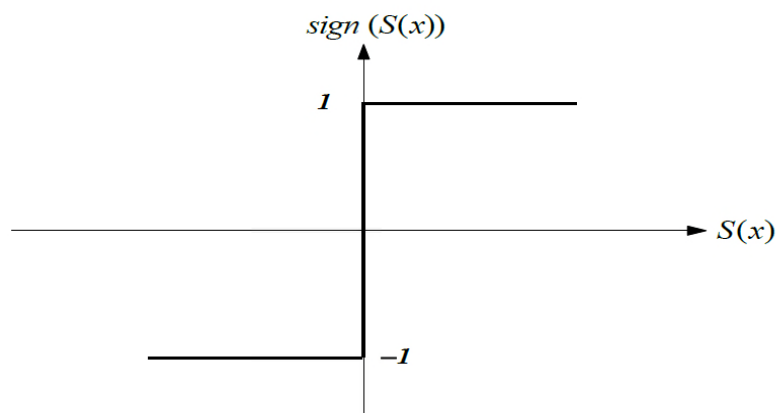


Figure. IV.2 : Fonction *sign* (non linéarité tout ou rien).

La commande discrète est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

IV.4. Les avantages et les inconvénients de la commande par mode glissant

- **Les avantages [38]**

Cette commande présente les caractéristiques suivantes :

- La réponse du système est robuste et insensible aux variations de certains paramètres et aux effets de perturbation de la charge.
- Il suffit de fixer une bonne valeur de k , ce qui simplifie le réglage.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.

- **Les inconvénients [42]**

Dans la pratique, un régime glissant idéal n'existe pas, car la fréquence de commutation des organes de commande a une limite finie. Autrement dit, il n'existe aucun organe de commutation pouvant commuter à une fréquence infinie (en effet, cet organe devrait délivrer une énergie infinie). Le caractère discontinu de la commande engendre un comportement dynamique particulier autour d'une couche limite de la surface de glissement qui est communément appelé Phénomène de broutement (chattering) comme le montre la figure ci-dessous.

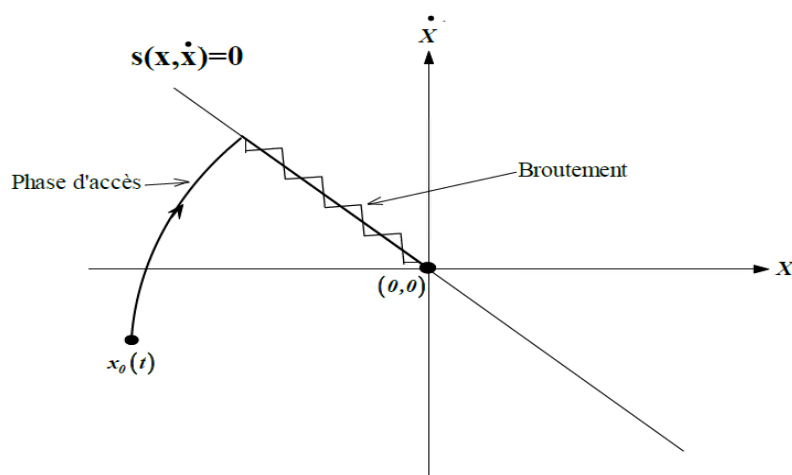


Figure. IV.3 : Phénomène de broutement.

Le broutement peut être réduit (ou éliminé) en remplaçant la fonction *sign* par une fonction de saturation adéquate qui filtre ces hautes fréquences. On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation (figure IV.4).

$$\begin{cases} Sat(S(x)) = 1 & \text{si } S(x) \geq \xi \\ Sat(S(x)) = -1 & \text{si } S(x) < -\xi \end{cases} \quad (\text{IV. 8})$$

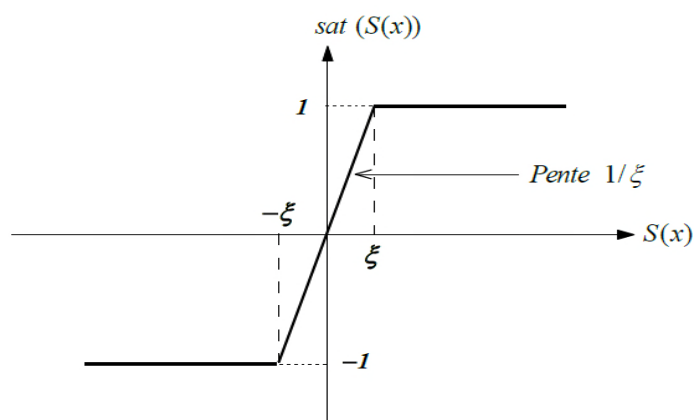


Figure. IV.4 : Fonction de saturation.

IV.5. Application de la commande

IV.5.1. La surface de régulation de flux rotorique

En remplaçant l'équation (III. 12) dans l'équation (III. 6) de chapitre (III), on trouve :

$$\dot{\phi}_r = \frac{\phi_r^*}{T_r} - \frac{M}{T_r} i_{ds} \quad (\text{IV. 9})$$

La surface de régulation de flux est de la forme suivante :

$$S(\phi_r) = \phi_r^* - \phi_r \quad (\text{IV. 10})$$

$$\dot{S}(\phi_r) = \dot{\phi}_r^* - \frac{1}{T_r} \phi_r^* + \frac{M}{T_r} i_{ds} \quad (\text{IV. 11})$$

$$S(\phi_r) \sin g(S(\phi_r)) \leq -\eta \quad (\text{IV. 12})$$

$$\dot{\phi}_r^* - \frac{1}{T_r} \phi_r^* + \frac{M}{T_r} i_{ds} \leq -\eta \sin g(S(\phi_r)) \quad (\text{IV. 13})$$

$$\Rightarrow i_{ds} = -\frac{T_r}{M} \dot{\phi}_r^* + \frac{1}{M} \phi_r^* - K \sin g(S(\phi_r)) \quad (\text{IV. 14})$$

$$\text{Avec : } K = \frac{T_r \eta}{M}$$

IV.5.2. La surface de régulation de la vitesse

La surface de régulation de la vitesse est de la forme suivante :

$$S(\Omega) = \Omega - \Omega^* \quad (IV. 15)$$

$$\Omega = \text{Cst} \quad \Longrightarrow \quad \dot{\Omega} = 0$$

On remplace l'équation (II. 17) de chapitre II, dans l'équation (IV. 15), on trouve

$$S(\Omega) = -\frac{1}{J} p \frac{M}{L_r} \phi_r i_{sq} + C_r \quad (IV. 16)$$

$$S(\Omega) \text{ sign}(S(\Omega)) \leq -\eta_\Omega \quad (IV. 17)$$

$$\left(-\frac{1}{J} p \frac{M}{L_r} \phi_r i_{sq} + C_r\right) \leq -\eta_s \text{ sign}(S(\Omega)) \quad (IV. 18)$$

$$\Longrightarrow i_{sq}^* = \left(-\frac{J L_r}{\phi_r M p} C_r\right) + K' \text{ sign}(S(\Omega)) \quad (IV. 19)$$

$$\text{Avec : } K' = \frac{\eta_\Omega J L_r}{\phi_r M p}$$

III.6. Résultats de simulation du système de pompage:

Le système de pompage, constitué d'un onduleur de tension et d'un groupe motopompe (moteur asynchrone à cage et pompe centrifuge) est simulé indépendamment du système de production. L'objectif de cette simulation est de comparer les résultats de simulations avec les deux types de commandes (commande vectorielle classique et réglage par mode glissant). En appliquant une variation aléatoire de la puissance éolienne, dont le profil est présenté sur la figure (III.5), les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures (III.6-13)

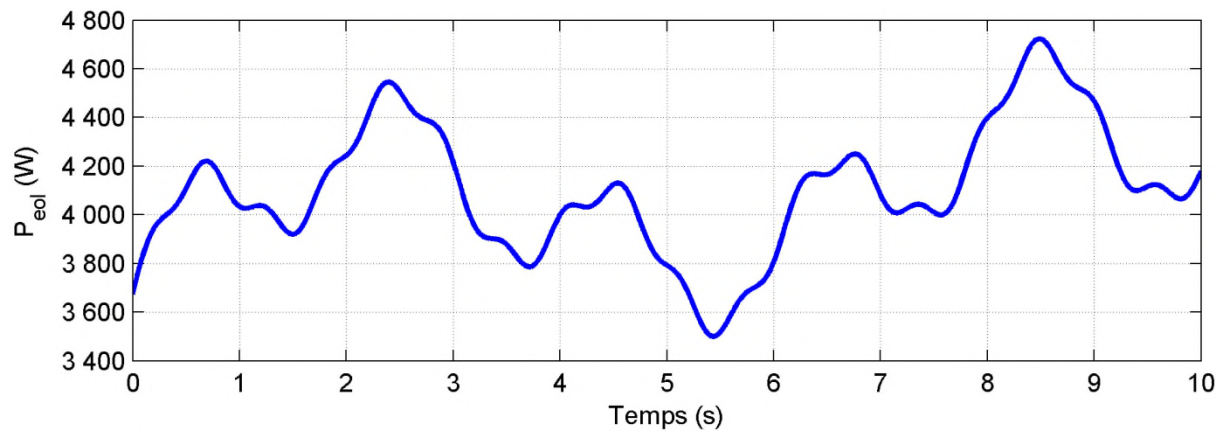


Figure. IV.5 : Allure de la puissance éolienne.

IV.6.1. Résultats de simulation de la commande vectorielle avec des régulateurs PI classiques :

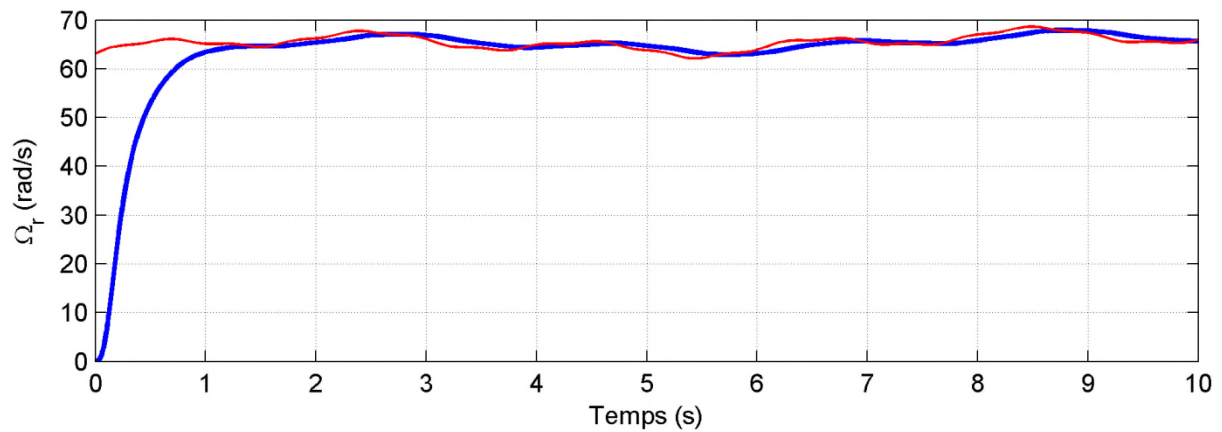


Figure. IV.6 : Allure de la vitesse de l'arbre du rotor Ω (tr/min).

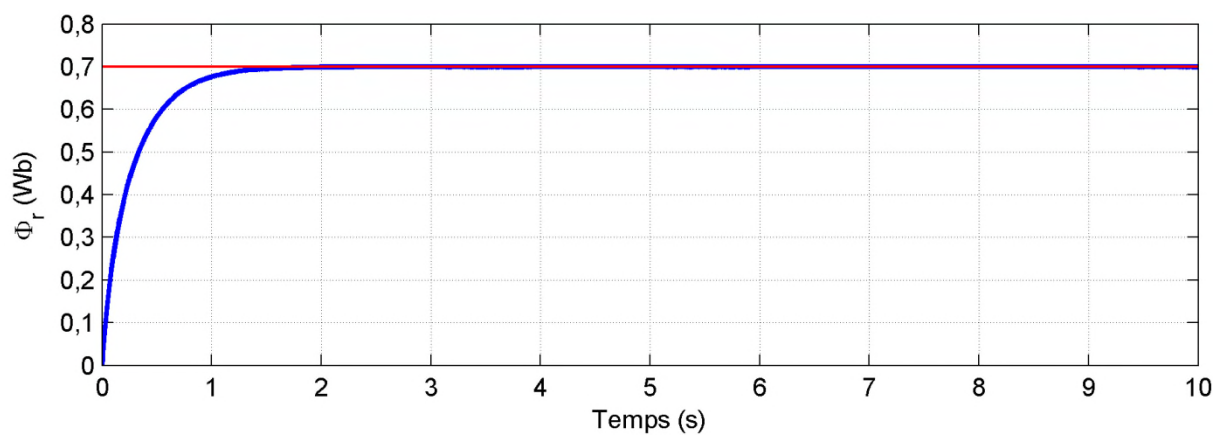


Figure. IV.7 : Allure du flux de rotorique Φ (wb).

IV.6.2. Résultats de simulation de la commande vectorielle avec des régulateurs par mode glissant :

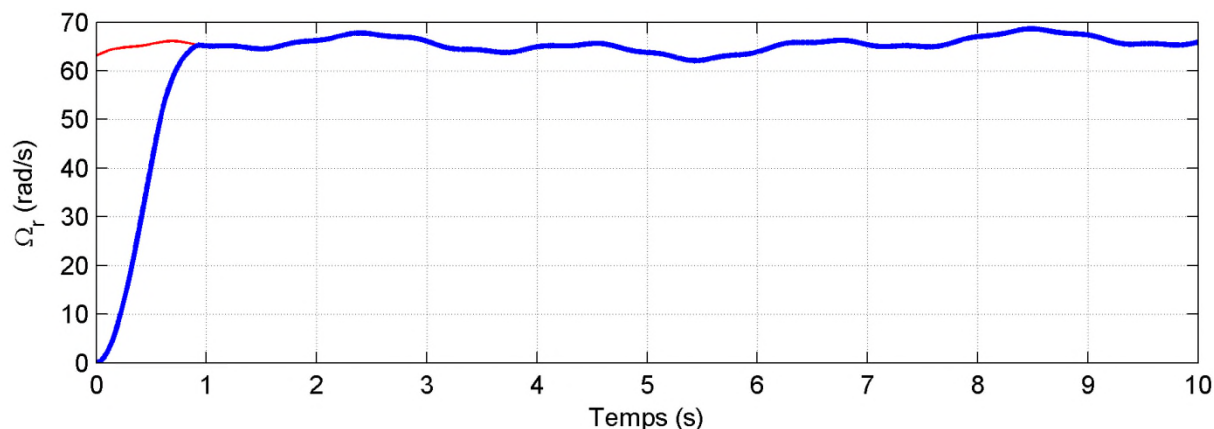


Figure. IV.8 : Allure de la vitesse Ω (tr / min).

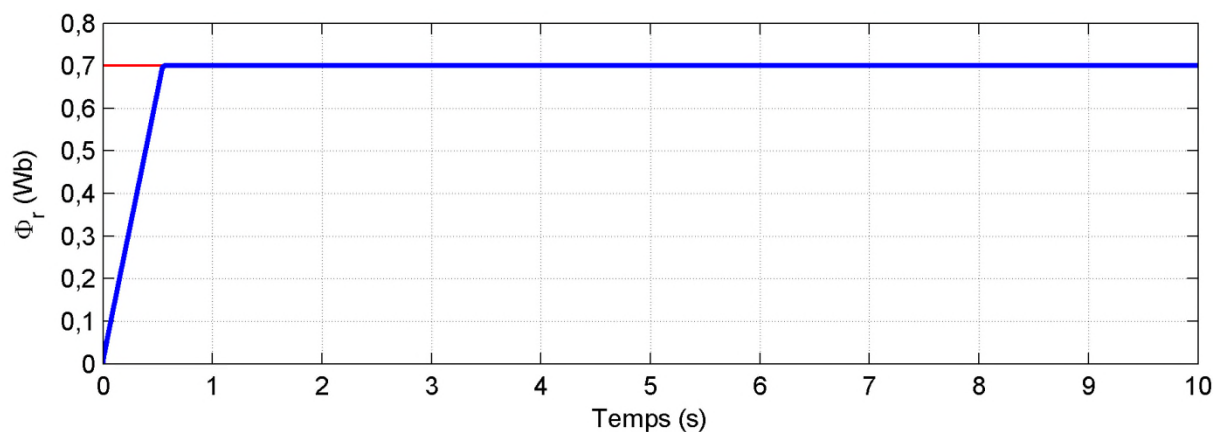


Figure. IV.9 : Allure du flux rotorique Φ (wb).

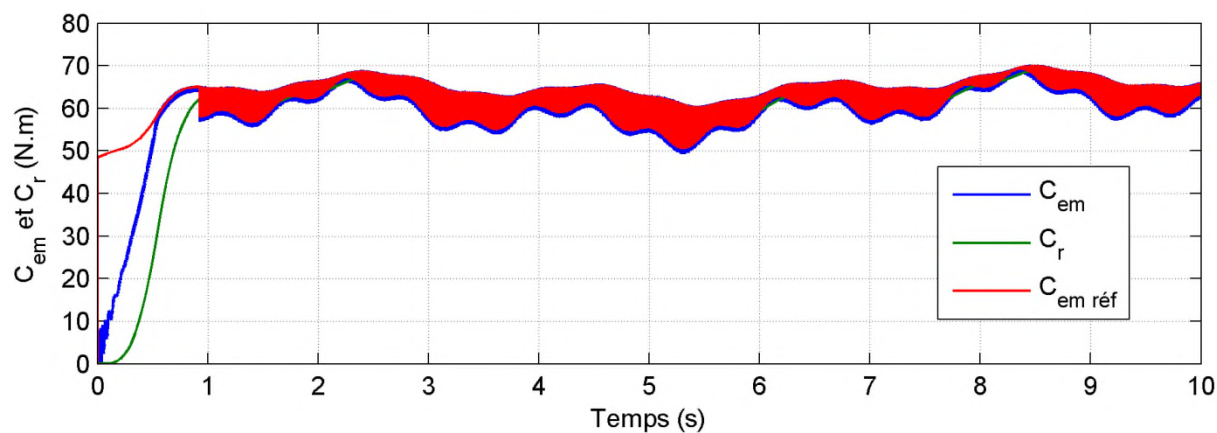


Figure. IV.10 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant.

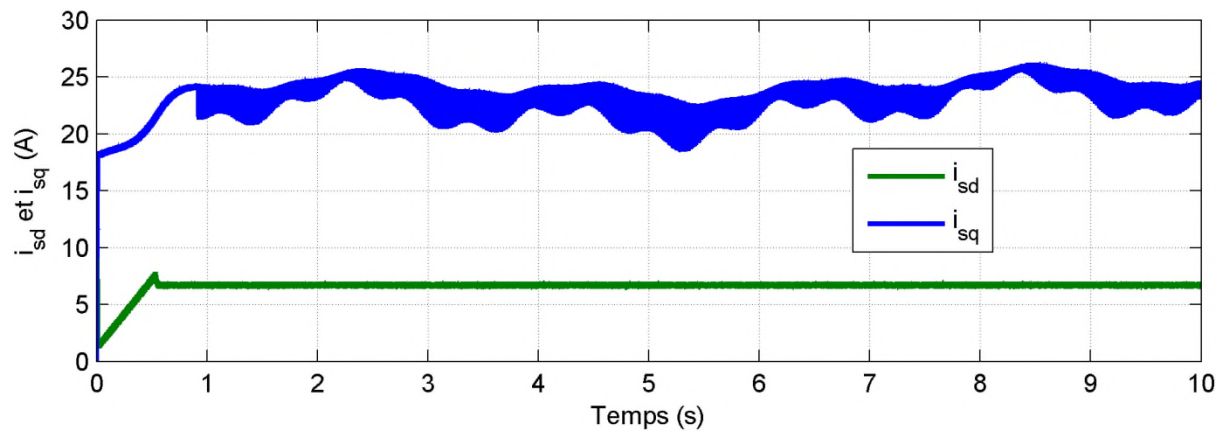


Figure. IV.11 : Allures des courants statoriques i_{sd} et i_{sq} .

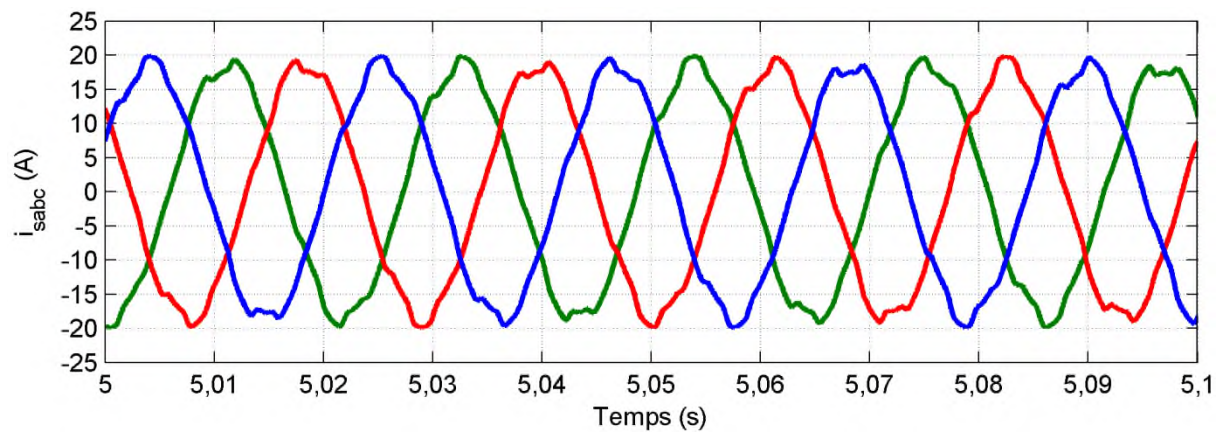


Figure. IV.12 : Zoom sur l'allure des courants statoriques i_{sabc} (A).

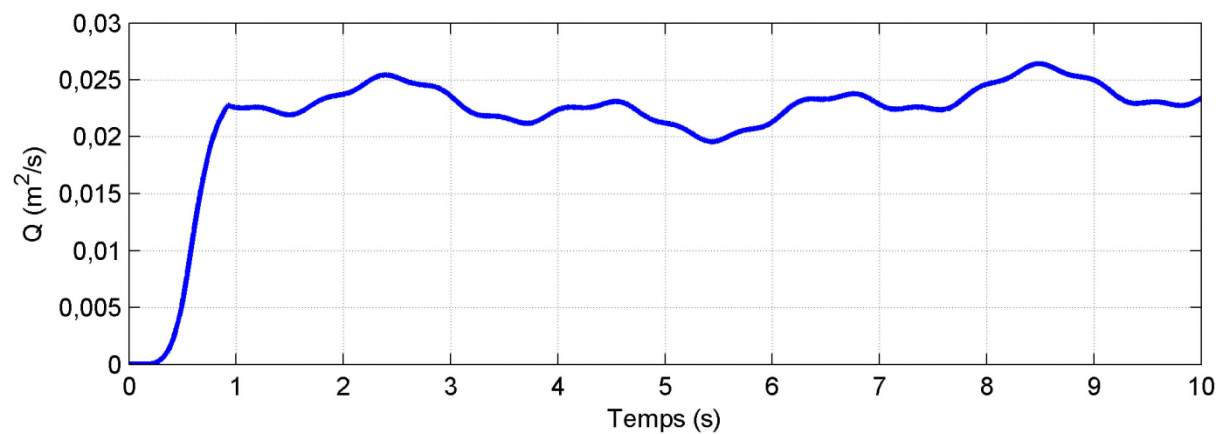


Figure. IV.13 : Allure du débit de la pompe.

- **Interprétation des résultats**

Les figures (IV.6) et (IV.8) présentent l'évolution de la vitesse avec les deux stratégies de régulation, on remarque que l'allure de la vitesse obtenue avec la deuxième stratégie (mode glissant) présente un temps de réponse et une poursuite meilleure par rapport à celle obtenue avec la première stratégie (régulateurs PI). Donc l'utilisation de la première stratégie permet de gagner en temps de pompage.

Les figures (IV.7) et (IV.9) présentent l'évolution du flux rotorique avec les deux stratégies de régulation, on remarque que l'allure de la vitesse obtenue avec la deuxième stratégie (mode glissant) présente un temps de réponse meilleur par rapport à celle obtenue avec la première stratégie (régulateurs PI). Les deux allures suivent leurs références.

La figure (IV.10) présente les allures du couple électromagnétique et sa référence (C_{em} et C_{em-ref}) ainsi que le couple résistant (C_r). On constate que les couples C_{em} et C_{em-ref} ne présentent pas d'ondulations au régime transitoire, par contre au régime permanent il apparaît le phénomène de chattering.

Les courants i_{sq} et i_{sd} sont illustrés sur la figure (IV.11), on remarque que le courant i_{sq} suit dans son évolution l'allure du couple électromagnétique C_{em} . L'évolution de i_{sd} est similaire à celle du flux ce qui confirme la séparation du contrôle du flux de celui du couple.

La figure (IV.12) donne les allures des trois courants statoriques, ces derniers ne sont pas parfaitement sinusoïdaux, cela revient au chattering qui cause des harmoniques.

La figure (IV.13) représente l'allure du débit, on voit bien que son évolution est similaire à celle de la puissance éolienne appliquée.

IV.9. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons introduit le principe de la commande par mode glissant ainsi que sa conception. L'application de la commande vectorielle au système de pompage avec deux stratégies de contrôle, nous a permis de montrer qu'on peut gagner en temps de pompage avec l'utilisation des régulateurs issus de la technique mode glissant par rapport aux régulateurs classique (PI).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans notre mémoire concerne d'une façon générale l'étude et la modélisation, puis la simulation d'un système de pompage à partir d'une ressource renouvelable (énergie éolienne).

En outre, la modélisation des différentes parties de la chaîne de pompage éolien composée d'une génératrice GAS, d'un redresseur commandé, d'un onduleur, et d'un groupe motopompe ont été développées.

Dans un premier temps, nous avons appliqué la commande vectorielle classique pour la partie production. Dans un second temps, nous avons appliqué une commande vectorielle avec deux stratégies différentes, pour la partie groupe motopompe. La première est basée sur l'utilisation des régulateurs classique (PI) et la seconde est basée sur des régulateurs issus de la technique mode glissant. Cette dernière est connue pour sa robustesse et la rapidité de réponse. Ces qualités ont été montrées par les résultats obtenus lors de l'application de ces deux stratégies pour le système de pompage. Par contre, l'inconvénient du mode glissant est le phénomène de chattering qui cause des harmoniques.

En perspective, on souhaite appliquer la technique du mode glissant, aux boucles internes de courants en plus des boucles externes, ce qui peut améliorer nettement les performances du système.

Références Bibliographiques

- [1] **F. Poitiers** « Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 2003.
- [2] **S. Belakehal** « Commande des Machines à Aimants Permanents dédiées aux Energies renouvelables », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [3] **A. Abdelli** « Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive », Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2007.
- [4] **A. Guettaf** « Optimisation Floue- Génétique d'un Système de Pompage Eolien », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.
- [5] **T. Douadi** « Etude et Commande d'un Système Eolien à base d'une Génératrice Asynchrone », Mémoire de magister, Université de Batna.
- [6] **Guy Cuntz** « Eolienne et Aérogénérateur », Edisud Edition 1982. I Edition 1973, II Edition 1982.
- [7] **L. Aiche-hamane** et **A. Khellaf** « Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie », International congress of photovoltaics and wind énergies (ICPWE-2003), Tlemcen, Algérie, 2003.
- [8] **M. Loufane** et **S. Oublaïd** « Etude d'un Systèmes de Pompage Alimenté par une Source Hybride (Eolienne – Photovoltaïque) », Mémoire d'ingénieur, Université de Bejaia 2010.
- [9] **A. Guezgouz** et **L. korichi** « Commande en Mode Glissant de la Mada dans une Eolienne à Vitesse Variable Connecté au Réseau », Mémoire d'ingénieur, Université de Bejaia, 2009.
- [10] <http://oooxygene.alwaysedata.net/eolienne.html>.
- [11] **G. Thierry** et **D. Fedullo** « Le Grand Livre de L'électricité », Troisième édition 2014.
- [12] **M.T. Latreche** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un Système Eolien », Mémoire de magister, Université de Sétif 2012.
- [13] **M. Chadel** « Dimensionnement d'un Système Pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar », Université de Tlemcen ,2012.
- [14] <http://www.wikiwater.fr/e42-les-pompes-a-energie-eolienne.html>.
- [15] **B. Equer** « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de Cours », Energie solaire photovoltaïque édition ellipses 1993.
- [16] **J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy** « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998.

- [17] **A. Saadi** « Etude Comparative entre les Techniques d'Optimisation des Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Mémoire de magister, Université de Biskra, 2001.
- [18] **J. M. Hirtz** « Les Stations de Pompage d'Eau », Edition Lavoisier TEC & DOC 1991.
- [19] **L. Chiter** « Modélisation et Simulation d'un System de Pompage Solaire à Base d'un Moteur Asynchrone Monophasé ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Alde Batna, 2012.
- [20] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Redresseur>.
- [21] **G. Idirer** « Commande Prédictive des Systèmes Non-Linéaires Dynamique », Mémoire de magister, Universitaire de Tizi-Ouzou ,2011.
- [22] **A. Kessal** « Correction du Facteur de Puissance a l'entrée d'un Convertisseur AC/DC », Thèse de doctorat, Université de Setif, 2012.
- [23] **H. Benderradji** « Contribution à la Commande Robuste de la Machine à Induction », Thèse de doctorat, 2013.
- [24] <http://www.wikiwater.fr/e40-les-pompes-motorisees.html>.
- [25] www.wilo.com.
- [26] **L. Vado** « Le Pompage de l'eau par Eolienne », livre la houille blanche.
- [27] **O. Guerri** « Journal Mensuel du Centre de Recherche Scientifique et Technique des Régions Arides »,2003.
- [28] **A. Harrouz; A. Dahbi, O. Harrouz; A. Benatallahé** « Control of Wind Turbine Based of PMSG Connected to Water Pumping System in South of Algeria », 3rd international symposium on environmental friendly energies and applications (EFEA), 2014.
- [29] **A. Kumar, E. Kochhar, K. Upamanyu** « Photovoltaic and Wind Energy Hybrid sourced Voltage Based Indirect Vector Controlled Drive for Water Pumping System », IEEE international conference on electrical, Computer and communication technologies (ICECCT), 2015.
- [30] **L. Benyoub** « Contrôle Directe du Couple d'une Machine Asynchrone en utilisant la Carte Dspace1104 », Projet de fin d'étude en électrotechnique, Université de Bejaia ,2012.
- [31] **Z. Ait ouali** « Application des Fpga à la Commande d'un Moteur Asynchrone », Mémoire de magister, Université Mouloud Mameri ,2011.
- [32] **S. Ankik, S. Aliouche** « Contrôle Directe du Couple d'une Machine Asynchrone », 2011, Mémoire de master, Université de Bejaia.
- [33] **Gabriel_Octavian Cimuca** « Système Inertiel de Stockage d'Energie Associe à des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat, E.NSAM, centre de Lille, 2005.

- [34] **A. Saki, M. Belaidi** « Etude d'un Générateur Asynchrone dans la Production d'Energie Electrique par Eolienne », Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2006.
- [35] **K. Idjdarene** « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2010.
- [36] **D. Aitkaid** «Commande d'une Machine Asynchrone sans Capteur Mécanique, à L'aide de Régulateurs Fractionnaires », Mémoire d'ingénieur, Université de tizi ouzou, 2011.
- [37] **N. Hamdi** « Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes », Mémoire de magister, Université de Constantine, 2008.
- [38] **K. Kendouci** « Contribution à la Commande sans Capteur Mécanique d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Thèse de doctorat. Université d'Oran, 2012
- [39] **S. Taraft et al** « Commande en Mode Glissant de la MADA dans une Eolienne à Vitesse Variable Connectée au Réseau ».Université de Bejaia, 2010.
- [40] **A. SI. Amour** « Contribution à la commande par mode glissants d'ordre fractionnaire », Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [41] **N. Hamdi** « Amélioration des performances des aérogénérateurs », Thèse de doctorat université de Constantine, 2011.
- [42] **L. Abdelhamid** «Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'environnement », Mémoire de magister, Université de Batna, 2012.

ANNEXE

➤ Paramètres de la machine asynchrone modélisée

Les caractéristiques électriques :

- Rotor de type de cage d'écureuil
- 4 paires de pôles
- 230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn
- $R_s = 1,07131 \Omega$
- $R_r = 1,29511 \Omega$
- $l_s = 8,9382 \text{ mH}$
- $l_r = 4,8613 \text{ mH}$

Les paramètres mécaniques.

- $J = 0,230 \text{ kg.m}^2$
- $f = 0,0025 \text{ N.m/rad.s}^{-1}$

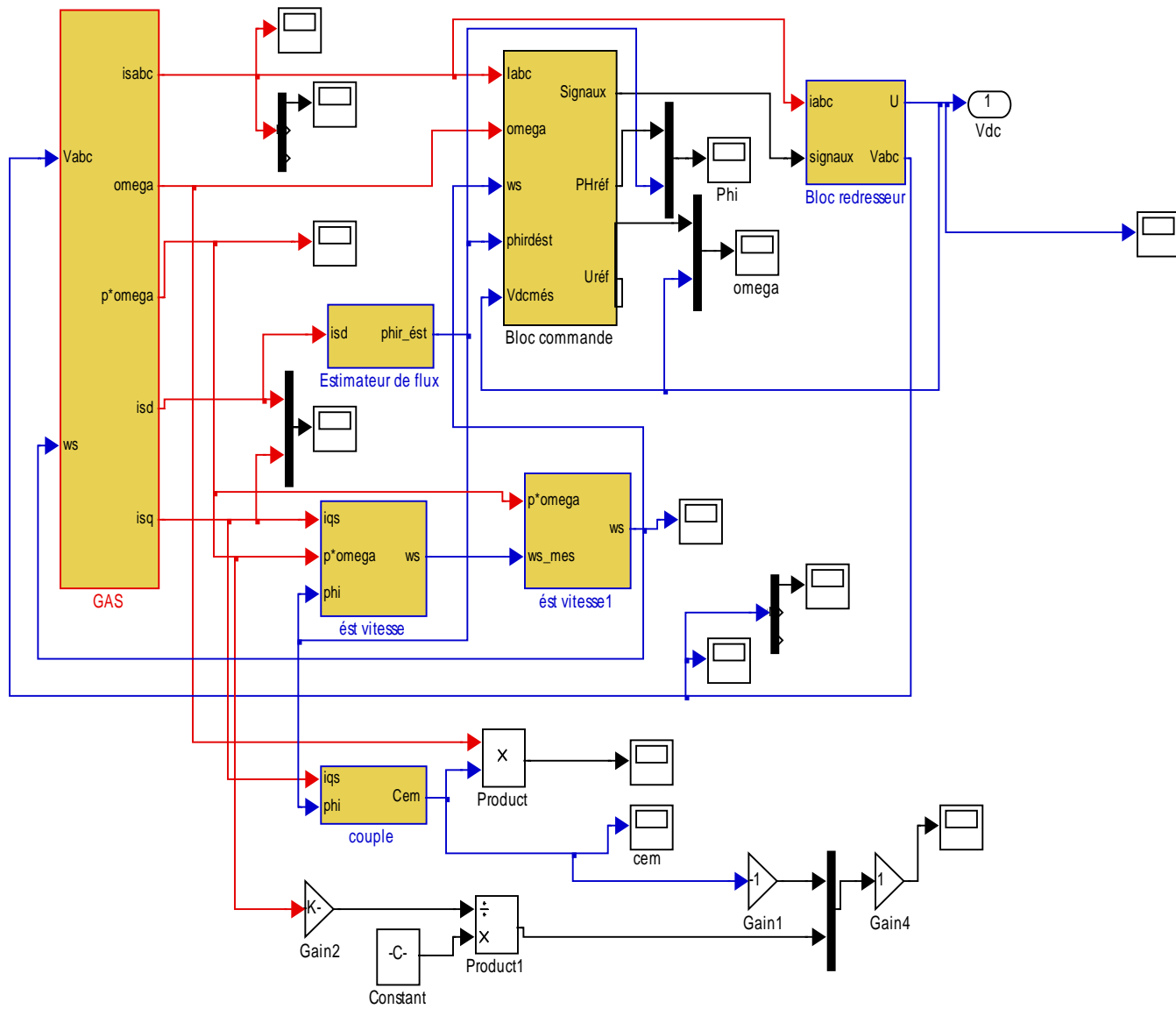
➤ Bus continu

- $C = 1000 \mu\text{f}$

➤ Paramètres de la Pompe Centrifuge

- $\omega_n = 72,22 \text{ rad/s}$
- $P_m = 5,5 \text{ kW}$
- $\eta = 0,55 \%$
- $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $H = 10 \text{ m}$

Bloc de simulation de partie production



Bloc de simulation de partie pompage

