

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. Mira Béjaïa



Faculté de technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

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

Électrotechnique

Spécialité : Commande Electriques



*Contrôle direct du couple d'une machine
asynchrone appliqué au pompage éolienne*

Présenté par :

❖ M^r MAHREZ Larbi

❖ M^{lle} SAYEH Sylia

Encadré par :

Mr IDJDARENE

Mme BELAID

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Tout d'abord on tient à exprimer notre profonde gratitude aux directeurs de ce mémoire **Mr Idjdarene Kassa** et **Mm Belaïd Sofia** tous deux maîtres de conférences au département de génie électrique de l'université de Bejaïa. Pour avoir assurés de manière agréable le suivi quotidien de notre travail et pour nous avoir fait profiter de leurs expériences leurs compétences scientifiques, leurs conseils, pour leurs disponibilités malgré leurs emplois du temps chargé, pour leurs confiances, leurs égards, leurs respects et sympathies.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement à mes très chers parents que Dieu les gardent et les Protègent pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

À mon binôme SYAFA Syla

À mes très chers frères et belles sœurs.

À tout mes amis: zizo, maricain, ramos, houssam, soucif, samine,

koukou, ghānou, bakayou, amine

À Mes chouchou: sylviane, adem, celine, jiji

À tout les supporteurs de la jsk et les ultras (ukb) en particulier

*À Mon cher ami hamid qui m'a laisser un grand vide, tu nous a
quitte pour un monde meilleur, que dieu t'accorde à son vaste
paradis nchallah*

*À tout ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste
travail et tous ceux qui nous sont chers.*

Larbi jsk ukb

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect,
reconnaissance et de remerciement à mes très chers
parents que Dieu les gardent et les Protègent pour
leurs soutien moral et financier, pour Leurs
encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

À mon binôme MATHREZ Larbi

À mes très chers frères et sœurs.

À tout mes amis (e).

*À l'association omnéssion en générale et a tout ces
adïrons en particulier*

*À tout ceux qui ont participé à l'élaboration de ce
modeste travail et tous ceux qui nous sont chers.*

syhia

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
CHAPITRE I : Généralités sur le système de pompage éolien	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique de l'éolien	3
I.3 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne	3
I.3.1 Gisement éolien en Algérie	3
I.3.2 Définition de l'énergie éolienne	4
I.3.3 Principe de fonctionnement	5
I.3.4 Mode de fonctionnement	6
I.3.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe	6
I.3.4.2 Fonctionnement à vitesse variable	6
I.3.5 Zone de fonctionnement de l'éolienne	7
I. 3. 6 Principaux composants d'une éolienne	8
I. 4 Les différents types d'éoliennes	9
I. 4. 1 Les éoliennes à axe vertical	9
I. 4. 1. 1 Éolienne à axe verticale de type Darrieus	10
I. 4. 1. 2 Éoliennes à axe verticale de type Savonius	10
I. 4. 2 Les éoliennes à axe horizontal	11
I. 5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	12
I.6 Structure des systèmes pompage éolien	13
I. 6. 1 Type de générateur utilisé	13
I.6.1.1 Générateur asynchrone à cage	13
I.6.2 Convertisseurs statiques	14
I.6.2.1 Le convertisseur alternatif/continu (Redresseur)	14
I.6.2.2 Le convertisseur continu/alternatif (onduleur)	15
I.6.3 Les différents types de moteurs utilisés	15
I.6.3.1 Moteur à courant alternatif	15
I.8.4 Type de pompes utilisées	16
I.8.4.1 Les pompes centrifuges	16
I.8.4.2 Les pompes volumétriques	17
I.8.5 Optimisation de la chaîne de conversion éolienne	17
I.8.6 Commande MPPT	18
I.8.7 Structure du système de pompage éolien à étudier	18

Sommaire

I.9 Conclusion	19
CHAPITRE II: Modélisation des éléments du système de pompage éolien	
II.1. Introduction	20
II.2. Modélisation de la vitesse du vent	20
II.3. Modélisation de la turbine éolienne	20
II.4. Modèle du multiplicateur	21
II.5. Modélisation de l'arbre de la machine	21
II.6. Modélisation d'un redresseur	22
II.7. Modélisation de bus continu	22
II.8. Modélisation de l'onduleur	23
II.9. Modélisation du groupe moteur – pompe	26
II.9.1. Modélisation de la machine asynchrone	26
II.9.1.1 Equation électrique et magnétique de la MAS dans le repère (abc)	27
II.9.1.2 Application de la transformation de Park aux équations de la MAS	29
II.9.2 Modélisation de la pompe centrifuge :	32
II.10. Conclusion	33
CHAPITRE III :Commande et simulation de la chaîne éolienne	
III.1 Introduction	34
III.2 Commande de la machine asynchrone	34
III.2.1 Commande directe du couple du moteur asynchrone	34
III.2.2 Partitionnement algorithmique de la commande	35
III.2.3 Caractéristique principale de la commande directe du couple	35
III.2.4 Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension	36
III.2.5 Stratégie de commande directe du flux et du couple	39
III.2.5.1 Principe du contrôle du flux statorique	39
III.2.5.2 Principe de contrôle du couple électromagnétique	40
III.3 choix de la séquence de commande	41
III.4 Estimateurs	42
III.4.1 Estimation du flux statorique	42
III.4.2 Estimation du couple électromagnétique	43
III.5 Correction de flux statorique et du couple électromagnétique	43
III.5.1 Correcteur de flux	43
III.5.2 Correcteur de couple	44

Sommaire

III.6. Elaboration de la table de commande	44
III.7 Résultats de simulation	45
III.7.1 Fonctionnement générateur	45
III.7.2 Fonctionnement moteur	50
III.8 Conclusion	54
Conclusion générale	55

Liste de figures

Chapitre I

<i>Figure. I.1: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie</i>	<i>4</i>
<i>Figure. I.2: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure. I.3: Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.4: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.4: différents composant d'une éolienne.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.5: Eolienne à axe verticale</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.5: Le rotor de Darrieus</i>	<i>10</i>
<i>Fig. I. 6: Le rotor de Savonius.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure. I.7: Eolienne à axe horizontale</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.10: Schéma d'une chaine de conversion d'énergie éolienne</i>	<i>13</i>
<i>Figure. I.11: Génératrice asynchrone à cage</i>	<i>14</i>
<i>Figure. I.11: Pont redresseur triphasé à thyristors</i>	<i>14</i>
<i>Figure. I.12: Schéma d'un onduleur</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.16: Pompe centrifuge</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.17: Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge</i>	<i>17</i>
<i>Figure. I.18: Pompe volumétrique</i>	<i>17</i>
<i>Figure. I.19: Structure d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne en énergieélectrique destiné au pompage d'eau</i>	<i>18</i>

Chapitre II

<i>Figure II .1: Schéma d'un redresseur.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II.2: schéma simple du circuit du bus continu.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.3 : circuit d'un onduleur relie à la machine</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.4: Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil</i>	<i>26</i>
<i>Figure II.5: Modèle de Park du moteur asynchrone</i>	<i>30</i>

Chapitre III

Figure III. 1: Représentation des vecteurs tensions générés par l'onduleur 37

Figure III. 2: Exemple de l'évolution de l'extrémité de ϕ pour R_s Is Négligeable..... 39

Figure III. 3: Sélection du vecteur tension 41

Figure.III. 4:Contrôleur à hystérésis à deux niveaux. 43

Figure.III. 5: Correcteur de couple à trois niveaux..... 44

Figure III. 6: Structure générale du contrôle directe du couple (DTC) 45

Figure III. 7: Allure de la vitesse du vent46

Figure III. 8:Allue de la vitesse de genratrice46

Figure III. 9: Allure de la vitesse au bout des pales46

Figure III. 10: Allure de coefficient de puissance47

Figure III. 11: Allure de la puissance éolienne47

Figure III. 12: Allure du couple electromagnetique47

Figure III. 13: Allure des courants statoriques48

Figure III. 14: Zoom sur les courants statorique48

Figure III. 15: Zoom sur les courants statoriques48

Figure III. 16: Allure du flux statorique49

Figure III. 17: Allure des flux statorique alpha beta49

Figure III. 18: Zoom sur le flux statorique alpha beta.....49

Figure III. 19: L'évolution du flux statorique..... 50

Figure III. 20: Allure de la vitesse du moteur 50

Figure III. 21: Allure du couple electromagnetique et du couple resistant..... 50

Figure III. 22: Allure du flux statorique alpha beta 51

Figure III. 23: Zoom sur le flux statorique 51

Figure III. 24: Zoom sur le flux statorique 51

Figure III. 25: L'évolution des courants statorique..... 52

Liste de figures

Figure III. 26: Zoom des courants statorique	52
Figure III. 27: Allure du débit.....	53
Figure III. 28: L'évolution du flux statorique alpha beta	53

Liste des tableaux

Tableau III.1 : calcul des vecteurs de tension	38
Tableau III.2 : module et arguments de chaque vecteur de tension	38
Tableau III.3 : table de commutation	44

Liste des symboles

[I_{rabc}] : Vecteurs des courants rotorique (A)

[I_{rdq}] : Vecteurs des courants rotoriques dans les axes (d, q) du repère de Park

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

[I_{sdq}] : Vecteurs des courants statoriques dans les axes (d, q) du repère de Park

[R_r] : Vecteurs des résistances rotoriques

[R_s] : Vecteurs des résistances statoriques

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

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

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

[Φ_{rabc}] : Vecteurs des flux rotoriques

[Φ_{rdq}] : Vecteurs des flux rotoriques dans les axes (d, q) du repère de Park

[Φ_{sdq}] : Vecteurs des flux statoriques dans les axes (d, q) du repère de Park

[Φ_{sdq}] : Vecteurs des flux statoriques

C : Capacité du bus continu (F)

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

C_p : Coefficient de puissance

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

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

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

MAS : machine asynchrone à cage

H : Hauteur totale du pompage (m)

I_c : Courant capacitif (A)

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

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

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

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

Liste de symbole

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

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

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

L_s : Inductance propre d'une phase statorique

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H)

MAS : Machine asynchrone

P : Nombre de pair de pole de la machine P_{hyd} : puissance hydraulique (W)

P_t : Puissance de la turbine éolienne (W) P_v : La puissance fournie par le vent (W)

Q : Débit de la pompe (m^3/s)

R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm)

R_s : Résistance d'une phase statorique (Ohm)

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur

S_t : Surface balayée par la turbine éolienne

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

V : Vitesse du vent (m/s)

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

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

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

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

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

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

β : L'angle de calage des pales (rad).

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

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

Liste de symbole

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

ρ : Masse volumique de l'air (kg/m^3).

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

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

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

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

λ : Vitesse en bout des pales.

ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).

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

DTC : contrôle directe du couple

Introduction générale

L'énergie éolienne est parmi les méthodes qui connaissent la croissance la plus rapide dans le monde pour produire l'électricité. L'énergie cinétique du vent en mouvement est transformée en électricité par des éoliennes qui sont installées à des endroits où les conditions météorologiques sont les plus propices. Les aérogénérateurs peuvent être utilisés individuellement, mais elles sont souvent regroupées pour former des parcs éoliens ou des centrales éoliennes. L'électricité produite à partir des parcs éoliens peut servir à répondre à des besoins locaux ou à alimenter un réseau de distribution d'électricité desservant des résidences et des commerces qui sont plus éloignés. L'utilisation de cette forme d'énergie permet de réduire les effets de la production d'électricité sur l'environnement, car elle nécessite aucun combustible et ne produit aucun polluant ni gaz à effet de serre [1].

L'électricité éolienne représente moins de 1 % de l'électricité mondiale. Elle est utilisée principalement en Europe (74 % de la puissance mondiale installée en 2003), aux Etats-Unis (17%) et en Asie (8 %, dont 70 % en Inde). La capacité de production d'électricité éolienne installée en Europe était de 29 000 MW en 2003. L'objectif est de la doubler d'ici 2010 et de réaliser 15 % de la production en mer. Par contre, en l'Afrique du Nord, le Maroc dispose d'un potentiel éolien estimé à environ 6 00 MW [2].

Notre objectif dans ce travail consiste à appliqué une technique de commande qui est la DTC pour contrôler le couple de la machine asynchrone et l'appliqué au système de pompage éolienneour réalisé ce travail nous avons divisé ce mémoire en quatre chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à la présentation d'un état de l'art des aérogénérateurs, des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne, nous avons fait une étude comparative des machines électriques utilisées dans la production de cette énergie.

Au second chapitre, nous aborderons la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne, composée d'une turbine, d'une génératrice asynchrone à cage, d'un redresseur, d'un onduleur, et enfin, la modélisation du group motopompe qui est composée d'un moteur asynchrone à cage et une pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre nous allons nous intéressé à le principe, l'avantages, l'inconvénient de la commande appliquée qui est la DTC (Directe Torque Control).

Le quatrième chapitre sera basé sur la représentation des résultats de simulation du système étudié avec l'application de la commande au groupe motopompe.

On finira par une conclusion générale et quelques perspectives.

I.1 Introduction

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connaît un essor considérable depuis ces dernières décennies. Cela est dû d'une part, à des contraintes d'ordre environnementales mais également à une maîtrise de plus en plus grande des technologies mises en œuvre pour assurer cette conversion [3].

L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent, ou la transforme en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateur. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70 résulte de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux autres sources traditionnelles de même puissance [4].

L'objectif de ce chapitre est de donner une représentation générale sur les systèmes éoliens, nous représentons un état de l'art sur les dispositifs électrotechniques (machine+convertisseur) qui permet de transformer l'énergie mécanique présente sur l'arbre de l'aérogénérateur en énergie électrique.

I.2 Historique de l'éolien

Afin d'irriguer la Mésopotamie vers J-C l'énergie éolienne a été déjà utilisée par Hammourabi. Les environ 400 ans avant J-C en Inde, la première description écrite de l'utilisation des moulins à vent. La puissance du vent a été exploitée pour les systèmes de pompage de l'eau par les chinois. Le début du moyen âge a vu l'apparition des moulins en Europe avec comme application l'assèchement des lacs et terrains inondés au Pays-Bas ainsi que la moudre de grains. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIXème siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif dans les années 1950 [2].

I.3 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne

I.3.1 Gisement éolien en Algérie [5]

L'Algérie a un régime de vent modéré, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre car elle s'étend sur une large surface d'où la diversification de sa

topographie et son climat. L'Algérie se subdivise en deux principales zones géographiques distinctes, le nord méditerranéen par un littoral de 1200km avec des reliefs montagneux, représenté par l'atlas Talilien et saharien. Entre ces dernières, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Quant au sud il se caractérise par un climat saharien.

Au sud d'Algérie, on y trouve des vitesses de vent plus importantes qu'au nord, elles sont particulièrement supérieures à 4 m/s au sud-ouest, et supérieures à 6m/s dans la région d'Adrar tant dit que le nord est faiblement venté, cependant on y trouve une présence de microclimat sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El khither ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud, comme montrer sur la (**figure I.1**).

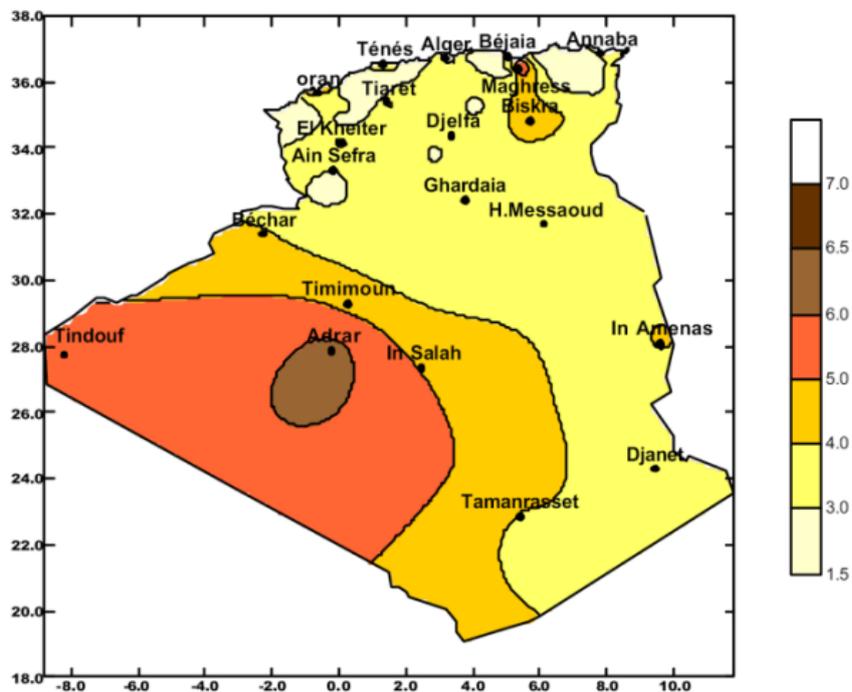


Figure. I.1: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie [6]

I.3.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un système qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Il est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice électrique généralement triphasé, et d'un circuit d'électronique de puissance [3].

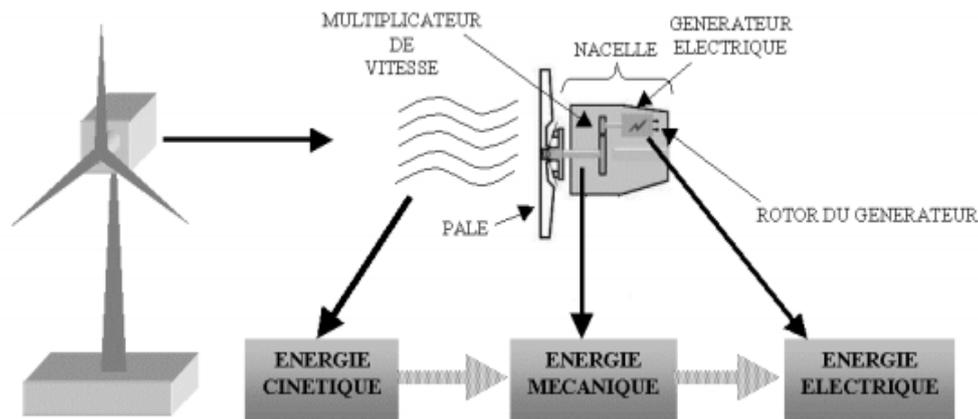


Figure. I.2: Conversion de l'énergie cinétique du vent [7]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grande dimension dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulence. Les installations éoliennes peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer où la présence du vent est plus régulière [8].

I.3.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: Une éolienne est constituée d'un mât qui soutient à son sommet une nacelle équipée de trois pales mises en rotation par le vent ; l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie mécanique. Les pales font tourner le générateur de l'éolienne, qui à son tour transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système autonome [9].

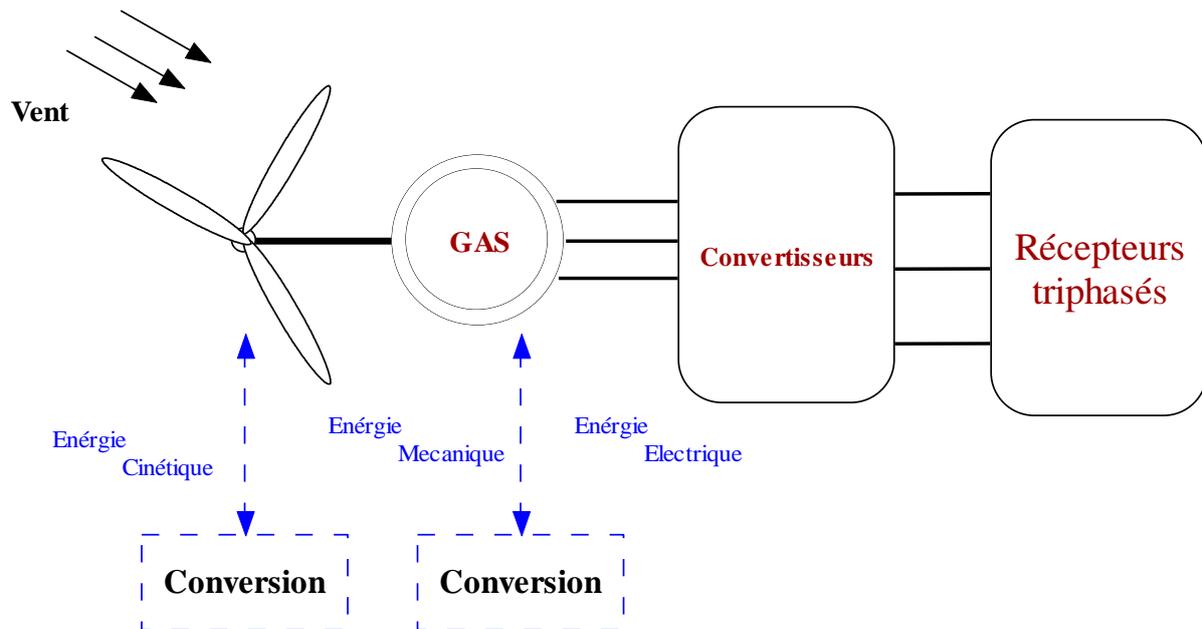


Figure. I.3: Principe de la conversion d'énergie d'un aérogénérateur [9]

I.3.4 Mode de fonctionnement [10]

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner soit à vitesse fixe ou variable :

I.3.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe

- ✓ Système électrique plus simple
- ✓ Système de commande électrique non nécessaire
- ✓ Système moins cher

I.3.4.2 Fonctionnement à vitesse variable

- ✓ Meilleur rendement énergétique
- ✓ Meilleure qualité d'énergie électrique
- ✓ Moins d'efforts mécaniques subis par le train de puissance.

➤ Intérêt de la vitesse variable

Les développements technologiques des dernières années ont favorisé la mise en place d'éoliennes à vitesse variable. L'éolienne à vitesse variable possède plusieurs avantages tels que: une meilleure extraction de l'énergie du vent, un niveau de bruit inférieur à bas régime éolien et un meilleur transfert de puissance vers le réseau électrique. La vitesse variable représente l'avenir des éoliennes. En effet si la génératrice fonctionne à vitesse fixe, par exemple 1600 tr/mn, les maximums théoriques des courbes ne sont pas exploités mais on voit

Clairement quand la génératrice fonctionne à vitesse variable, par exemple de 1100 tr/mn à 1900tr/mn sur la même Figure, les maximums théoriques sont atteints pour chaque vitesse du vent.

I.3.5 Zone de fonctionnement de l'éolienne [8]

La (figure I.4) permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

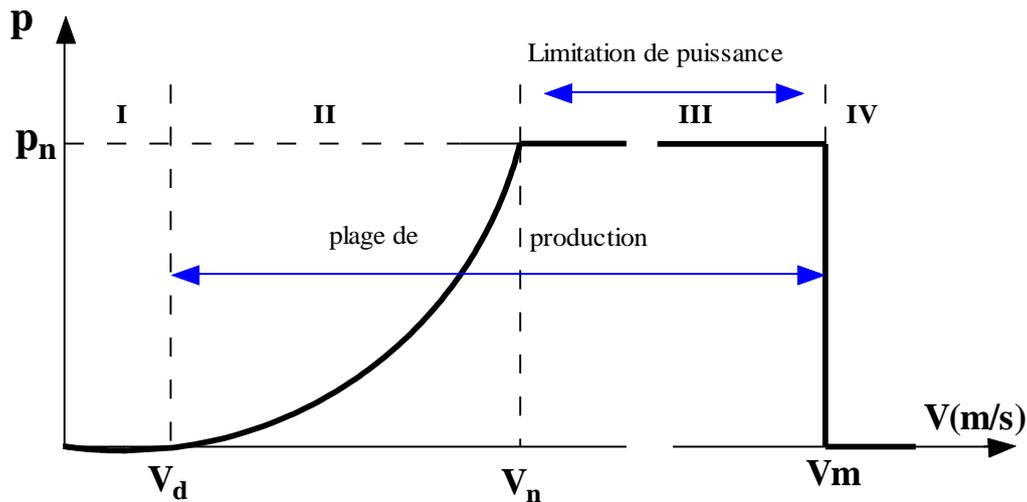


Figure I.4: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [6]

V_d : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. D'après constructeurs, V_d varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V_n : 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. Pour la grande majorité des éoliennes, V_m vaut 25m/s.

Pour

Zone I ou $V < V_d$:

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II ou $V_d < V < V_n$:

Le maximum de puissances est capté dans cette zone pour chaque vitesse du vent. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III ou $V_n V < V_m$:

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à plein charge (P_c).

Zone IV ou $V > V_m$:

La vitesse du vent devient trop forte. La puissance est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

I. 3. 6 Principaux composants d'une éolienne [11], [3]

L'aérogénérateur récupère l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie est convertie en énergie mécanique, qui est à son tour transformée en énergie électrique à l'aide d'une génératrice électromagnétique solidaire au rotor.

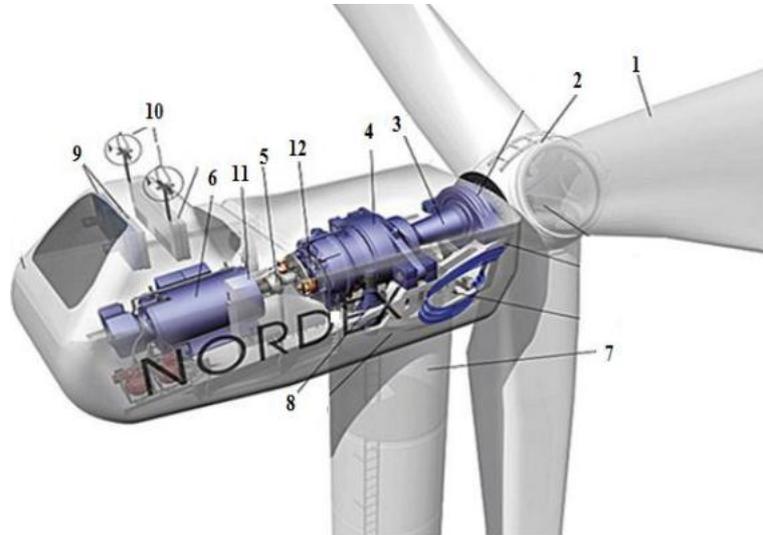


Figure I.4: différents composants d'une éolienne [6]

1: Les pales, elles ont pour rôle de capter l'énergie cinétique du vent et de la transférer ensuite au rotor, qui va le convertir en énergie mécanique, actuellement le système tripale est le plus utilisé.

2: Le moyeu, est la partie mécanique en bout de l'éolienne, qui supporte les pales. Il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

3: L'arbre primaire, c'est l'arbre de rotor de la turbine, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse.

4: Le multiplicateur, il adapte la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice.

5: L'arbre secondaire, il amène l'énergie mécanique à la génératrice.

6: Le générateur électrique, il transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

7: Le mât, est un tube en acier ou une tour en treilles. Sa hauteur est importante, en générale le mât à une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.

8: Le système d'orientation de la nacelle, il est constitué d'une couronne dentée équipée d'un moteur, il permet d'orienter l'éolienne où sa position se bloque dans l'axe du vent grâce à un frein.

9: Le système de refroidissement, il est sous forme ventilateur où destiné à la génératrice, ou sous forme radiateurs d'eau où l'huile destiné au multiplicateur.

10: Les outils de mesure de vent, girouette indique la direction du vent et l'anémomètre mesure sa vitesse.

11: Le système de contrôle électronique, il est destiné à contrôler le fonctionnement général de l'éolienne et son mécanisme d'orientation.

12: Le frein, il est équipé d'un disque situé sur la boîte à vitesse.

13: Au pied du mat se trouve un transformateur et une armoire de couplage au réseau électrique.

I. 4 Les différents types d'éoliennes

On peut classer les éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, selon deux types.

I. 4. 1 Les éoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue [12].



Figure I.5: Eolienne à axe verticale [6]

I. 4. 1. 1 Éolienne à axe verticale de type Darrieus

Ce type d'aérogénérateur permet en revanche de s'affranchir des limites introduites par la taille des pales et leur vitesse de rotation. Dans la plupart des cas, le générateur est situé à base de l'éolienne, ce qui est intéressant pour l'installation et la maintenance [3].

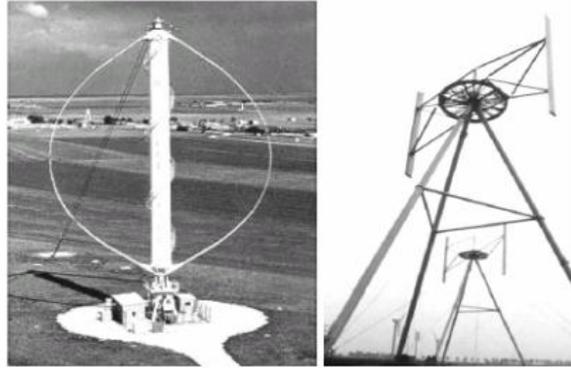


Figure I.6: Le rotor de Darrieus [2]

- **Avantages :** [13]
 - Peut être installée au sol
 - Pas de contrainte selon la direction du vent
 - Faible encombrement
- **Inconvénients :** [13]
 - Démarrage difficile
 - Faible rendement
 - Le prix

I. 4. 1. 2 Éoliennes à axe verticale de type Savonius

Ce type utilise la traînée différentielle entre les aubes constituées de partie cylindrique en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence et leur conception induit de bruit [3].



Figure. I. 7: Le rotor de Savonius [2].

- **Avantages : [13]**
 - Faible encombrement (selon les modèles)
 - Peut être intégrée aux bâtiments
 - Démarré avec des vents faibles
 - Bon comportement aux vents turbulent
- **Inconvénients : [13]**
 - Faible rendement
 - Poids peut être important
 - Le prix

I. 4. 2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Elle est constituée donc d'une hélice généralement à trois pales qui sont perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines du sol [3].

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal [14].

-Amont : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides ; et le rotor est orienté selon la direction du dispositif.

-Aval : le vent souffle sur l'arrière des pâles de la nacelle. Le rotor est flexible auto- orientable.



Figure. I.8: Eolienne à axe horizontal [6]

- **Avantages :** [13]
 - Technologie éprouvée
 - Le prix
 - Un bon rendement
- **Inconvénients :** [13]
 - Fonctionnement par intermittence
 - Doit être orienté selon les vents
 - Mauvais rendement avec des vents turbulents

I. 5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [15]

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

- **Avantages**
 - L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement
 - C'est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
 - Les éoliennes peuvent être arrêtées facilement en fonctionnement.
 - C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelable.
 - C'est une source d'énergie très intéressante pour les pays en voie de développement.
 - Elle est disponible 24h/24h, elle est considérable comme une énergie gratuite et propre.

- **Inconvénients**

- Elle est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Le stockage n'est pas nécessaire en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique.
- La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante, sa qualité produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Sur les sites moins ventés, le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classique.

I.6 Structure des systèmes pompage éolien

Le marché nous offre plusieurs types de machines, de générateurs, de pompes, et de systèmes de commandes qui contribueront au bon fonctionnement d'un système de pompage d'eau éolien, et qui demande des caractéristiques très spécifiques.

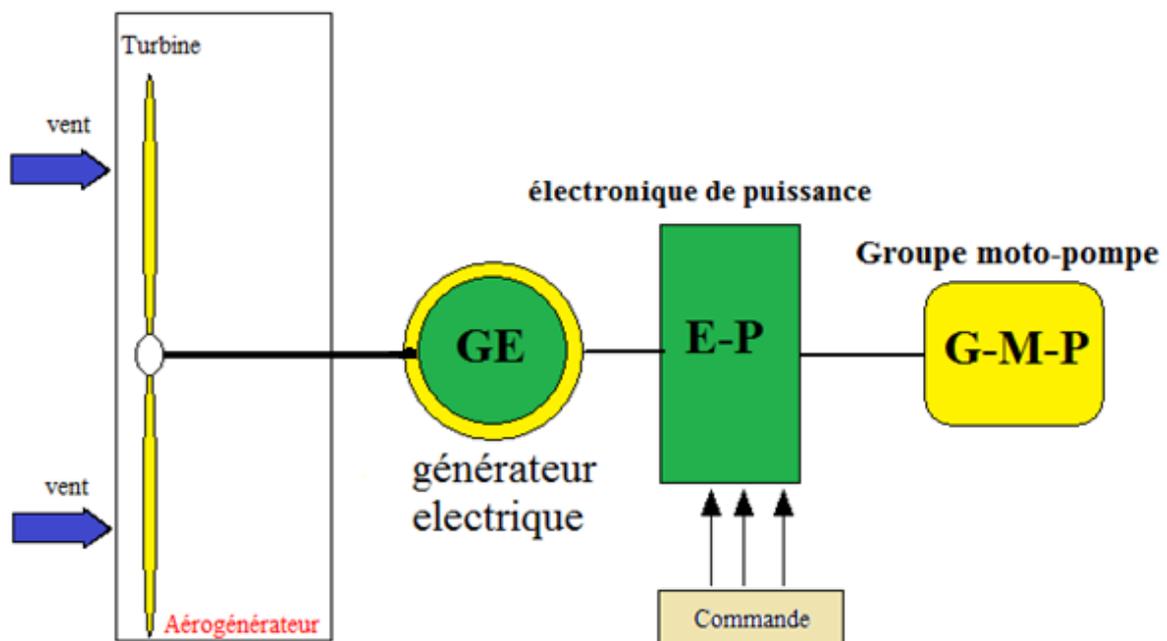


Figure I.9: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

I. 6. 1 Type de générateur utilisé

I.6.1.1 Générateur asynchrone à cage

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que

l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [16].

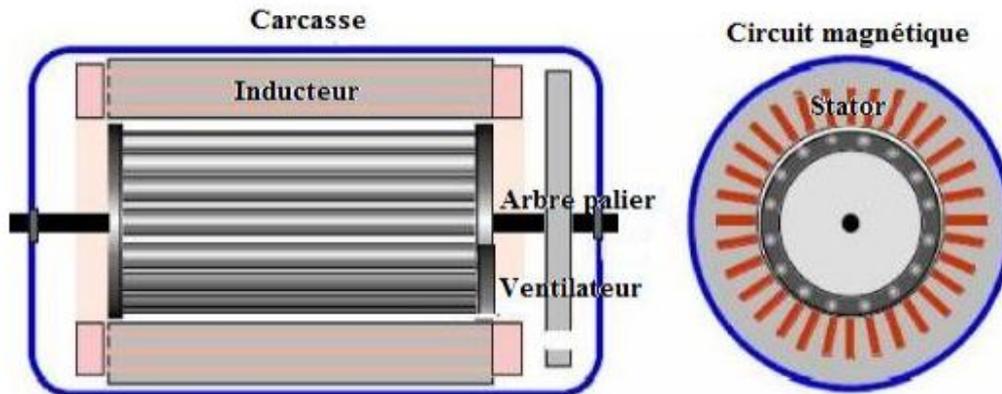


Figure. I.9 : Génératrice asynchrone à cage [6]

I.6.2 Convertisseurs statiques [6]

I.6.2.1 Le convertisseur alternatif/continu (Redresseur)

Un redresseur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge continue à partir d'une source alternative. Cette alimentation est généralement, un générateur de tension. On classe les divers redresseurs en trois catégories :

- ✓ **Les redresseurs non commandé** : ils sont à base de diodes, sont seulement utilisés lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée
- ✓ **Les redresseurs semi commandés** : ils comportent des thyristors et des diodes qui empêchent la tension aux bornes de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne. Les redresseurs non commandés et les redresseurs semi commandés sont appelés les convertisseurs unidirectionnelle car la puissance peut circuler que de l'alimentation alternative vers la charge continue.
- ✓ **Redresseur commandé** : ne comporte que des thyristors, ils sont appelés les convertisseurs bidirectionnelle car la puissance peut circuler dans les deux sens.

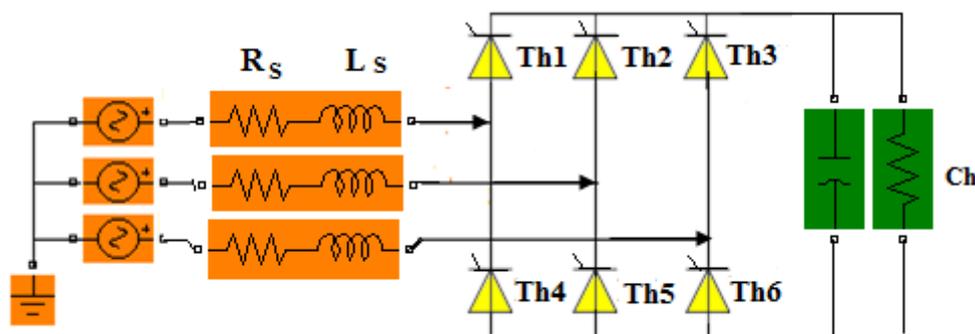


Figure. I.10: Pont redresseur triphasé à thyristors [6].

I.6.2.2 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 [17].

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

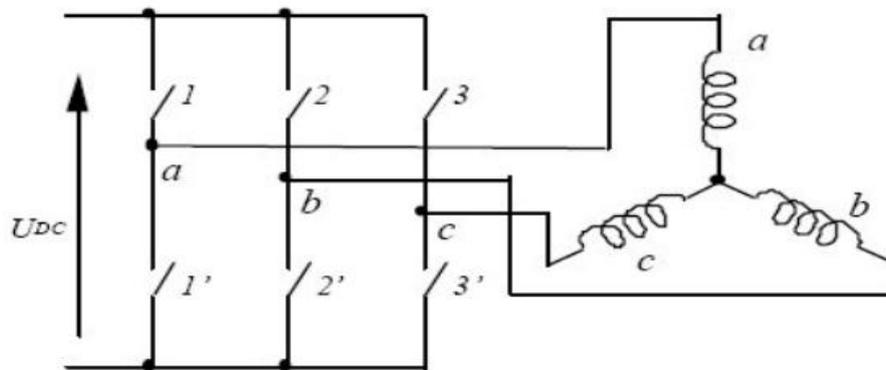


Figure. I.11: Schéma d'un onduleur [6]

I.6.3 Les différents types de moteurs utilisés

I.6.3.1 Moteur à courant alternatif

C'est un moteur qui se caractérise par le fait qu'il est constitué d'un stator (inducteur) alimenté en courant alternatif et d'un rotor (induit) soit en court-circuit, soit bobiné aboutissant à des bagues dans lesquelles le courant est créé par induction. Ces moteurs ont la particularité de fonctionner grâce à un champ tournant [6]. Dans ces moteurs on distingue :

- **Moteur asynchrone a cage (MAS)**

Les machines électriques asynchrone 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 de puissance, elles peuvent également être utilisées en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien car elles présentent un taux de défaillance peut élever. Dans les aérogénérateurs de dimension de grande puissance et rayon de pales important, la vitesse de rotation est peut élever. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone

lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'introduire entre la turbine éolienne et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapté la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. La majorité des applications en éolien sont donc à vitesse de rotation constante [18].

I.8.4 Type de pompes utilisées

Une pompe est une machine capable de transformer l'énergie mécanique en énergies hydraulique. Il y a plusieurs types de pompes disponibles pour les systèmes de pompage. On dénombre principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

I.8.4.1 Les pompes centrifuges [19]

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges :

- ✓ Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faible ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- ✓ La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.

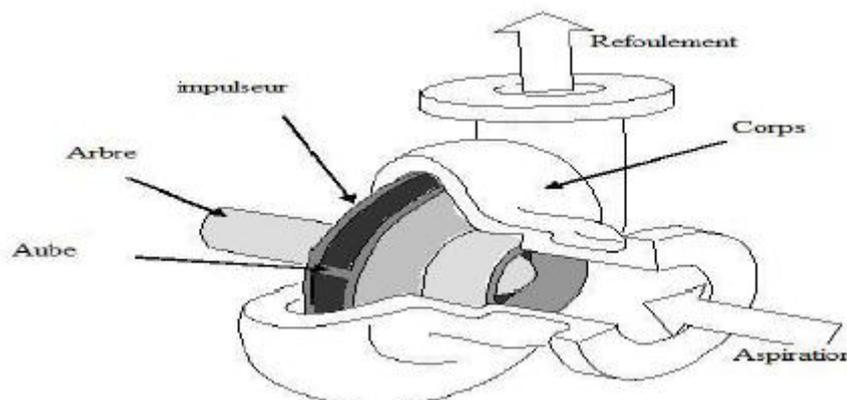


Figure I.16: Pompe centrifuge [19]

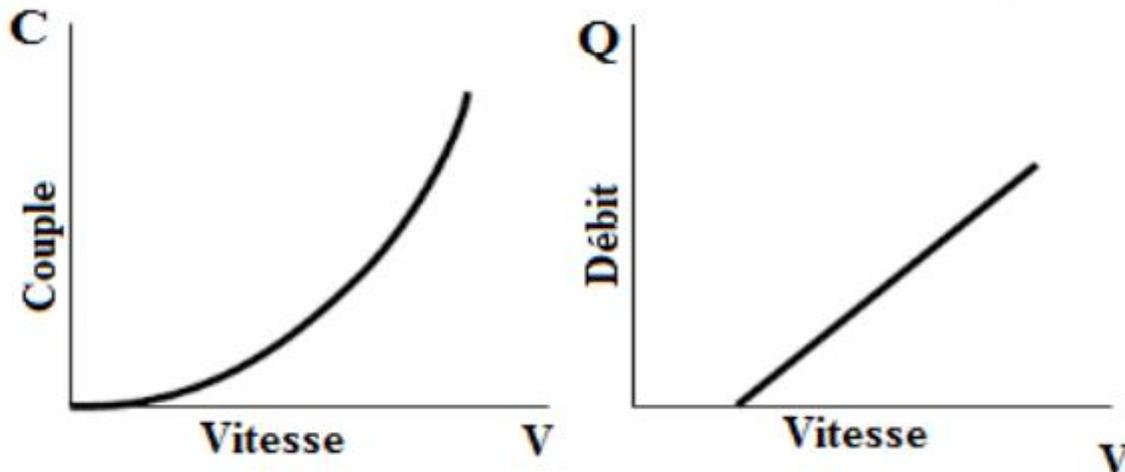


Figure I.17: Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge [6]

I.8.4.2 Les pompes volumétriques [20]

Dans ces machines volumétriques (à déplacement positif), un certain volume de fluide est dans une première étape, forcé dans un espace fini où il est enfermé sous pression par un moyen mécanique. Il est ensuite, dans une seconde étape, relâché ou forcé en dehors de cet espace, le cycle reprend de nouveau. Donc, dans ce type de machine, l'écoulement du fluide est intermittent et le débit dépend des dimensions de l'espace qui reçoit le fluide et de la fréquence avec laquelle il est rempli et vidé.



Figure. I.18: Pompe volumétrique [20]

I.8.5 Optimisation de la chaîne de conversion éolienne

Le système de conversion d'énergie éolienne est composé de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui définit son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. En effet, la courbe de puissance en forme de cloche des éoliennes, nécessite une recherche du point de fonctionnement optimale, on parle ainsi, de maximisation de la puissance (MPPT). Afin d'assurer le fonctionnement dans ces conditions optimales, il est

nécessaire de définir les lois de commande à appliquée. Pour cela, l'étude de l'optimisation de la chaîne de conversion éolienne par un algorithme est nécessaire [6]

I.8.6 Commande MPPT [6]

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracking, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens. Un générateur éolien est un générateur, dont la caractéristique courant-tension est fortement non linéaire. En conséquence, pour une même vitesse de vent, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (pompe) et la génératrice éolienne de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

Parmi les solutions MPPT actuellement disponibles pour l'optimisation d'un système éolien, on retrouve la commande par un rapport de vitesse optimal, la commande en couple optimal, la méthode de perturbation et observation et la commande par logique floue [4].

I.8.7 Structure du système de pompage éolien à étudier

Le système de pompage éolien se compose d'une éolienne à axe horizontal, d'un générateur synchrone à cage, ainsi qu'un système de commande (via un redresseur et un onduleur), qui est connecté à un groupe motopompe qui se compose d'une machine asynchrone vu sa robustesse, son entretien minimale, et son faible coût. Et finalement on a opté pour une pompe centrifuge car elle est simple, à un coût réduit, et couvre une large gamme d'utilisation. Un schéma synoptique est représenté sur la (Fig. I. 19).

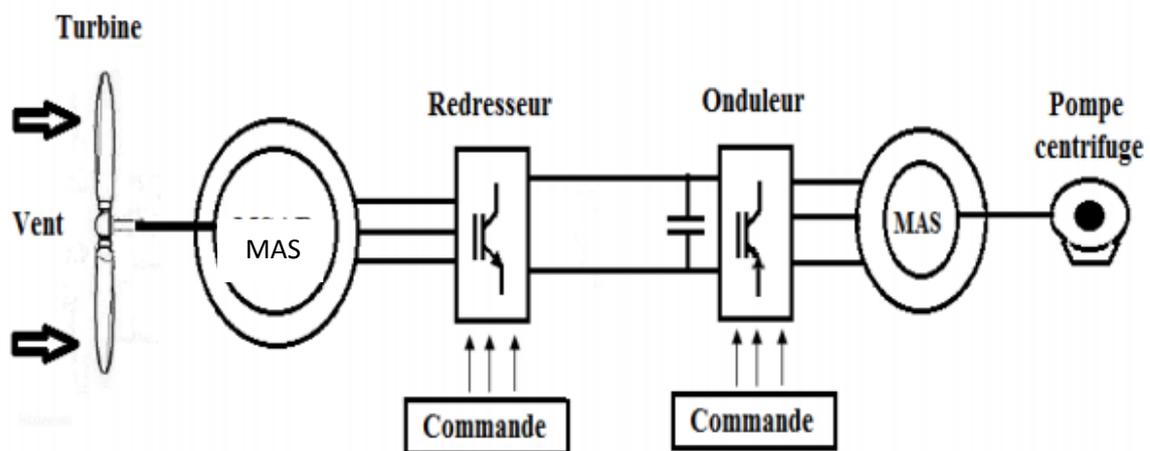


Figure. I.19: Structure d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique destinée au pompage d'eau

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description et quelques définitions sur l'énergie éolienne. On a fait une petite vision sur l'histoire de l'énergie éolienne, puis nous avons introduit quelques notions sur la conversion mécanique de cette énergie, on a parlé aussi sur les différents types d'éoliennes avec leurs avantages et inconvénients. Nous avons abordé, dans une seconde partie, quelques machines les plus utilisées pour le générateur dédié à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, aussi, on a parlé sur les convertisseurs les plus utilisés. Et pour finir, nous avons donné la structure du système de pompage éolien qui est constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge. Et la modélisation des différents constituants fera l'objet du prochain chapitre.

II.1. Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système de pompage éolien, nous procédons à la modélisation du système qui sera étudié.

La modélisation nécessite un ensemble d'équation caractérisant tout les éléments du système étudié, on doit connaître les critères d'entées (données de base) [21].

Alors, ce chapitre sera consacré à la modélisation du système élément par élément, vent turbine, onduleur, bus continu, redresseur, la pompe centrifuge, ainsi que la MAS nous servira pour la production et le pompage.

II.2. Modélisation de la vitesse du vent

La puissance éolienne dans les conditions optimales est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel [6]. La direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la voilure éolienne, car elle n'est pas vue par sa surface active, le vecteur vitesse évolue dans le plan horizontal, on peut la modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps $V_v=f(t)$.

La ressource en vent du point de vue de sa distribution statique est primordiale projet éolien et donc déterminant pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité.une des méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent est la caractéristique spectrale de Van Der Hoven. D'où, la grandeur de la vitesse du vent peut être décomposée en deux composants :

- La composante turbulente du vent est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent)
- La composante lente ; c'est la moyenne de la vitesse du vent varient régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

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

$$P_{eol} = \frac{1}{2} c_p \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^3 \quad (\text{II.1})$$

Consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement. En particulier sa vitesse de rotation. Cella permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre.

Pour simuler la turbine, on utilisera la relation du couple associée (II.2) à la caractéristique $c_p(\lambda)$. le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante [1].

$$T_t = \frac{1}{2} c_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v_v^3}{\Omega_t} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$S = \pi R^2$ (surface balayée par la turbine en m^2)

R : rayon de la turbine (m)

v_v : vitesse du vent (m/s)

ρ : masse volumique de l'air ($\rho = 1.225 \text{kg/m}^3$)

c_p : Coefficient de puissance

Ω_t : vitesse de la turbine éolienne (rd/s)

$$\Omega_t = \frac{v_v \cdot \lambda}{R} \quad (\text{II.3})$$

Tel que :

λ : vitesse réduite au bout des pales

II.4. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice son modèle peut être décrit comme suit

$$\Omega = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.4})$$

G : multiplicateur de vitesse

II.5. Modélisation de l'arbre de la machine

Plusieurs modèles mécaniques pour la modélisation de l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement

mécanique de la chaîne dans son ensemble, l'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + F\Omega = T_{em} - T_t \quad (\text{II.5})$$

II.6. Modélisation d'un redresseur

Parmi tous les convertisseurs AC-DC, la solution de référence est le redresseur triphasé à modulation de largeur des impulsions. Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique ou la vitesse de rotation de la génératrice.

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

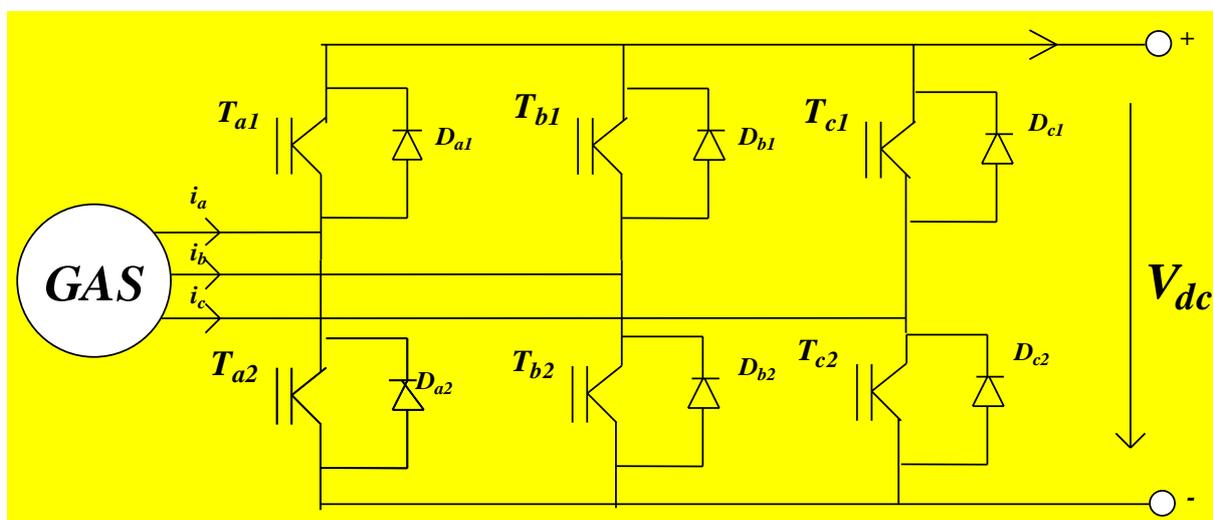


Figure II .1: Schéma d'un redresseur

II.7. Modélisation de bus continu

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

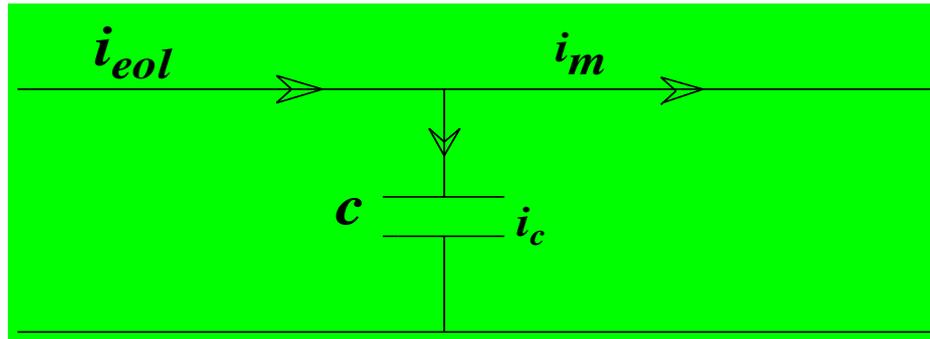


Figure II.2: schéma simple du circuit du bus continu

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

$$v_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} \cdot i_c dt \quad (\text{II.6})$$

$i_c = i_{eol} - i_m$ Courant circulant dans la capacité

v_{dc} = Tension du bus continu

C_{dc} = Capacité de bus continu

II.8. Modélisation de l'onduleur

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par une éolienne, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Dans cette étude on considère le cas est d'un onduleur triphasé à 2 niveaux de tensions qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée, considère comme une source de tension parfaite.

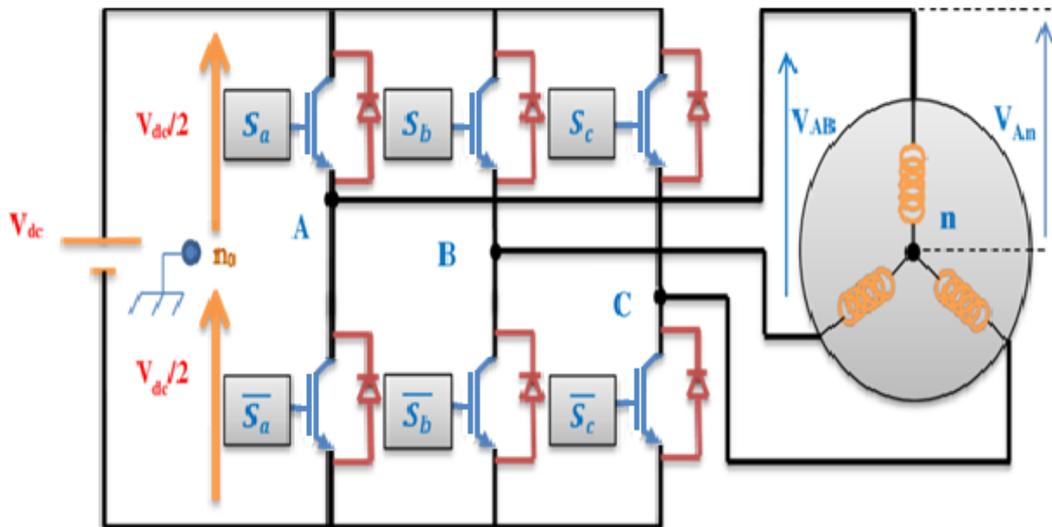


Figure II.3 : circuit d'un onduleur relie à la machine [6]

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

Les tensions composées v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} , sont obtenues à partir de ces relations

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{ao} + v_{ob} \\ v_{bc} = v_{bo} + v_{oc} \\ v_{ca} = v_{co} + v_{oa} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bc} = v_{bo} - v_{co} \\ v_{ca} = v_{co} - v_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

v_{an}, v_{bn}, v_{cn} , sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). on a pris le point «O» comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de CHALE comme suit :

$$\begin{cases} v_{ao} = v_{an} + v_{no} \\ v_{bo} = v_{bn} + v_{no} \\ v_{co} = v_{cn} + v_{no} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

v_{an}, v_{bn}, v_{cn} Sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur, v_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point «O» dans les hypothèses de travail on a supposé que la charge est équilibrée c.à.d.

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant l'équation (II.7) dans l'équation (II.8) on aura :

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (\text{II.10})$$

En remplaçant l'équation (II.9) dans l'équation (II.6) on aura :

$$\begin{cases} v_{an} = \frac{1}{3}(2v_{ao} - v_{bo} - v_{co}) \\ v_{bn} = \frac{1}{3}(2v_{bo} - v_{ao} - v_{co}) \\ v_{cn} = \frac{1}{3}(2v_{co} - v_{ao} - v_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} v_{ao} = v_{dc} \cdot S_a \\ v_{bo} = v_{dc} \cdot S_b \\ v_{co} = v_{dc} \cdot S_c \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Si l'état de l'interrupteur T_i tel que :

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

A partir des équations (II.10) et (II.11), on tire la matrice qui assure le passage de continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$i_{dc} = s_a \cdot i_{ach} + s_b \cdot i_{bch} + s_c \cdot i_{cch} \quad (\text{II.14})$$

II.9. Modélisation du groupe moteur – pompe

II.9.1. Modélisation de la machine asynchrone

Le stator est formé de trois enroulements fixes identiques décalés de 120° et traversés pour trois courants variables

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés de 120° ces enroulements sont en court-circuit et les tensions sont nulles

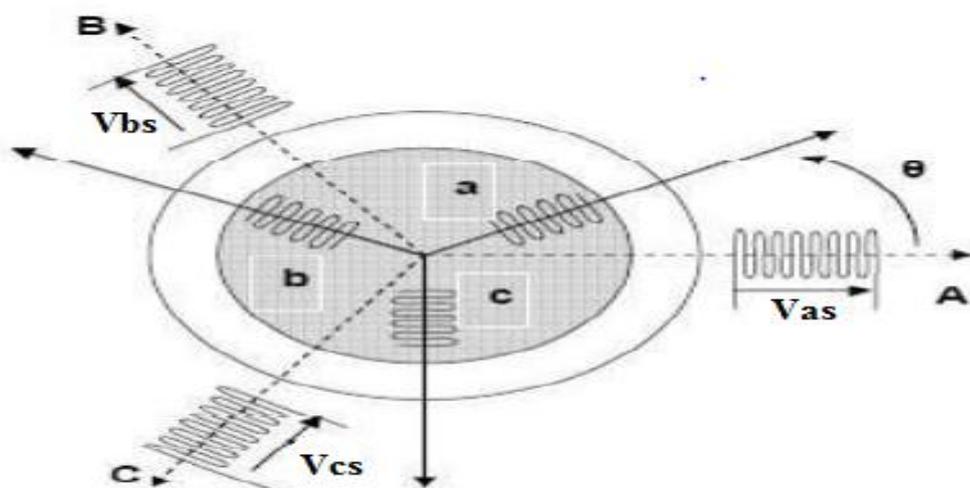


Figure II.4: Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil [22]

II.9.1.1 Equation électrique et magnétique de la MAS dans le repère (abc)

➤ Equation électriques et magnétiques

Après avoir appliqué la loi de Faraday à chaque bobinage, on peut écrire

$$v = r \cdot i + \frac{d}{dt} \phi \quad (\text{II.14})$$

Avec :

r , i , v , ϕ représente respectivement la résistance du bobinage, le courant dans le bobinage, la tension à ces bornes et le flux traversant

Les équations régissant le fonctionnement s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ v_{sc} = r_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ra} = r_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ v_{rb} = r_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ v_{rc} = r_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

Les matrices des résistances statorique rotorique

$$r_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad r_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit

$$\begin{aligned} [V_{ra}] &= 0 \\ [V_{rb}] &= 0 \\ [V_{rc}] &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II.18})$$

Sachant que les différents flux s'expriment

$$\begin{cases} \phi_{sa} = l_s i_{sa} + m_{rs}(\theta) i_{sa} \\ \phi_{sb} = l_s i_{sb} + m_{rs}(\theta) i_{sb} \\ \phi_{sc} = l_s i_{sc} + m_{rs}(\theta) i_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{cases} \phi_{ra} = l_r i_{ra} + m_{rs}(\theta) i_{ra} \\ \phi_{rb} = l_r i_{rb} + m_{rs}(\theta) i_{rb} \\ \phi_{rc} = l_r i_{rc} + m_{rs}(\theta) i_{rc} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

l_s = Inductance propre d'une phase statorique

l_r = Inductance propre d'une phase rotorique

$$\left[m_{sr} \right] = m_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta_{sr}) & \cos\left(\theta_{sr} + \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{sr} - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_{sr} - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos(\theta_{sr}) & \cos\left(\theta_{sr} + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_{sr} + \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{sr} - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos(\theta_{sr}) \end{bmatrix}$$

(II.22)

$$\left[m_{rs} \right] = \left[m_{sr} \right]^t$$

Où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique θ

➤ **Equation mécanique**

L'étude des caractéristiques de la MAS fait introduire des paramètres électriques et

Aussi des paramètres mécaniques

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m} (C_{em} - C_r - F_m \Omega_r) \tag{II.23}$$

J_m = moment d'inertie du rotor et des parties tournantes

F_m = Coefficient du frottement visqueux

C_{em} = Couple électromagnétique

C_r = Couple de charge

Ω_m = Vitesse du moteur

II.9.1.2 Application de la transformation de Park aux équations de la MAS

La transformation de Park a pour but de coupler magnétiquement le stator et cela en substituant les enroulements de phase a, b, c par deux enroulement en quadrature d'axe d et q pour des raisons de simplicité.

Nous considérons les hypothèses simplificatrices suivant :

- Les composants homopolaires sont nuls
- Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés
- La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale

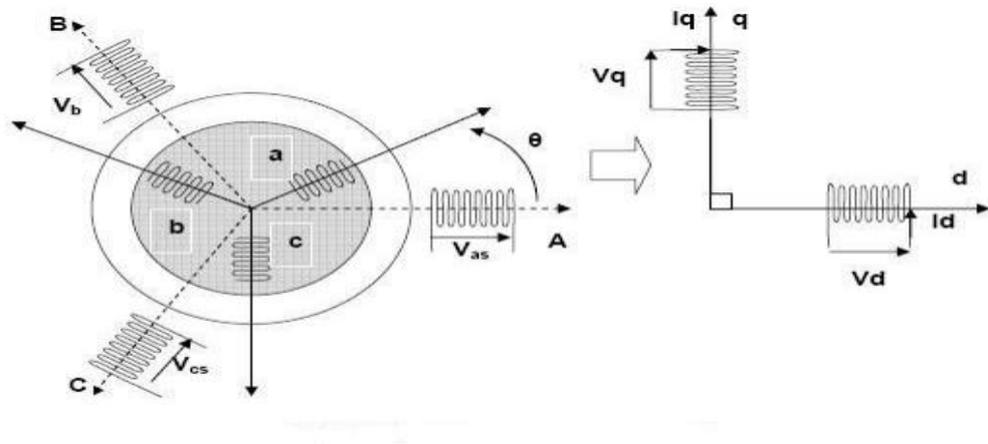


Figure II.5: Modèle de Park du moteur asynchrone [22]

En appliquant la transformation Park aux équations statorique avec un angle θ_s

➤ Equation électrique :

$$\begin{cases} v_{sd} = r_s i_{sd} - \omega_s \phi_{sq} + \frac{d[\phi_{sd}]}{dt} \\ v_{sq} = r_s i_{sq} - \omega_s \phi_{sd} + \frac{d[\phi_{sq}]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En appliquant aussi sur les équations rotorique

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 \\ v_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique direct et quadrature

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique direct et quadrature

ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Flux statorique direct et quadrature

➤ Equation magnétique

Dans le repère de Park les flux statorique et rotorique s'expriment en fonction des courants

$$\begin{cases} \phi_{sd} = l_s i_{sd} + m i_{rd} \\ \phi_{sq} = l_s i_{sq} + m i_{rq} \\ \phi_{rd} = l_r i_{rd} + m i_{sd} \\ \phi_{rq} = l_r i_{rq} + m i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & m \\ m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & m & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$l_s = l'_s + m$: Inductance cyclique statorique

$l_r = l'_r + m$: Inductance cyclique rotorique

l'_s, l'_r : Inductance de fuite statorique et rotorique

m_{sr} : mutuelle inductance

$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$: Pulsation des grandeurs statorique

ω_r : Pulsation des grandeurs rotorique

En englobe les différentes équations de la machine exprimées dans le repère dq,

On aura :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s m \\ \omega_s l_s & r_r & \omega_s m & 0 \\ 0 & -\omega_r m & r_r & -\omega_r l_r \\ \omega_r m & 0 & \omega_r l_r & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & m \\ m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & m & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

➤ Equation mécanique

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

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - F_m \Omega_m \quad (\text{II.29})$$

Le couple électromagnétique s'exprime

$$C_{em} = \frac{p.m}{l_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (\text{II.30})$$

II.9.2 Modélisation de la pompe centrifuge :

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge

$$P_{hyd} = \rho . g . h . q \quad (\text{II.31})$$

P_{hyd} = puissance hydraulique (W)

ρ = Masse volumique d'eau (1000kg/ m³)

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

h = hauteur manométrique (m)

q = Débit volumique (m³ /s)

La puissance mécanique est donnée par l'équation suivante :

$$P_{mec} = P_{hyd} \cdot \eta_{pm} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

P_{mec} = puissance mécanique (w)

η_{pm} = Rendement de la pompe

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = k_r \cdot \omega^2 \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$k_r = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad (\text{II.34})$$

Avec : P_n = puissance nominale du moteur asynchrone (w)

ω_n = vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s)

II.10 Conclusion

Afin d'avoir accès à la commande de notre système, on a réalisé dans ce chapitre la modélisation du système de pompage éolienne, et pour cela on a modélisé les différentes parties du système (la turbine, MAS à cage, convertisseurs AC/DC et DC/AC et pompe centrifuge).

III.1 Introduction

Afin d'avoir un débit réglable de la pompe, il est nécessaire d'avoir un système de contrôle du moteur asynchrone. La commande vectorielle par orientation du flux rotorique présente l'inconvénient d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine, c'est pourquoi qu'au milieu des années 80, une stratégie de contrôle direct du couple de la machine asynchrone est apparue sous le nom de DTC (Direct Torque Control), cette méthode a été proposée par I. Takahashi et Depenbrock [22].

Dans ce chapitre, nous allons proposer une commande à appliquer par DTC de la machine asynchrone, on développera le principe général du contrôle directe du couple ainsi que les caractéristique principale de cette commande, son but est de déterminer les règles de comportement des grandeurs à contrôler et la structure à contrôler, pour passée à l'élaboration de la table et l'algorithme de commande ainsi que la présentation des résultats de simulation du système sur Matlab/Simulink.

III.2 Commande de la machine asynchrone [23]

L'absence totale du découplage entre le flux et le couple dans la machine asynchrone et qui est la seule entrée électrique liée au stator, posent des problèmes difficile pour sa commande. 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 autre caractéristiques dynamique des systèmes sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéaire.

III.2.1 Commande directe du couple du moteur asynchrone

A partir les références externes telles que le couple et le flux, la DTC recherche le meilleur état de commutation de l'onduleur pour satisfaire les exigences de l'utilisateur, contrairement aux commandes classiques (vectorielle ou scalaire) qui cherchent des tensions à appliquer à la machine. Cette méthode permet de calculer les grandeurs de contrôle tel que le couple électromagnétique et le flux [24].

La commande directe du couple (DTC) à pour objectif la régulation directe du couple de la machine, par la sélection d'un vecteur parmi les huit vecteurs tensions délivrés par l'onduleur pour calculer le couple et le flux après la détermination des composantes du vecteur flux statorique, soit par observation soit par estimation en intégrant les tensions statorique. A partir des courants statorique mesurés on peut déterminer le couple

électromagnétique. Pour définir le sens d'évolution souhaitée pour le couple, nous avons calculé son erreur instantanée et l'appliquée à un régulateur à hystérésis double bande qui va générer à sa sortie une variable à trois niveaux (-1, 0, 1). Par la suite, nous avons appliqué l'erreur du flux statorique après avoir calculé son module à partir des valeurs de ses coordonnées à un régulateur à hystérésis de bande unique qui va fournir une variable linéaire, définissant l'évolution du flux souhaité. L'avantage principal de la commande DTC est d'avoir une réponse dynamique rapide une mise en œuvre simple sans avoir recourt à des capteurs mécaniques, cependant elle présente des problèmes pour les faibles vitesses et la nécessité d'avoir des estimateurs du flux statorique et du couple électromagnétique [25].

III.2.2 Partitionnement algorithmique de la commande [26]

En vue de cette première description de la commande, un partitionnement algorithmique a pu s'opérer naturellement. En effet, on retrouve bien le groupement par blocs et sous blocs algorithmiques, tel que :

- ✓ Bloc de traitement : composé des sous –blocs algorithmique de la transformée de Park (conversion de modèle triphasés en modèles biphasés).
- ✓ Bloc d'estimations : composée des sous –blocs algorithmiques de calcul de flux et de couple ainsi que l'estimation de position sectorielle du flux.
- ✓ Bloc de régulation : composé des sous-blocs algorithmiques des deux comparateurs à hystérisais.
- ✓ Bloc de modulation : composé d'un seul sous –bloc algorithmique de table logique de commutation.

III.2.3 Caractéristique principale de la commande directe du couple [3]

Afin de réduire les oscillations du couple provoquée par les régulateurs à hystérésis, il est recommandé d'utiliser une fréquence de calcul élevé dans la commande (DTC). Cette méthode est caractérisée par l'obtention des flux et des courant statoriques proches de formes sinusoïdal, d'une très bonne dynamique de la machine, la commande indirecte des intensités et tensions du stator de la machine, ainsi que, la commande directe du couple et du flux à partir de la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.

L'utilisation de ce type de commande est évidemment liée aux avantages et aux inconvénients cité par suite :

- **Avantage :**
 - ✓ Absence de calculs dans le repère rotorique (d, q) et donc l'utilisation d'une matrice de rotation ;
 - ✓ Absence de bloc de calcul de modulation de tension MLI ;
 - ✓ Pas d'obligation de découplage des courants par rapport aux tensions de commande comme dans le cas de la commande vectorielle ;
 - ✓ Présence d'un seul régulateur, celui de la boucle externe de vitesse ;
 - ✓ Pas d'obligation de connaître avec une grande précision la position rotorique car seule l'information sur le secteur dans lequel se trouve le vecteur du flux statorique est nécessaire ;
 - ✓ Très bonne réponse dynamique.

La mesure de la vitesse de l'arbre n'est pas nécessaire, ce qui est un grand avantage de cette méthode.

- **Inconvénients:**
 - ✓ Problèmes de commande à basse vitesse ;
 - ✓ Nécessité de disposer d'estimations du flux statorique et du couple ;
 - ✓ Existence d'oscillations de couple ;
 - ✓ Fréquence de commutations non constantes (utilisation de régulateurs à hystérésis).

Cela conduit à un contenu harmonique riche augmentant les pertes, les bruits acoustiques et les oscillations du couple qui peuvent exciter des résonances mécaniques.

III.2.4 Fonctionnement et séquences d'un onduleur de tension

Un onduleur de tension triphasé permet d'attendre sept positions distinctes dans le plan de phase, correspondant aux huit séquences de la tension de sortie. On cherche alors à contrôler le flux et le couple via le choix de vecteur de tension qui se fera par une possibilité pour le vecteur V_s [27].

L'équation électrique aux bornes de la machine peut s'écrire en fonction les différentes vecteurs tensions, courant et flux, sous la forme suivante : [3]

$$v_s = R_s I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad \text{(III.1)}$$

En utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs, le vecteur de tension peut s'écrire : [28]

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} [S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}}] \quad \text{(III.2)}$$

On développant le vecteur de tension V_s , la relation entre les tensions réelles (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et les variables booléennes (S_a, S_b, S_c) s'écrit sous forme suivante : [31]

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(III.3)}$$

On peut lier les tensions réelles (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) aux tensions dans le plan (α, β) en utilisant la transformé de concordai par la relation suivante : [28]

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.4)}$$

Les différentes combinaisons des 3 grandeurs (S_a, S_b, S_c) permettent de générer huit positions du vecteur V_s , sont tous actifs sauf V_0, V_7 qui sont nul.

La représentation vectorielle de chaque vecteur dans le plan (α, β) est donnée par la figure suivante :

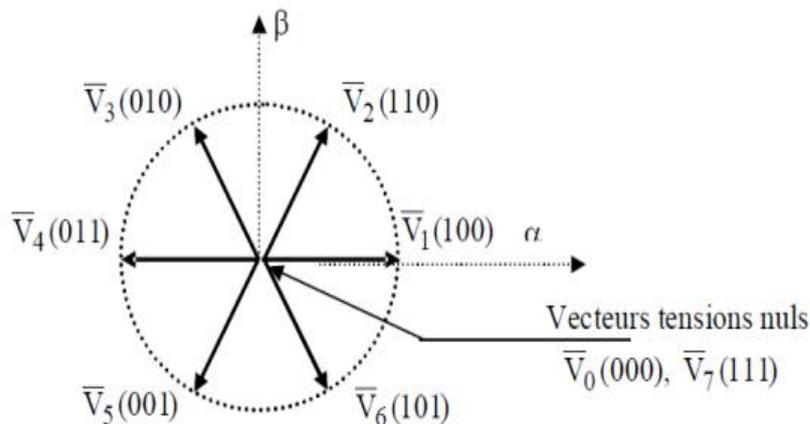


Figure III.1: Représentation des vecteurs tensions générés par l'onduleur [19]

Les vecteurs de tension atteignable en fonction de l'état des interrupteurs sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

N	S _a	S _b	S _c	V _a	V _b	V _c	V _s	V _d	V _q
0	0	0	0	0	0	0	V ₀	0	0
1	1	0	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	V ₁	$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{dc}$	0
2	1	1	0	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	V ₂	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
3	0	1	0	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	V ₃	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
5	0	0	1	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{U_{dc}}{3}$	$\frac{2U_{dc}}{3}$	V ₅	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
6	1	0	1	$\frac{U_{dc}}{3}$	$-\frac{2U_{dc}}{3}$	$\frac{U_{dc}}{3}$	V ₆	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{U_{dc}}{\sqrt{2}}$
7	1	1	1	0	0	0	V ₇	0	0

Tableau III.1 : Calcul des vecteurs de tension [28]

Nous pouvons maintenant définir le vecteur de tension équivalent dont le module et l'argument sont données par les formules suivantes : [28]

$$V_n = \sqrt{V_{sd}^2(n) + V_{sq}^2(n)} \tag{III.5}$$

$$\arg(V_n) = \tan^{-1} \frac{V_{sq}(n)}{V_{sd}(n)} \tag{III.6}$$

A partir de ces deux équations, on détermine la position et le module de chaque vecteur, les calculs du module et de l'argument sont donnés dans le tableau ci-dessous :

V _n	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇
Module	0	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$	$dc\sqrt{2/3}$		0
Argument	0	0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	π	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3}$	0

Tableau III.2 : Module et argument de chaque vecteur tension

III.2.5 Stratégie de commande directe du flux et du couple

III.2.5.1 Principe du contrôle du flux statorique [29]

Le contrôle direct du couple est basé sur l'orientation du flux statorique. L'expression du flux statorique dans le référentielle lié au stator de la machine est obtenue par l'équation suivante :

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \Rightarrow \phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s \cdot I_s) dt + \phi_s(0) \quad \text{(III.7)}$$

Pendant une période de contrôle $[0 ; T_e]$, correspondant à la période d'échantillonnage T_e l'expression (III.7) peut s'écrire comme suit :

$$\phi_s(t) = \phi_s(0) + V_s T_e - R_s \int_0^{T_e} I_s \cdot dt \quad \text{(III.8)}$$

Où : $\phi_s(0)$ est le vecteur flux à l'instant $t=0$.

On considère la chute de tension $(R_s \cdot I_s)$ négligeable devant la tension V_s ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée, en applique un vecteur de tension non nul à la machine. On obtient :

$$\phi_s(t) = \phi_s(0) + V_s T_e \Rightarrow \Delta\phi_s = V_s T_e \quad \text{(III.9)}$$

La figure qui suit montre l'extrémité du vecteur flux statorique $\phi_s(t)$ qui se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliquée V_s

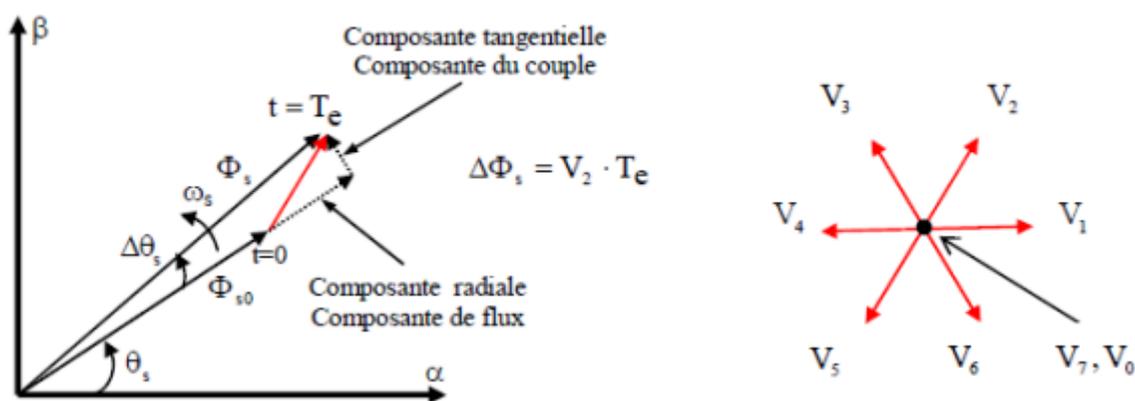


Figure III. 2: Exemple de l'évolution de l'extrémité de ϕ_s pour $R_s \cdot I_s$ Négligeable

$$(V_s = V_2) \text{ [19]}$$

Pour régler le flux on applique un vecteur tension parallèle à ϕ_s et de même sens (respectivement de sens opposé). La variation du flux donne deux composantes, composante du flux qui change son amplitude et le composante du couple qui change sa position [29].

III.2.5.2 Principe de contrôle du couple électromagnétique [3]

Les équations électriques de la machine asynchrone peuvent être exprimées, en grandeurs vectorielles dans le référentiel lié au stator, de la manière suivante :

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad \text{(III.10)}$$

$$V_r = 0 = R_r \cdot I_r + \frac{d\phi_r}{dt} - j\omega\phi_r \quad \text{(III.11)}$$

Le courant rotorique s'écrit :

$$I_r = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\phi_r}{L_r} - \frac{M}{L_s L_r} \phi_s \right) \quad \text{(III.12)}$$

Les équations deviennent :

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad \text{(III.13)}$$

$$\frac{d\phi_r}{dt} + \left(\frac{1}{\sigma\tau_r} - j\omega \right) \phi_r \quad \text{(III.14)}$$

Ces relations montrent que :

- ✓ Le contrôle du vecteur ϕ_s est possible à partir du vecteur V_s , à la chute de tension $R_s I_s$ près.
- ✓ Le flux ϕ_r suit les variations de ϕ_s avec une constante de temps $\sigma\tau_r$.

En régime permanent, l'équation (III.14) s'écrit :

$$\phi_r = \frac{M}{L_s} \frac{\phi_s}{1 - j\omega\sigma\tau_r} \quad \text{(III.15)}$$

En posant $\gamma = (\phi_s \wedge \phi_r)$, le couple s'exprime sous la forme suivante :

$$T_{em} = p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_s \phi_r \sin \gamma \quad \text{(III.16)}$$

Le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs ϕ_s et ϕ_r et de leur position relative. De ce fait, si on parvient à contrôler parfaitement le flux ϕ_s (à partir de V_s) en module et en

position, on peut alors contrôler l'amplitude de la position relative de ϕ_r et donc contrôler le couple, à condition que la période de commande T_e de la tension V_s est telle que $T_e < \sigma \tau_r$ [3].

III.3 choix de la séquence de commande [3]

Le choix de vecteur de tension statorique V_s , dépend de la variation souhaité pour le module de flux ϕ_s , de l'évolution souhaitée pour le couple et du sens de rotation ϕ_s . L'espace d'évolution de $\overline{\phi_s}$ dans le référentiel (α, β) lié au stator est divisé en six secteurs angulaires $(\frac{\pi}{3})$. Lorsque le flux (ϕ_s) se trouve dans une zone $i = (1 \dots 6)$, le contrôle du flux et le couple peut être assuré en sélectionnant l'un des vecteurs tensions suivant :

- Si V_{i+1} est sélectionné alors ϕ_s croit et C_{em} croit,
- Si V_{i-1} est sélectionné alors ϕ_s décroît et C_{em} décroît,
- Si V_{i+2} est sélectionné alors ϕ_s décroît et C_{em} croit,
- Si V_{i-2} est sélectionné alors ϕ_s décroît et C_{em} décroît.

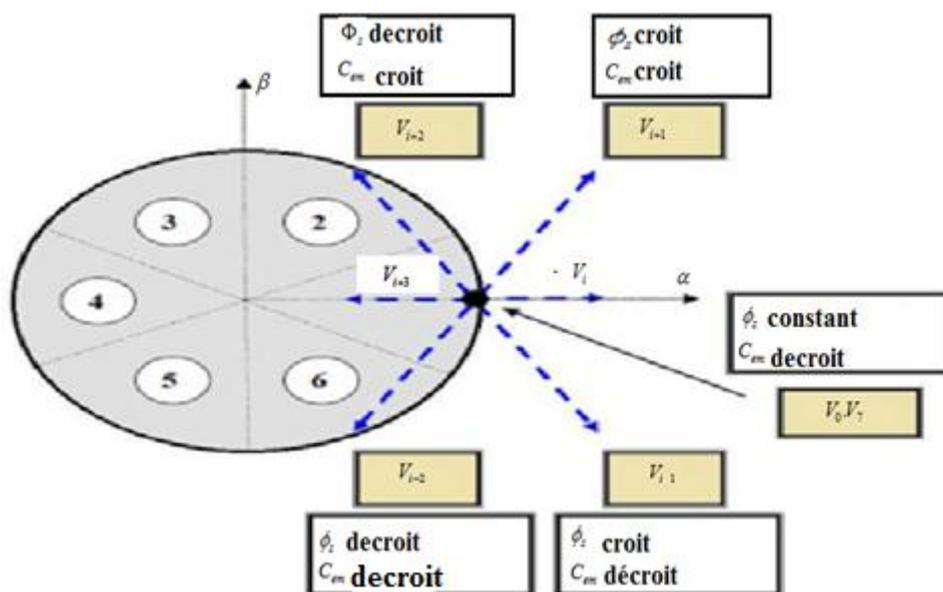


Figure III. 3: Sélection du vecteur tension

Quel que soit le sens d'évolution du couple ou du flux, dans une zone de position $N=i$, les deux vecteurs tensions V_i et V_{i+3} ne sont jamais utilisés. Ce qui signifie que lors du déplacement du flux ϕ_s sur une zone $N=i$, un bras de l'onduleur ne commute jamais et permet ainsi de diminuer la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs du convertisseur. [30]

III.4 Estimateurs

III.4.1 Estimation du flux statorique [24]

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de la machine.

A partir de l'équation :

$$\Phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_i I_s) dt \quad \text{(III.17)}$$

On obtient les composantes d et q du vecteur flux statoriques Φ_s :

$$\Phi_{sd}(t) = \int_0^t (V_{sd} - R_i I_{sd}) dt \quad \text{(III.18)}$$

$$\Phi_{sq}(t) = \int_0^t (V_{sq} - R_i I_{sq}) dt \quad \text{(III.19)}$$

On obtient les composantes V_{sd} et V_{sq} , à partir de la tension d'entrée de l'onduleur U_{dc} , et des états de commande (S_a, S_b, S_c) [31] et en appliquant la transformation de parc liée au stator :

$$V_s = V_{sd} + jV_{sq} \quad \text{(III.20)}$$

D'où :

$$V_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c)) \quad \text{(III.21)}$$

$$V_{sq} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{dc} (S_b - S_c) \quad \text{(III.21)}$$

Les courants i_{sd} et i_{sq} , sont également obtenus à partir des courants réels i_{sa} , i_{sb} et i_{sc}

$$I_s = I_{sd} + jI_{sq} \quad \text{(III.22)}$$

$$I_{sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa} \quad \text{(III.23)}$$

$$I_{sq} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \quad \text{(III.24)}$$

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes Φ_{sa} et $\Phi_{s\beta}$, par :

$$\phi_s = \sqrt{\phi_{sd}^2 + \phi_{sq}^2} \tag{III.25}$$

L'angle α_s entre le référentielle statorique et le vecteur flux ϕ_s est égal à :

$$\alpha_s = \arctg\left(\frac{\phi_{sd}}{\phi_{sq}}\right) \tag{III.26}$$

III.4.2 Estimation du couple électromagnétique

Le couple électromécanique peut être estimé à partir des flux estimés, et des courants statorique mesurés, et qui peut se mettre sous la forme suivante : [31]

$$T_{em} = p (\phi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \phi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}) \tag{III.27}$$

On peut remarquer dans cette équation que l'exactitude de cette dernière dépend de la qualité d'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants statorique.

III.5 Correction de flux statorique et du couple électromagnétique

III.5.1 Correcteur de flux

La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de ϕ_s , afin de sélectionner le vecteur tension correspondant. Pour cela, un simple correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adapté à la commande étudiée, et qui permet d'obtenir de très bonnes performances dynamiques (Figure (III.4)). La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne Cflx indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée (Cflx = 1) ou diminuée (Cflx = 0) de façon à maintenir : $|\phi_{s-ref} - \phi_s| < \Delta\phi_s$ avec ϕ_{s-ref} la consigne de flux et $\Delta\phi_s$ l'écart d'hystérésis du contrôleur [30].

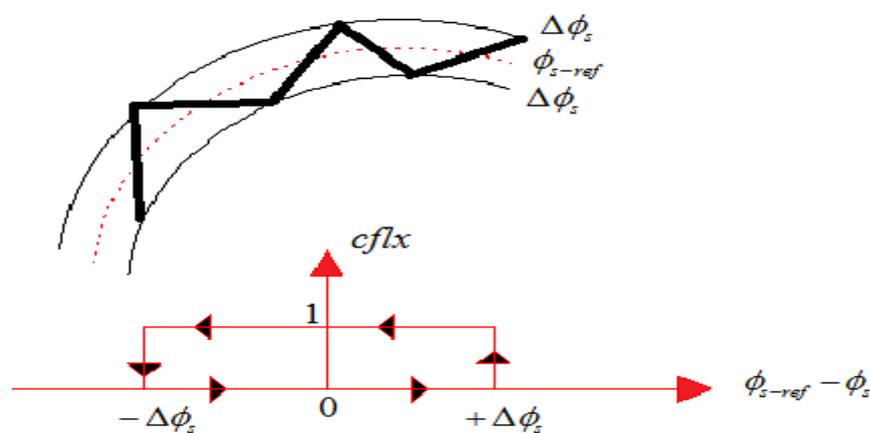


Figure.III.4: Contrôleur à hystérésis à deux niveaux.

III.5.2 Correcteur de couple

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites $|C_{em-ref} - c_{em}| < \Delta C$, avec C_{em-ref} la référence de couple et ΔC la bande d’hystérésis du correcteur. La machine peut être contrôlée dans les deux sens de rotation, soit pour un couple positif ou négatif grâce à un correcteur à trois niveaux, la sortie de ce dernier représentée par la variable booléenne indique directement si $C_{cpl} = 1$, le couple est inférieur à la limite inférieure de la bande et il faut donc l’augmenter, le ‘autre part le couple est à l’intérieur de la bande si $C_{cpl} = 0$ donc il faut le maintenir. Dans le cas ou $C_{cpl} = -1$, le couple est supérieur à la limite supérieure de la bande donc il faut le diminuer [32].

Ce choix d’augmenter le nombre de niveaux est proposé afin de minimiser la fréquence de commutation moyenne, car la dynamique de couple est généralement plus rapide que celle du flux [24].

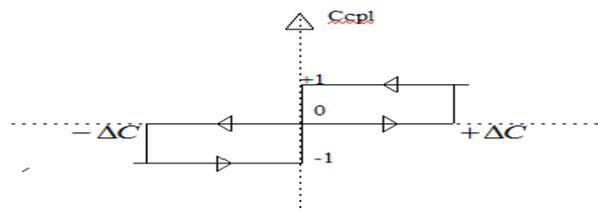


Figure.III.5: Correcteur de couple à trois niveaux

III.6. Elaboration de la table de commande

La table de commutation permet de définir le vecteur qu’il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteur et la position du vecteur flux statorique. La table de commande est construite en fonction de l’état des variables (C_{flx} et C_{cpl}) et des zones S de position ϕ_s , comme le montre le tableau suivante :

Comparateur du flux	Comparateur du couple	Secteur					
		1	2	3	4	5	6
$C_{flx} = 1$	$C_{cpl}=1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$C_{cpl}=0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	$C_{cpl}=-1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
$C_{flx} = 0$	$C_{cpl}=1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$C_{cpl}=0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	$C_{cpl}=-1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Tableau III. 3: Table de commutation [3]

La formulation de sélection des vecteurs tensions V_{i+1} , V_{i-1} , V_{i+2} et V_{i-2} , correspondant à une zone de fonctionnement S_i , comme il est montré dans la table précédente.

En sélectionnant l'un des deux vecteurs nuls V_0 ou V_7 , la rotation du flux ϕ_s est arrêtée et entraîne une décroissance du couple électromagnétique. On choisit alternativement V_0 ou V_7 de manière à minimiser le nombre de commutation sur l'onduleur [30].

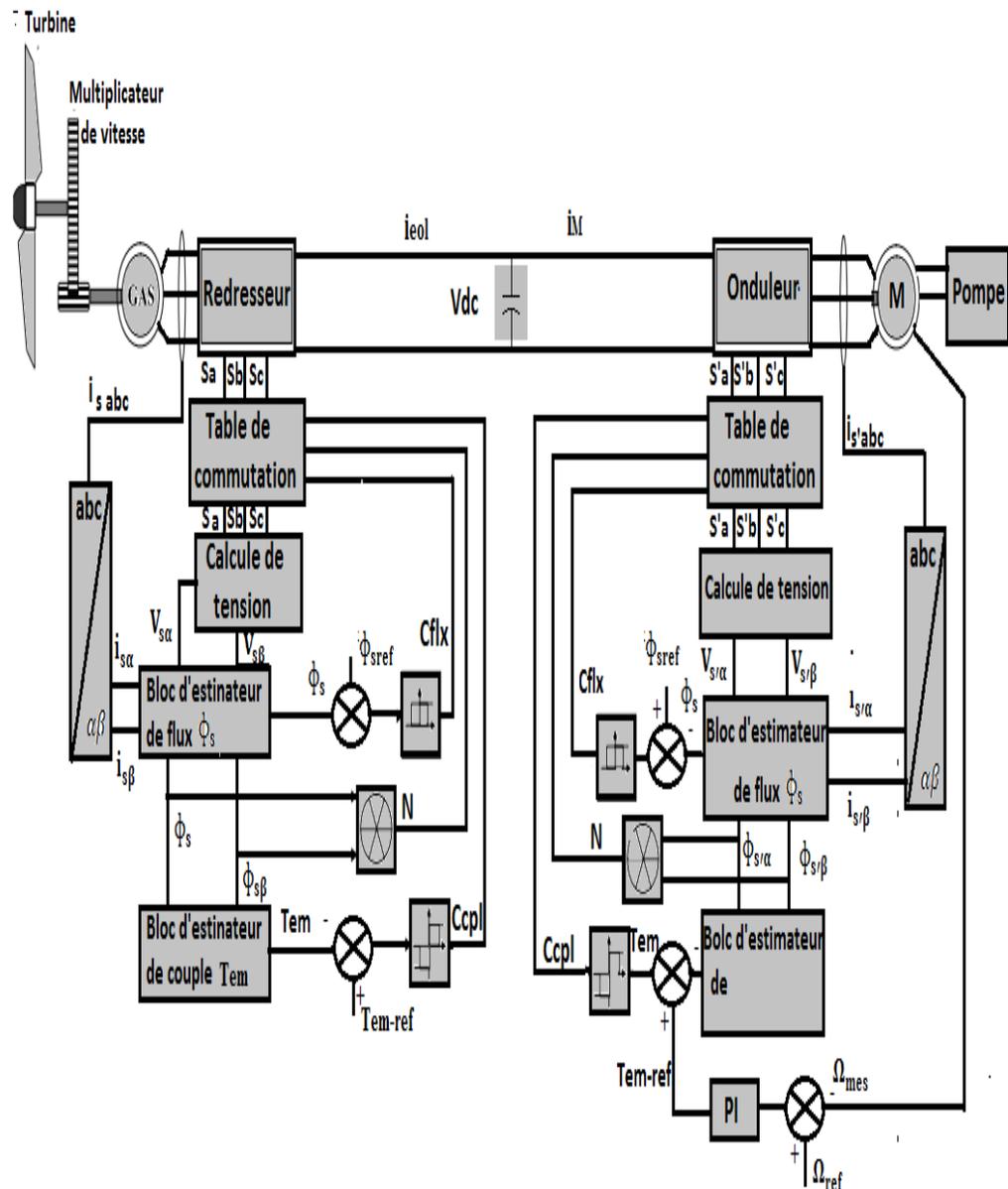


Figure III.6: Structure générale du contrôle direct du couple (DTC)

III.7 Résultats de simulation

III.7.1 Fonctionnement générateur

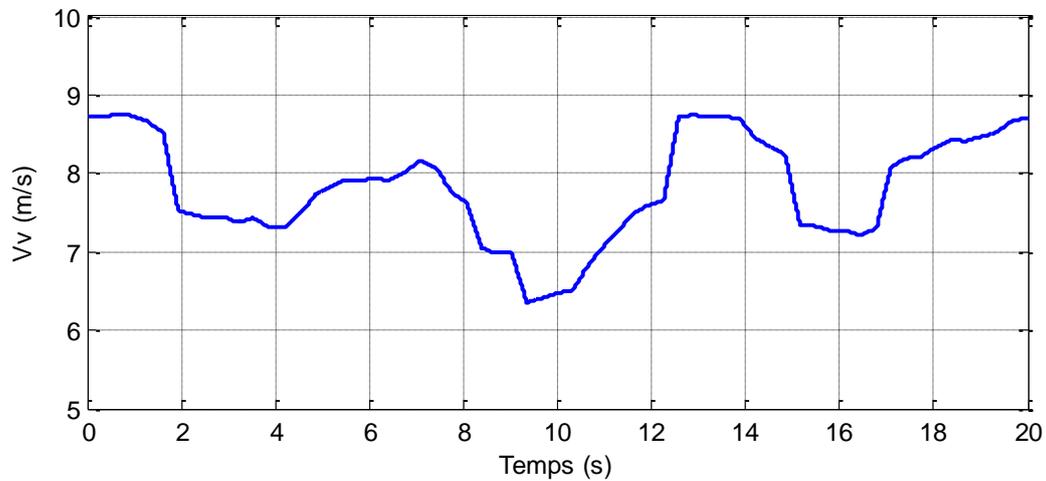


Figure. III.7 : Allure de la vitesse du vent

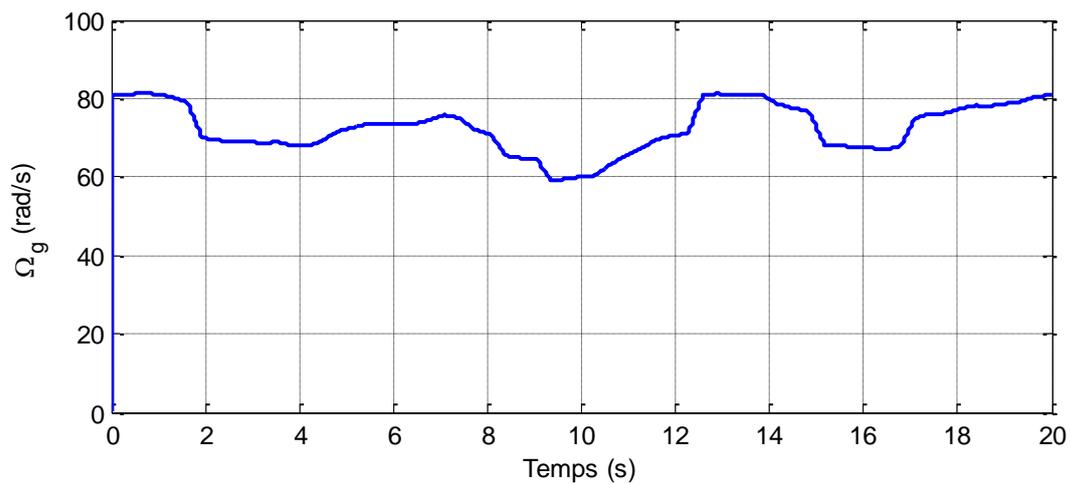


Figure III.8 : Allure de la vitesse de la génératrice

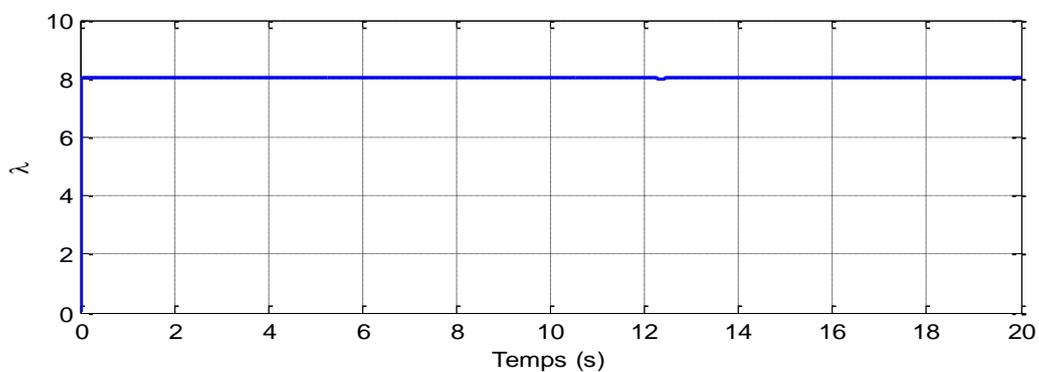


Figure III.9 : Allure de la vitesse au bout des pales

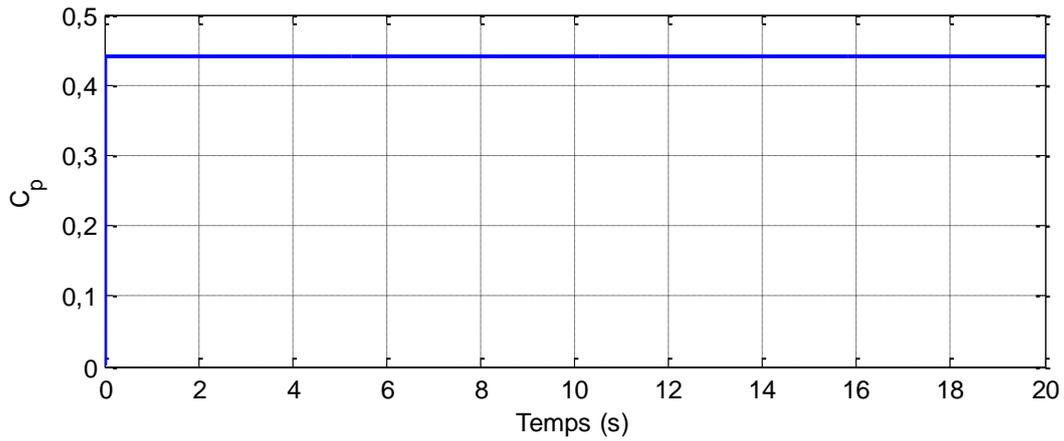


Figure III.10 : Allure du coefficient de puissance

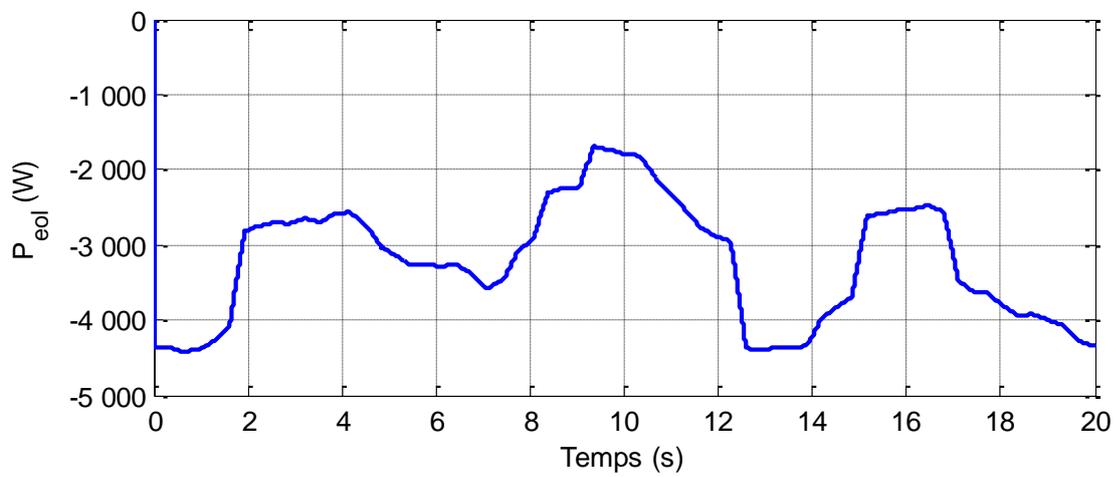


Figure III.11: Allure de la puissance éolienne

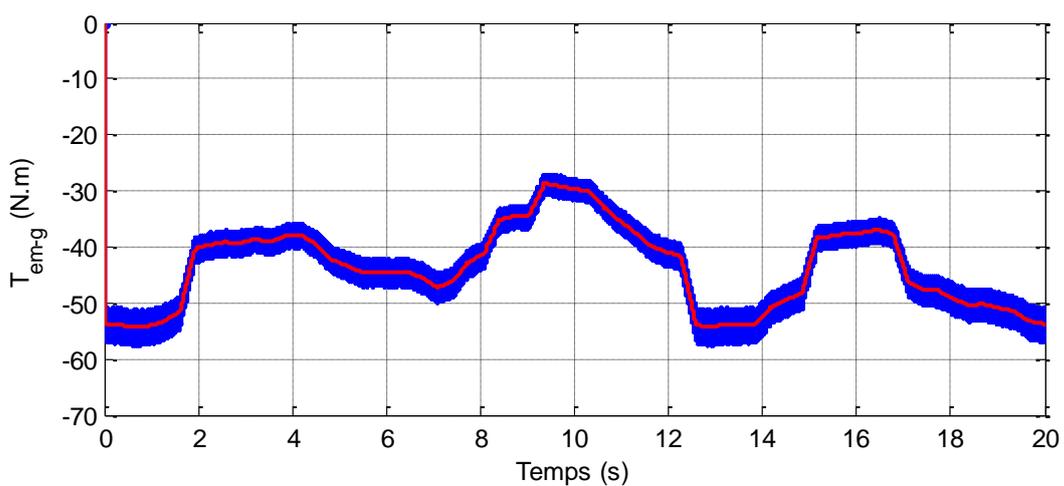


Figure III.12: Allure du couple électromagnétique

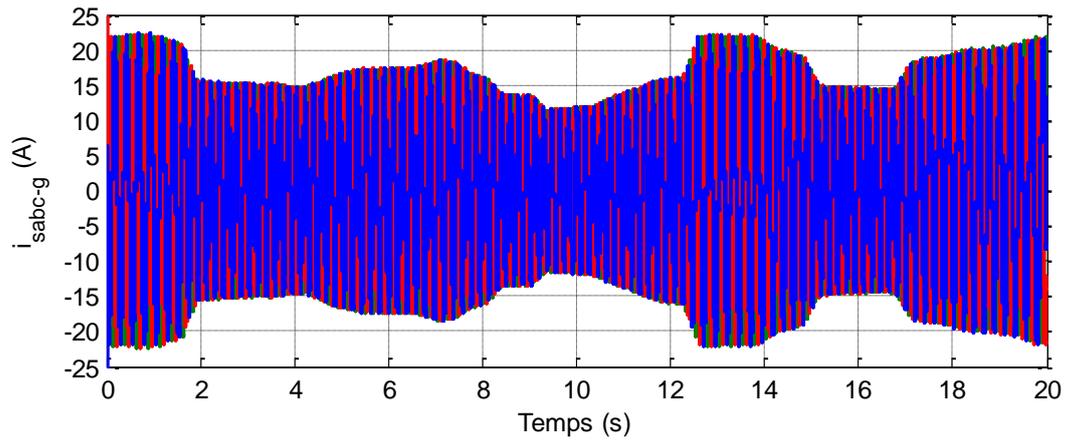


Figure III.13: Allure des courants statoriques

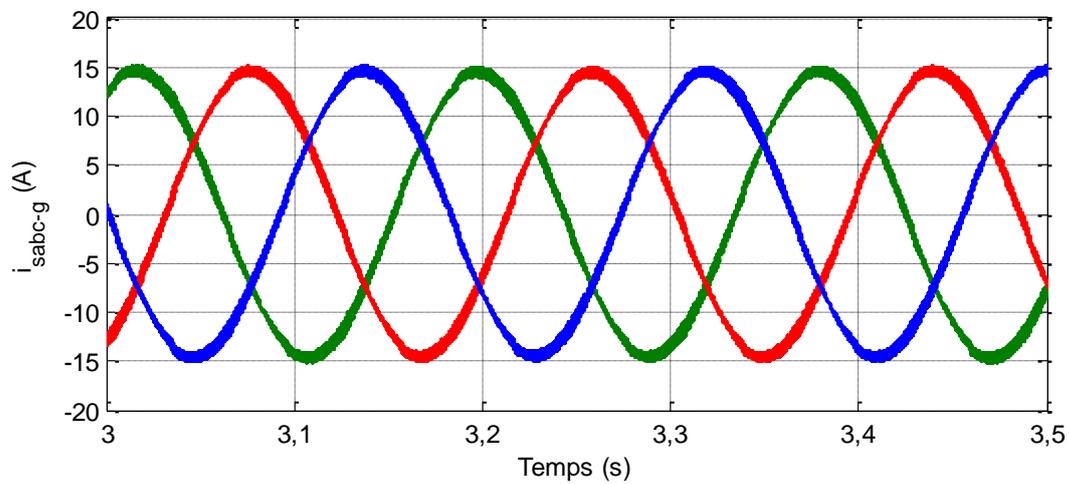


Figure III.14 : zoom sur les courants statoriques dans l'intervalle [3 3.5]

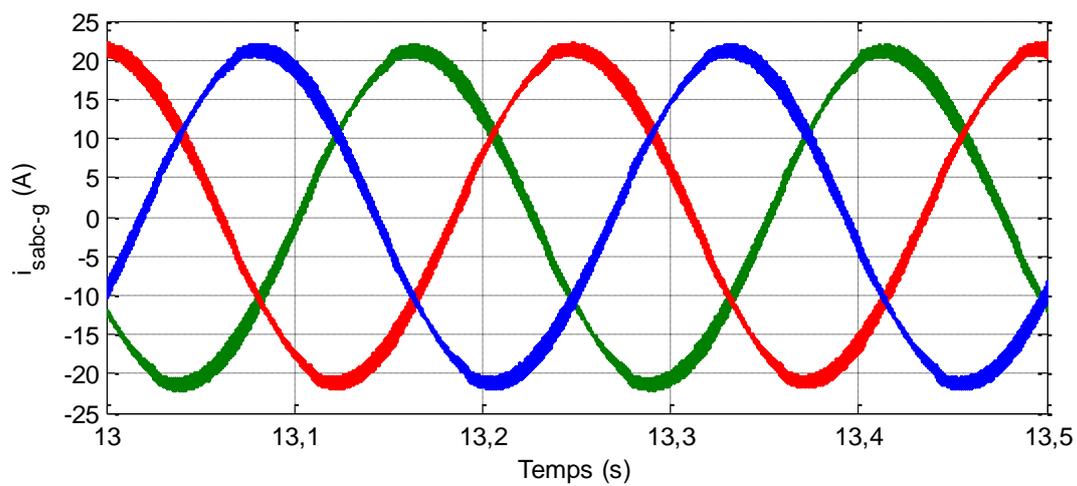


Figure III.15: zoom sur les courants statoriques dans l'intervalle [13 13.5]

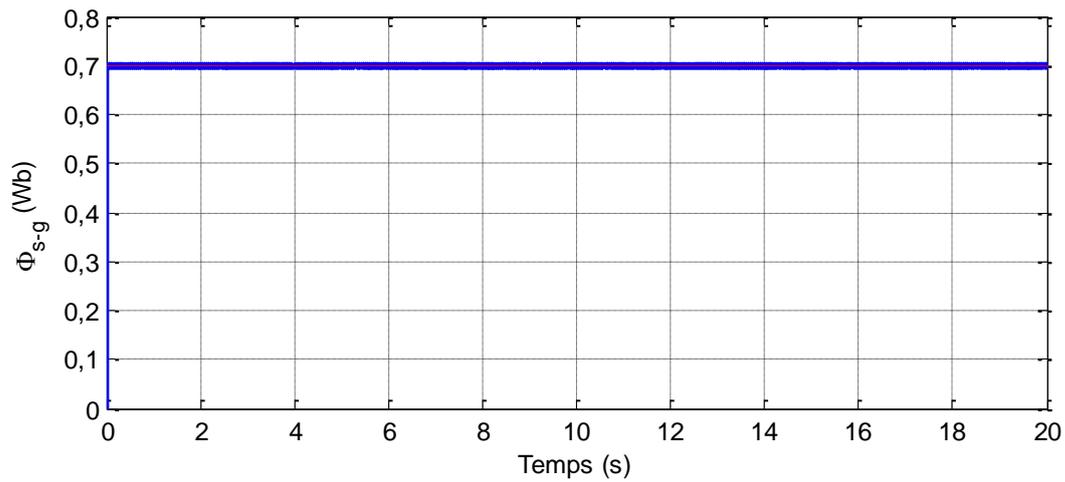


Figure III.16 : Allure du flux statorique

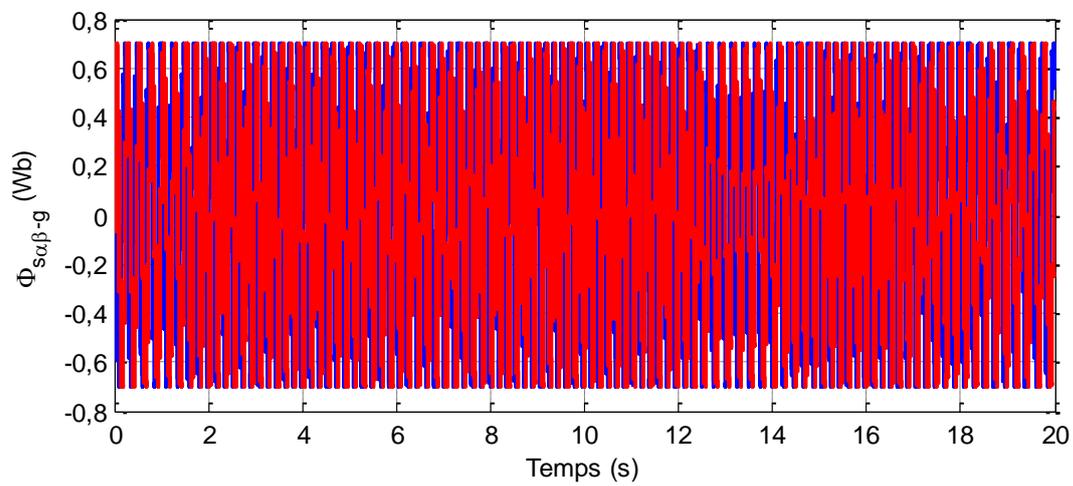


Figure III.17 : Allure des flux statoriques Alpha_Beta

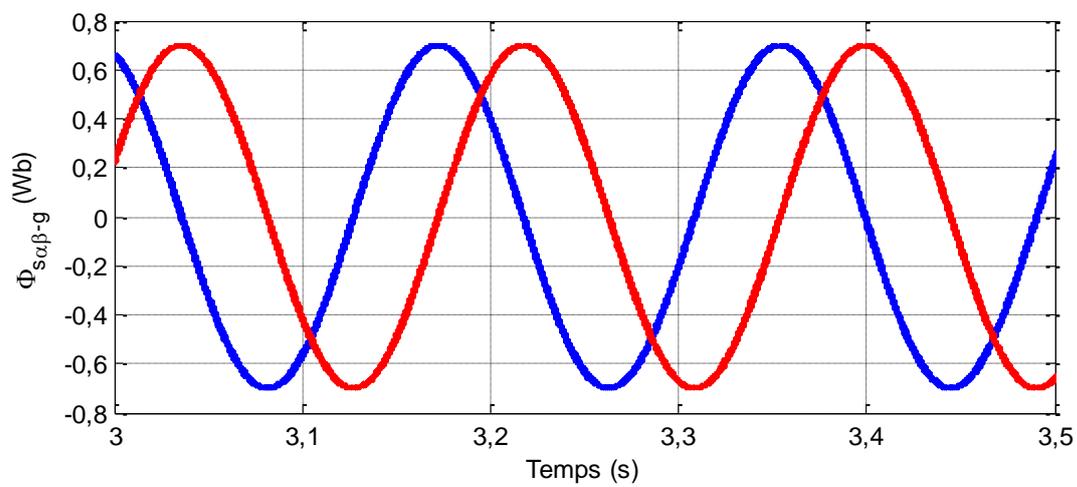


Figure III.18 : zoom sur les flux statoriques Alpha_béta

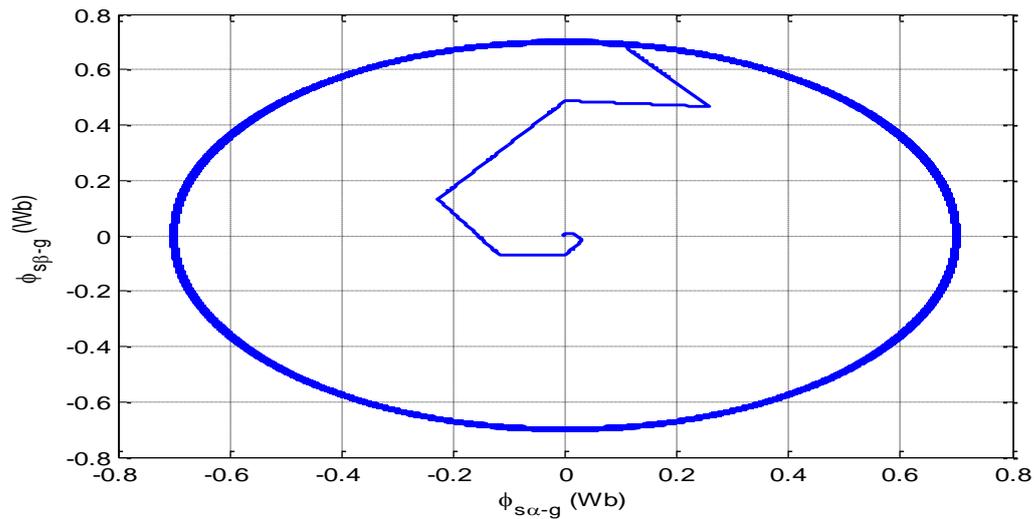


Figure III.19 : L'évolution du flux statorique

III.7.2 Fonctionnement moteur

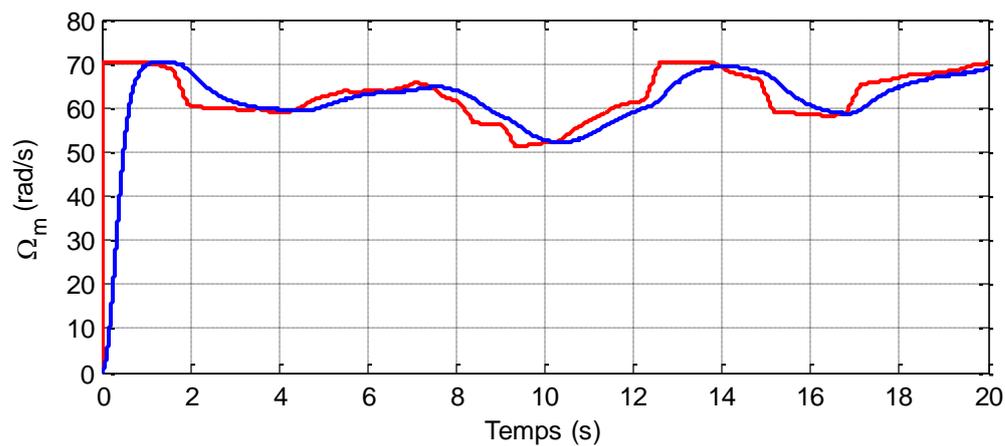


Figure III.20: L'allure de la vitesse du moteur

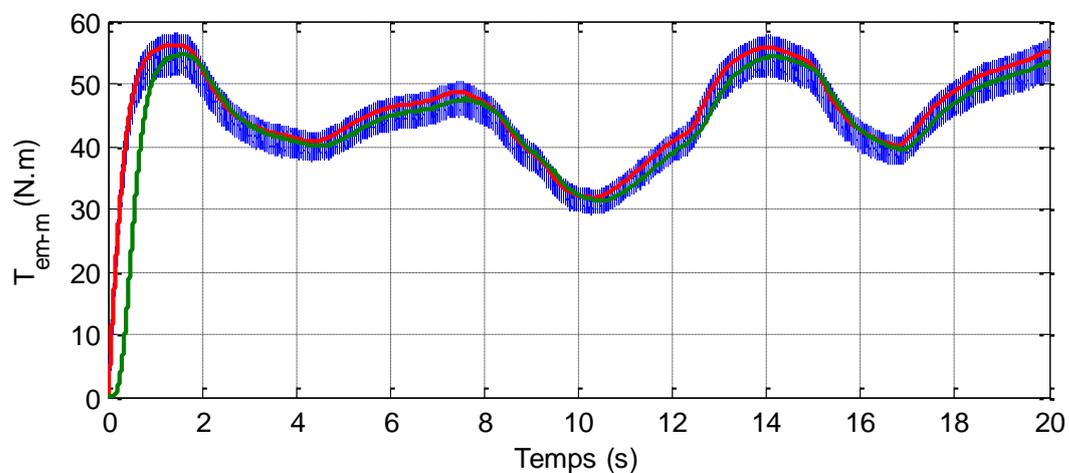
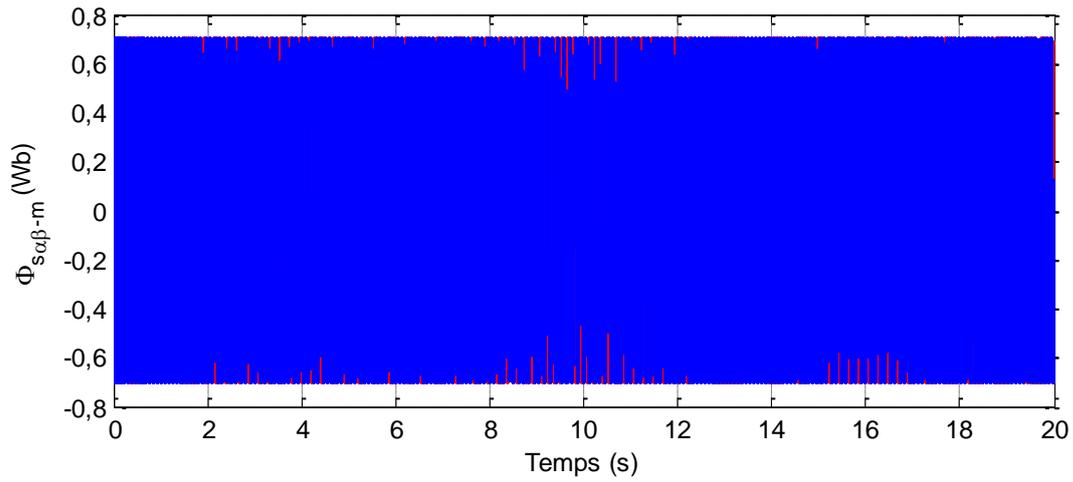
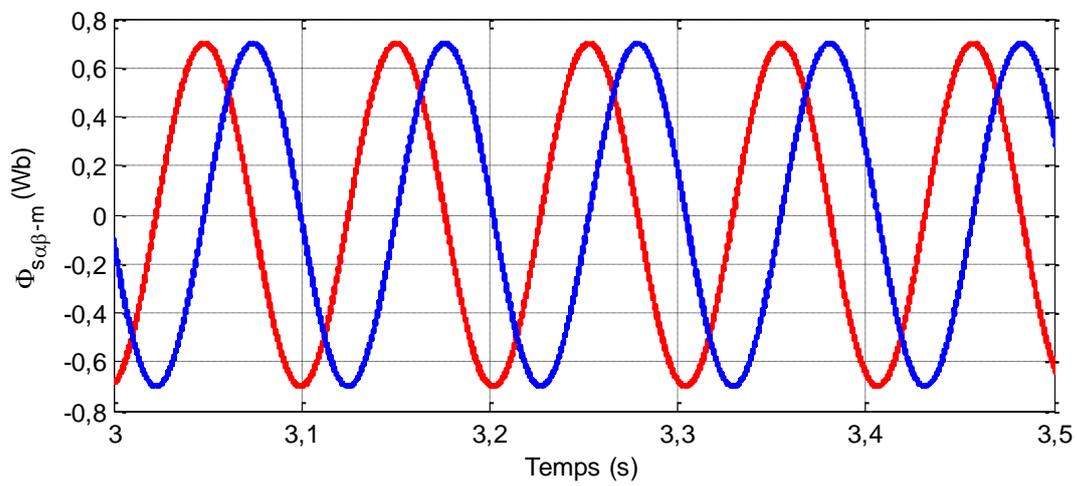
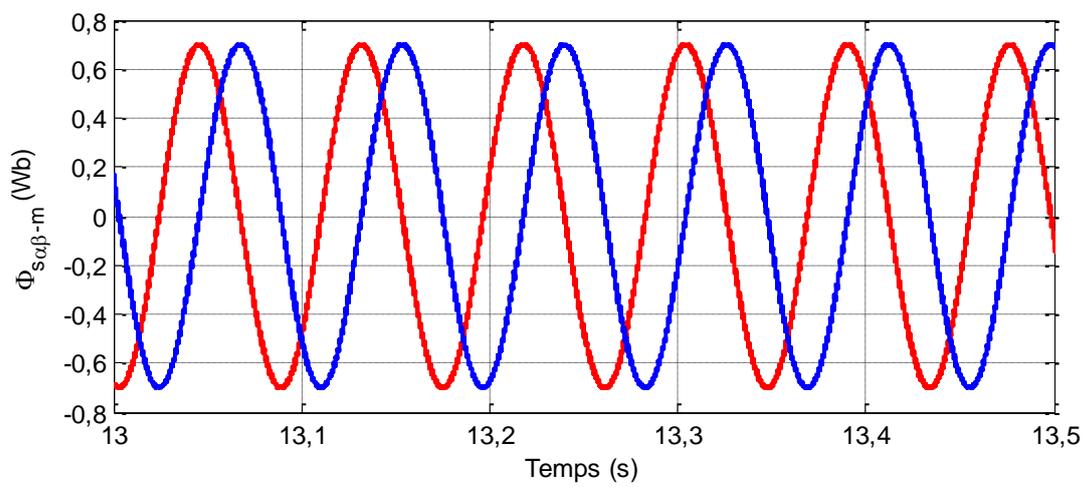


Figure III.21: L'allure du couple électromagnétique et du couple résistant

**Figure III.22:** Allure du flux statorique alpha beta**Figure III.23:** Zoom sur le flux statorique**Figure III.24:** Zoom sur le flux statorique

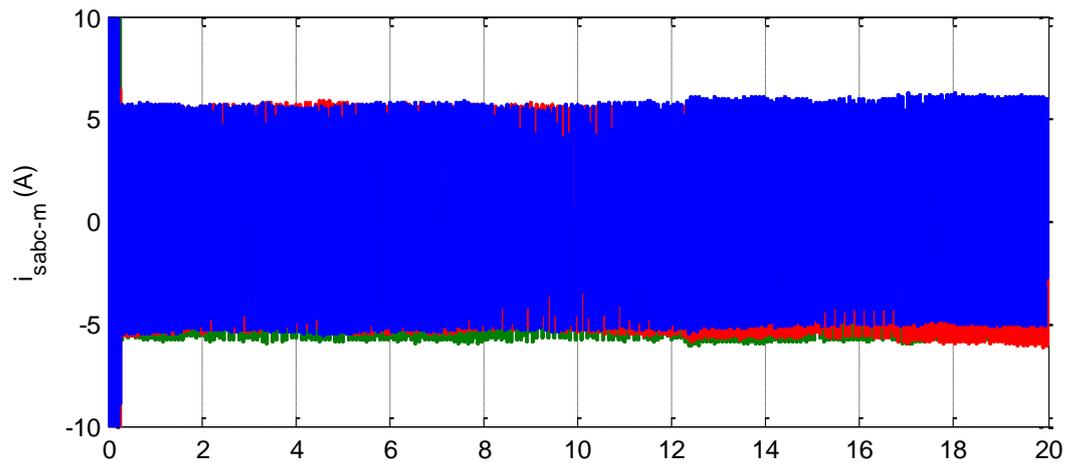


Figure III.25: L'évolution des courants statorique

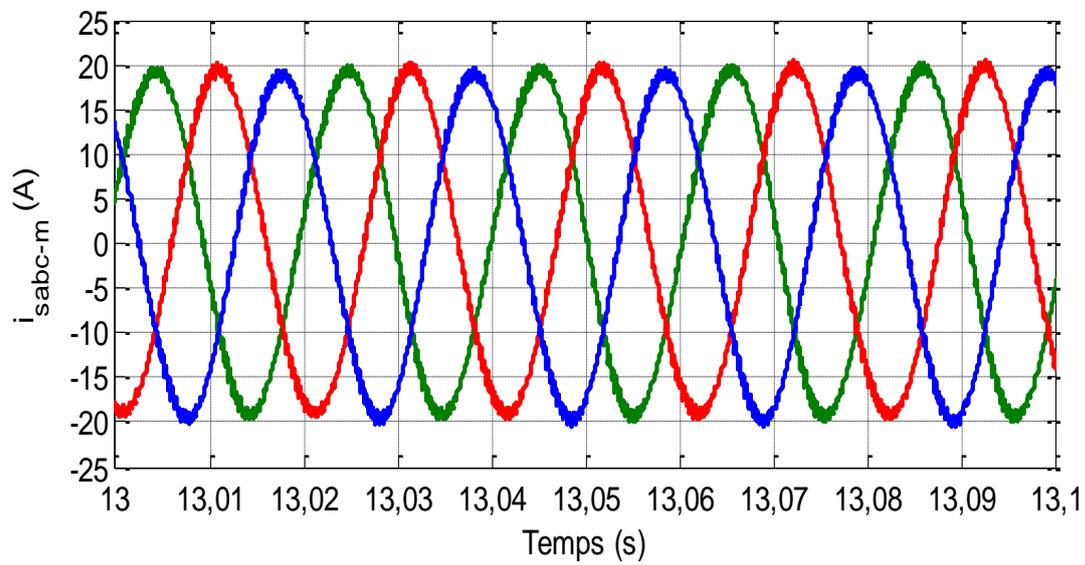


Figure III.26 : Zoom des courants statoriques

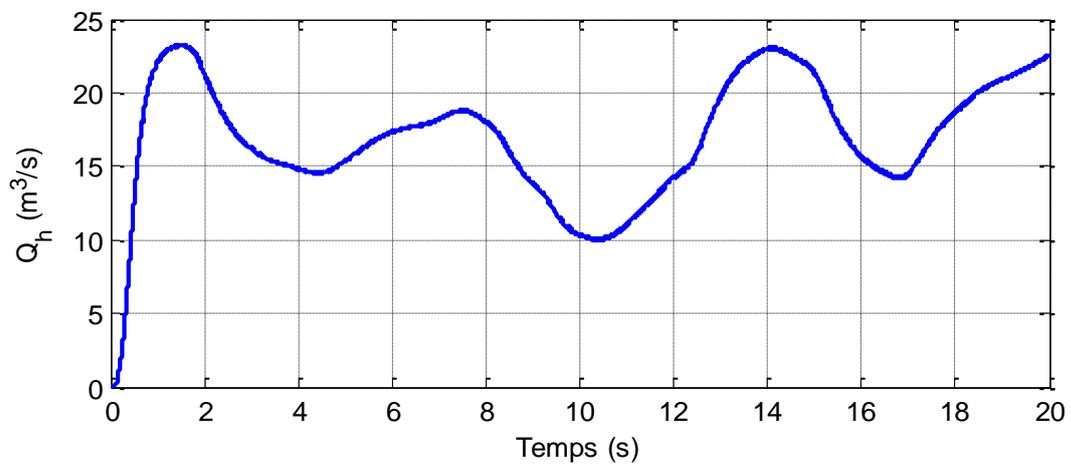


Figure III.27 : L'allure du débit

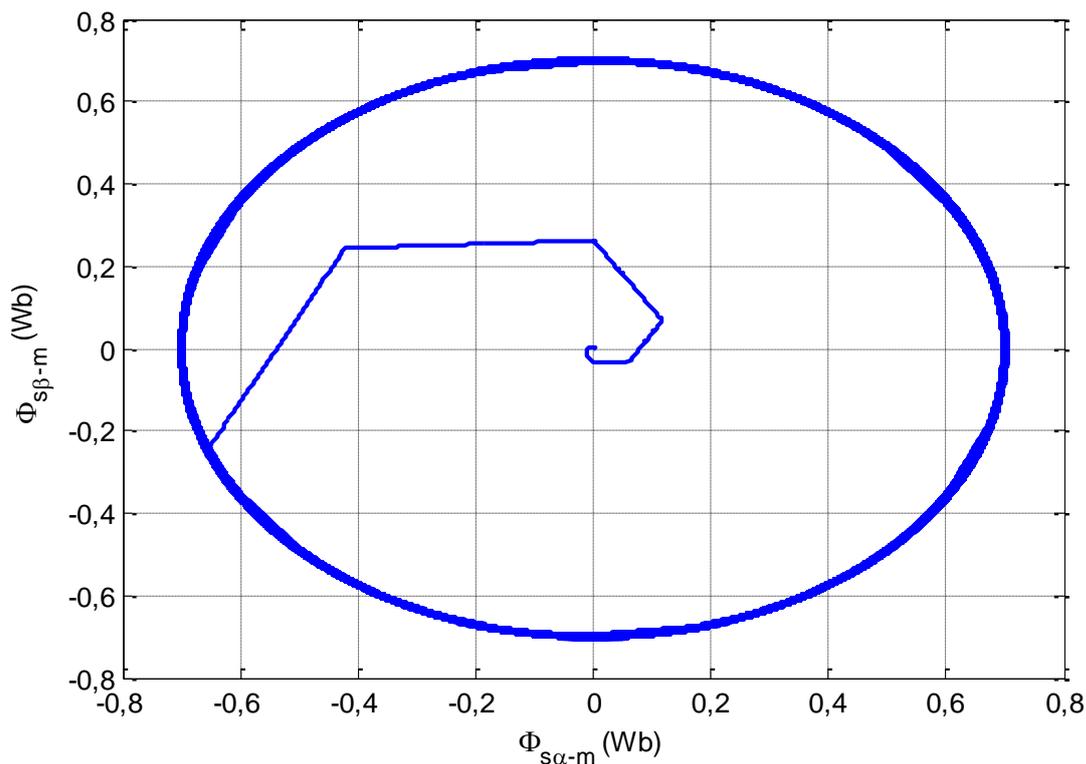


Figure III.28 : L'évolution du flux statorique alpha beta

➤ **Interprétation des résultats**

Figure (III.7), (III.8), (III.11) et (III.12) : On remarque que la vitesse de la génératrice suit la vitesse du vent, le couple électromagnétique et la puissance éolien sont négative ce qui confirme le fonctionnement générateur.

Figure (III.16) et (III.22) : On remarque que le flux statorique dans le repère biphasé (α, β), son module a une valeur constante quelque soit le fonctionnement.

Figure (III.18) , (III.23) : On remarque que le comparateur à hystérésis a permis de maintenir l'extrémité du flux statorique dans la bande d'hystérésis.

Figure (III.19) et (III.28) : On remarque que la trajectoire du flux statorique est pratiquement circulaire quelque soit le fonctionnement.

Figure (III.20) et (III.21) : On remarque que l'allure de la vitesse et celle du couple électromagnétique sont positives et montre une bonne dynamique avec le couple résistant qui sont confondu ensemble qui confirme le fonctionnement moteur.

Figure (III.27) : On constate que le débit qui la variation de la vitesse qui dépend de la puissance éolienne.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande de la chaîne éolienne par la méthode du contrôle du couple. Malgré la simplicité de correcteur à hystérésis, son choix est une solution bien adaptée pour la commande directe du couple. Les résultats de simulation montrent les bonnes performances dynamiques du couple et du flux.

Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur la commande non linéaire d'un système de pompage éolien, qui est composé d'une turbine éolienne, d'une génératrice à cage, deux convertisseurs d'électronique de puissance et d'un groupe motopompe (pompe centrifuge et une machine asynchrone).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien, et donné un aperçu sur les différentes combinaisons et une brève description du système de pompage éolien, puis nous avons cité ces avantages et inconvénients, les différents types de convertisseurs et de groupe motopompe utilisés puis on a illustré un schéma globale du système a étudié.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne, avec une génératrice synchrone à cage d'écureuils. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la commande étudiée de la chaîne éolienne par la méthode du contrôle du couple (DTC), nous avons d'abord défini son principe, ces avantages et ces inconvénients.

Les résultats obtenus confirment les performances souhaités. Nous avons présentés des résultats de simulation pour un échelon de vitesse et pour une vitesse de vent variable.

En perspective, il sera nécessaire d'envisager d'autre stratégies de commande, non linéaire, qui seraient encore plus robustes de part le modèle non linéaire.

Références bibliographique

Références bibliographique

- [1] N. Benbelaid et R. Maizia « Commande et optimisation d'un système de pompage hybride (PV-Eolienne) » Mémoire de Master, Université de Bejaia 2016.
- [2] N. Mekkaoui, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2004.
- [3] K. Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome » Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira-Bejaia (Algérie) et l'université Lille1 (France), 2010.
- [4] G. Van kuik, « Research ready what drives the development », Global wind power conference proceedings, Paris, France, 2002.
- [5] L. Aiche-Hamane et A. Khellaf, « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie », International congress of photovoltaïques and Wind énergies (ICPWE-2003), Tlemcen, Algérie, 2003.
- [6] M^r. A. Zahir et M^r. A. Youcef, « Commande non linéaire d'un système de pompage éolien » Mémoire de fin de cycle ; Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016 /2017.
- [7] Frédéric POITIERS, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.
- [8] M^r. Rahim et M^m. B. Hassiba, « Commande d'une éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone double alimentée » Mémoire de fin de cycle ; Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016 /2017.
- [9] B. Talit, « Etude et Contrôle des Aérogénérateurs à base des Machines Asynchrones Double Alimentées Connectées à un Réseau Electrique Autonome » MEMOIRE DE MAGISTER, Université A.MIRA-BEJAIA, 28 /05/2013.
- [10] A. Mirecki, « Etude Comparative de Chaines de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance », Thèse de Doctorat, INPT, France, 2005.
- [11] A. Tamaarat, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse doctorat université Mohamed Khider de Biskra, 2005.
- [12] Nadia, A, « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation », Doctorat dissertation, Université de Batna2, 2010.
- [13] G. Thierry et D. fedullo, « Le Grand Livre de L'électricité », troisième Edition 2014.
- [14] A. Davigny, « Participation aux services systèmes de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », thèse de doctorat, Université de Lille, 2007.

Références bibliographique

- [15] H. Hamzaoui, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur».
- [16] F. Poitiers, « étude et commande de Génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 2003.
- [17] M.Loufane et S.Oublaid, « Etude d'un système de pompage alimenté par une source hybride (éolienne-photovoltaïque) » mémoire d'ingénieur, université de Bejaia 2010.
- [18] A. Guettaf, « Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.
- [19] M^{elle} S.Sara et M^{elle} O.Aldjia, «Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque», Mémoire de fin de cycle, université de Bejaia, 2016/2017.
- [20] A. Hachemi, «Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage», Université Mohamed Khider – Biskra, 18 février 2017.
- [21] B.Robins, M. Nacer, «Modélisation et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage ». Electrotechnique du futur EF'2001, Nancy, France, 14-15nov 2001, pp.77-82.
- [22] Toufouti R., « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone », Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [23] R. Amrouche et S.Bedjou, « Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master université de Bejaia 2016.
- [24] H.Samir et B.Abdelghani, «Contrôle d'une génératrice asynchrone double alimenté en fonctionnement autonome», », Mémoire de fin de cycle, université de Bejaia, 2011/2012.
- [25] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux pompes ». Thèse Doctorat en cotutelle, université de Reims Champagne-Ardenne et de l'université de Sfax, année 2015.
- [26] : Y. Kebbati, « Développement d'une méthodologie de conception matériel à base de module générique vhdl/vhdl-ams en vue d'une intégration de systèmes de commande électriques », Thèse de doctorat de l'Université louis pasteur, Strasbourg, France 2005.
- [27] : A. Chikhi « Commande direct du couple du moteur asynchrone-apport de la logique floue ». Mémoire Magister université Batna, 2008.
- [28] : C. Canudas, « Modélisation, contrôle vectoriel et DTC, Commande des machine asynchrone », édition 1 hermès science Europe, 2000.
- [29] : L. Djaghдали « Contribution à la commande prédictive direct du couple de la machine à induction ». Thèse Doctorat université Batna 2, 2016.
- [30] : C. Andere, « Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone par l'orientation de son flux statorique », Thèse de doctorat de l'institut nationale polytechnique de Grenoble, France, 1996.

Références bibliographique

[31]: D. Rekioua, T. Rekioua ET S. Alloune – « Switching Strategies in Direct Torque Control of Induction Machine: Modelling and simulation », International Conference Modelling and Simulation (MS'2004), Lyon, France, 4-7 Juillet 2004, pp. 313-321.

[32] : F. Bernard, « machine asynchrones – commande par contrôle direct de couple », technique de l'ingénieur, D3623, mai 2006.

Paramètres de la MAS

$$P=4$$

$$J=0.23\text{kg.m}^2$$

$$R_s=1.07131\text{ohm}$$

$$R_r=1.29511\text{ohm}$$

$$L_s=0.1137H$$

$$L_r=0.1096H$$

$$N_s=750\text{ tr/mn}$$

$$V=220\text{ v}$$

$$P_n=5.5\text{kw}$$

$$M=0.10474H$$

Paramètres de la pompe centrifuge

$$\text{Vitesse nominale } w_n=78.5\text{ (rd/s)}$$

$$\text{Hauteur manométrique } H=10\text{m}$$

$$\text{La gravitation } g=9.81\text{ (m/s}^2\text{)}$$

Paramètres de la turbine

$$\text{Le gain de multiplicateur } G=3.75$$

$$\text{Rayon de la turbine } R_t=3.24\text{cm}$$

$$\text{Moment d'inertie } J=0.0075\text{kg.m}^2$$

*Introduction
générale*

Sommaire

Sommaire

Chapitre I

Chapitre II

Chapitre III

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Chapitre IV