

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Électrotechnique

Option : Énergie renouvelable en électrotechnique

Intitulé :

Étude et modélisation d'une MADA pour une application dans un système de conversion d'énergie éolienne

Présenté par :

- OBEID Mohammed amin
- OBEID Houari
- CHADLI Soumia

Soutenu le : 16 /06/2021 devant le Jury :

M. KHESSAM MEDJDOUB	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
M. HABCHI YASSINE	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. BenMohamed Fayçal	MCB	Centre Universitaire Naâma	Examineur

الملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة ونمذجة الآلة اللاتزامنية مزدوجة التغذية وقمنا بتقسيم هذا العمل الى عدة اقسام حيث تطرقنا في القسم الاول الى دراسة نظرية حول توربينات الرياح وانواعها والنمط الهيكلي لها. في القسم الثاني تطرقنا الى دراسة نظرية للآلة اللاتزامنية مزدوجة التغذية ثم قمنا بالنمذجة الرياضية لها. اما في القسم الاخير قمنا عن طريق برنامج ماطلاب Matlab/simulink بمحاكات لهذه الآلة لإستخراج منحنيات السرعة والاستطاعات والتيار والعزم وقمنا في نفس البرنامج بإنشاء محاكاة للتحكم في هذه الاستطاعة وضبطها عن طريق استراتيجية التحكم في نظام الريح PI.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié et modélisé la machine asynchrone à double alimentation. On a divisé ce travail en plusieurs sections. Dans la première section, nous avons traité une étude théorique sur les éoliennes, leurs types et leur schéma structurel. Dans la deuxième partie, On a étudié théoriquement la machine asynchrone à double alimentation, avec leur modélisation mathématique. Dans la dernière section, nous avons simulé cette machine, via le programme Matlab/simulink, pour extraire les courbes de vitesse, tension, courant et le couple. Dans le même programme, nous avons créé une simulation pour contrôler cette puissance et l'ajuster via la stratégie de contrôle du système éolienne PI

Abstract

In this work, we have studied and modeled the double-fed asynchronous machine, and we have divided this work into several sections. In the first section, we dealt with a theoretical study on wind turbines, their types and structural scheme. In the second part, we dealt with a theoretical study of the double-fed asynchronous machine, then we did the mathematical modeling. In the last section, we simulated this machine, via the Matlab / simulink program, to extract the speed, potential, current and torque curves. In the same program, we created a simulation to control this power and adjust it through the PI wind system control strategy.

REMERCIEMENTS

*Avant tout nous remercions dieu le tout puissant de nous
avoir donné le courage,*

*la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces
années et que grâce à lui ce travail*

a pu être réalisé.

*Nous ne remercierons jamais assez notre promoteur Mr
Y. habchi qui, par son aide, son orientation, et il nous a*

donné toutes les chances de réussite. Ainsi nous

remercierons Mr M. kendzi, pour son aide précieux

Nous remercions vivement tous les enseignants et tous ceux à

qui nous devants

notre formation.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail,

*À nos très chers parents qui n'ont pas cessé de nous
encourager, en nous prodiguant de précieux conseils,
c'est avec émotion que nous leur exprimons toute
notre affection, admiration et notre profond respect.*

*À tous ceux qui nous comptent sur eux et qui
comptent sur nous.*

*Enfin, n'oubliez pas de dédier ce travail à
notre femmes et notre ange Obeid Ghaith*

SOMMAIRE

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Notations Symboliques	
Listes des figures	
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I :Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne.

I.1.Introduction	4
I.2.Généralité sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	4
I.2.1.Historique.....	4
I.2.2.Définition de l'énergie éolienne.....	5
I.2.3.Les différents types d'éoliennes.....	5
I.2.3.1.Eoliennes à axe vertical.....	5
I.2.3.2.Eoliennes à axe horizontal.....	6
I.2.4.Principaux composants d'une éolienne.....	7
I.3.Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique.....	8
I.3.1.Loi de Betz notions théoriques.....	8
I.3.2.Production d'énergie mécanique.....	11
I.4.L'éolienne en Algérie.....	12
I.5.La chaîne de conversion de l'énergie éolienne.....	13
I.5.1.Principe de conversion de l'énergie éolienne.....	13
I.5.1.1.Fonctionnement à vitesse fixe.....	14
I.5.1.2.Fonctionnement à vitesse variable.....	15
I.6.Modélisation de la turbine éolienne.....	15
I.6.1.Modèle du multiplicateur.....	17
I.6.2.Equation dynamique de l'arbre.....	17
I.7.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	18
I.7.1.Avantage.....	18
I.7.2.Inconvénients.....	19
I.8.Conclusion.....	19

CHAPITRE II : Etude et modélisation de la machine asynchrone a double alimentation

II.1.Introduction.....	21
II.2.machine asynchrone a double alimentation (MADA)	21
II.2.1.Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	21
II.2.2.Structure de la machine.....	22
II.2.3.Mode de fonctionnement de la MADA.....	22
II.2.3.1.Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	22
II.2.3.2.Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	23
II.2.3.3.Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone	23
II.2.3.4.Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	24
II.2.4.Domaines d'application de la MADA.....	24
II.2.5.Avantages et inconvénients de la MADA.....	24
II.2.5.1.Avantages de la MADA.....	24
II.2.5.2.Inconvénients de la MADA.....	25
II.2.6.Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	25
II.2.6.1.Hypothèses simplificatrices.....	26
II.2.6.2.Modèle de la MADA dans un repère triphasé (a,b,c)	26
a) Equations électriques.....	26
b) Equations magnétiques.....	27
c) Equation mécanique.....	28
II.2.7.Transformation de Park.....	28
II.2.8.Modèle de la machine dans le repère diphasé (d,q).....	29
a) Les expressions électriques.....	30
b) Equations magnétique.....	30
c) Equation du couple électromagnétique.....	30
d) Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques	31
II.2.9.Choix du référentiel.....	31
a) Référentiel lié au Stator.....	31
b) Référentiel lié au rotor	31
c) Référentiel lié au champs tournant	31
II.3.Modélisation de convertisseur statique.....	32
II.3.1.Modélisation de l'onduleur de tenions MLI	32
II.4.Conclusion	34

CHAPITRE III : Stratège de contrôle du système éoliennes

III.1. Introduction	36
III.2. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances	36

III.3. Les différentes méthodes de la Commande des puissances de la MADA.....	38
III.3.1. Commande directe	39
III.3.1.1. Mise en place de la régulation	39
III.3.1.2. Commande indirecte.....	40
III.3.1.2.a. Commande sans boucle de puissance	40
III.3.1.2.b. Commande avec boucles de puissance.....	40
III .4. Synthèse du régulateur PI.....	41
III.4.1. Calcul des régulateurs	41
III.4.2. La régulation des puissances	42
III.5. Modèle de simulation du système éolien.....	44
III.5.1. Résultat de simulation.....	45
III.5.2. Interprétation des résultats	49
III.6. Conclusion	49
Conclusion générale.....	51
Annexe	
Référence bibliographie	

NOTATION

SYMBOLIQUE ET

ABREVIATION

NOTATION SYMBOLIQUE ET ABREVIATION

P_v : la puissance de vent

ρ : La densité volumique de l'air kg / m^3

S : La surface balayée par la turbine m^2

V_v : La vitesse moyenne de vent m / s

$C_p(\lambda, \beta)$: Le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0.593)

P_t : la puissance de la turbine

β : L'angle de calage

λ : Rapport de vitesse en bout des pâles

R : rayon de la turbine (m)

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine (rad/s)

G : le gain du multiplicateur

C_t : le couple de la turbine éolienne.

$C_{méc}$: le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine.

$\Omega_{méc}$: la vitesse mécanique de la génératrice.

J_t : Inertie de la turbine éolienne $kg.m^2$

J_g : Inertie du rotor de la génératrice.

J : l'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine $kg.m^2$

P_m : Puissance extraite du vent

P_{mt} : Puissance totale du vent

Ω_1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur

Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur

f : coefficient de frottement dynamique $kg.m^2.s^{-1}$

C_{em} : couple électromagnétique (N.m)

$V_{sa,b,c}$: Tensions instantanées statoriques triphasées.

$V_{ra,b,c}$: Tensions instantanées rotorique triphasées

$I_{sa,b,c}$: Courants instantanés statoriques triphasées.

- $I_{ra,b,c}$: Courants instantanés rotorique triphasées
- $V_{s,d,q}$: Tensions instantanées statoriques dans le repère d,q
- $V_{r,d,q}$: Tensions instantanées rotorique dans le repère d,q
- $I_{s,d,q}$: Courants instantanés statoriques dans le repère d,q
- $I_{r,d,q}$: Courants instantanés rotorique dans le repère d,q
- R_s : Résistance statorique par phase
- R_r : Résistance rotorique par phase
- L_s : Inductance cyclique statorique par phase
- L_r : Inductance cyclique rotorique par phase
- M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
- M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques
- M_{sr} : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor
- l_s : Inductance propre d'une phase statorique
- l_r : Inductance propre d'une phase rotorique
- $\phi_{r,a,b,c}$: flux magnétiques au rotor
- $\phi_{s,a,b,c}$: Flux instantané magnétiques au stator
- $\phi_{r,d,q}$: Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant (d, q).
- $\phi_{s,d,q}$: Flux statoriques diphasés dans le repère tournant (d, q).
- θ_r : Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d).
- θ_s : Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d),
- θ_{sr} : Position angulaire du rotor par rapport au stator
- P_s : Puissance active statorique
- Q_s : Puissance réactive statorique
- P_r : Puissance active rotorique
- Q_r : Puissance réactive rotorique
- $[P(\Theta)]$: Matrice de transformation directe de PARK
- $[P(\Theta)]^{-1}$: Matrice de transformation inverse de PARK
- ω_s : vitesse électrique de champ tournant

Notation symbolique et abréviation

ω_r : vitesse électrique de rotor

g : Glissement de la vitesse de rotation

U_{dc} : Tension aux bornes du bus continu (tension redressée)

S_{abc} : Etat des interrupteurs de l'onduleur

V_{abc} : Tensions efficaces de la ligne

T_n, T_i : la constante de temps de dosage de la corrélation d'intégration et la constante de temps d'intégration

τ_r : le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms

K_p, K_i : Coefficients de proportionnalité et d'intégration

MADA : machine asynchrone a double alimentation

GADA : génératrice asynchrone a double alimentation

MLI: Modulation à Largeur d'Impulsions.

PI: Action Proportionnelle et Intégrale.

LISTE DES FIGURES

Liste des figure

Figure 1.1 : schéma de conversion de l'énergie éolienne.....	5
Figure 1.2 : éolienne à axe vertical.....	6
Figure 1.3 : éolienne à axe horizontal.....	6
Figure 1.4 : axe amont et aval.	7
Figure 1.5 : principaux composants d'une éolienne.....	8
Figure 1.6: Tube de courant autour d'une éolienne.....	9
Figure 1.7: Coefficient de puissance.....	10
Figure 1.8: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	10
Figure 1.9: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	11
Figure 1.10: carte du gisement éolienne en Algérie.....	13
figure 1.11 : La chaîne de conversion de l'énergie éolienne a base du MADA.....	13
figure 1.12 : Fonctionnement à vitesse fixe.....	14
figure 1.13: Fonctionnement à vitesse variable.....	15
figure 1.14 : schéma de la turbine éolienne.....	15
figure 1.15 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	16
figure 1.16 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....	17
figure 1.17 : schéma bloc de modèle de la turbine éolienne.....	18
figure 2.1: Eolienne a vitesse variable basée sur une MADA.....	21
figure 2.2: Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée....	22
figure 2.3: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	23
figure 2.4: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	23
figure 2.5: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	23
figure 2.6: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	24
figure 2.7: Représentation simplifié de la MADA.....	26
figure 2.8: Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.....	28
figure 2.9: Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	29
figure 2.10: Représentation schématique de l'onduleur.....	32
Figure.3.1: Schéma bloc de la MADA à réguler	38
Figure.3.2: Schéma bloc de la commande directe	39
Figure.3.3: Schéma bloc de la commande indirecte.....	40
Figure.3.4. Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance	41
Figure.3.5: Schéma de la fonction de transfert d'un régulateur PI.....	41

Figure.3.6: Schéma de régulation des puissances.....	42
Figure.3.7: Modèle du système éolien.....	44
Figure.3.8: Courant statorique généré par le système en fonction du temps.....	45
Figure.3.9: Courant rotorique du système en fonction du temps.....	46
Figure.3.10: Evolution de la puissance active statorique généré par le système en fonction du temps.....	47
Figure.3.11: Evolution de la puissance réactive statorique généré par le système en fonction du temps.....	47
Figure.3.12: Evolution du couple électromagnétique du système en fonction du temps..	48
Figure.3.13: Evolution de la vitesse rotorique en fonction du temps.....	48

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est de plus en plus primordiale pour l'humanité, aujourd'hui notre société ne saurait plus s'en passer, elle est devenue un élément indispensable à notre confort personnel, et au développement et l'évolution des activités industrielles. Cette demande énergétique, constamment croissante, a poussé les gens à développer de nouveaux moyens de production d'énergie, toujours plus efficaces, sans s'inquiéter outre mesure de leur impact environnemental et sanitaire [1].

Actuellement, à l'échelle mondiale, l'énergie que nous utilisons quotidiennement pour produire de l'électricité provient majoritairement des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui présentent l'avantage d'être facilement utilisables et restent longtemps bon marché. Mais leur emploi systématique et massif fait apparaître plusieurs problèmes majeurs. Tout d'abord, dans un futur très proche, l'homme sera vraisemblablement confronté à leur épuisement et il est d'ores et déjà confronté aux perturbations climatiques engendrées par le rejet massif de gaz à effet de serre produits lors de leur combustion [2].

Pour faire face à ces problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. (Il s'agit d'énergies à priori peu polluantes et dont les sources présentent, en théorie, l'avantage d'être abondantes et inépuisables dans les millénaires à venir) [3].

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important, elle n'est pas proposée pour remplacer les sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint. En effet cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Par ailleurs, le site d'implantation des éoliennes reste toujours exploitable, pour l'agriculture par exemple. Enfin, les petites installations permettent d'électrifier les lieux isolés et donnent une certaine indépendance à des petites communautés (un village, un regroupement d'industries...), mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son inconstance en effet le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin. En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année [4].

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne a connu une forte croissance, cela conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à augmenter l'efficacité de la conversion électromécanique d'une part et à améliorer la qualité de l'énergie fournie d'une autre part [2].

L'utilisation des éoliennes à vitesse variable sont les plus répandues, ce qui permet de diminuer le coût de production d'électricité par des aérogénérateurs et d'améliorer la qualité de la puissance électrique générée ainsi que le rendement de la production d'énergie, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe [4].

Actuellement, le marche des générateurs éoliens a vitesse variable s'est oriente vers la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) comme génératrice étant donne ses avantages. En effet, le schéma de raccordement le plus typique de cette machine consiste à raccorder le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté' rotor CCM et l'autre coté réseau CCR). Cette dernière configuration permet un fonctionnement de l'éolienne a vitesse variable ce qui donne la possibilité de produire le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse. Par ailleurs, les convertisseurs statiques utilisent pour le contrôle de cette machine peuvent être dimensionnes pour transiter seulement une fraction de la puissance totale (qui représente la puissance du glissement). Ceci implique moins de pertes par commutations, un coût de production du convertisseur moins élève et impliquant une réduction des couts et des pertes additionnelles [5].

De plus la stratégie de commande adoptée pour l'ensemble MADA associée aux convertisseurs statiques joue un rôle important dans l'amélioration des performances du système éolien en matière de production d'une énergie électrique de bonne qualité.

Donc Ce travail est structuré en trois chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne on va donner un aperçu sur les différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique.
- ❖ Le second chapitre, sera consacré à la modélisation de la machine asynchrone a double alimentation
- ❖ Dans le dernier chapitre, on va élaborer une stratégie de commande vectorielle, en basant sur le contrôle indépendant des puissances actives et réactives (PI), et on finira ce chapitre avec une simulation pour les différentes méthodes de commande étudiée.
- ❖ Finalement, nous concluons ce travail par une conclusion générale en proposant quelques perspectives pour l'amélioration de ce travail.

CHAPITRE

I

**Etat de l'art des systèmes de
conversion d'énergie
éolienne**

I.1. Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pâles profilées ont été utilisés avec succès pour générer l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes à la commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les caractéristiques mécaniques des éoliennes.

I.2. Généralité sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne :

I.2.1. Historique :

Il y a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de l'eau, d'autre part en mer, par les bateaux [6]. La génération d'énergies électriques par le vent a débuté à la fin du 19e siècle.

Parmi les pionniers on peut citer Paul la Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950. Johannes Jul (élève de Paul la Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985. Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [7].

I.2.2. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter le phénomène de turbulences [8].

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Le processus de conversion de l'énergie cinétique du vent est illustré dans la figure (1.1)

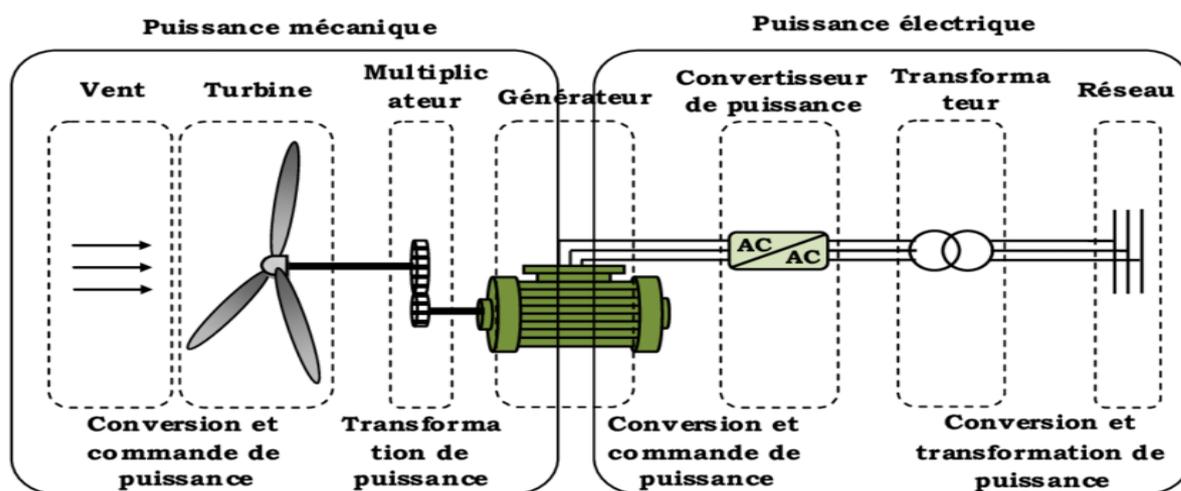


Figure 1.1 : schéma de conversion de l'énergie éolienne

I.2.3. Les différents types d'éoliennes :

I.2.3.1. Eoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne (figure 1.2) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éolienne à axe horizontal [9].



Figure 1.2 : éolienne à axe vertical

I.2.3.2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pâles, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. [10]

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



Figure 1.3 : éolienne à axe horizontal

chapitre I Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

- ✓ **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 vent par un dispositif
- ✓ **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable

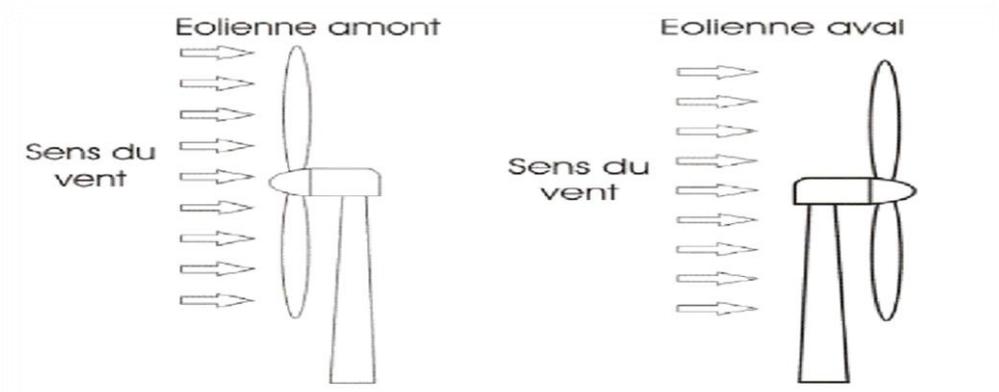


Figure 1.4 : axe amont et aval

1.2.4. Principaux composants d'une éolienne :

une éolienne se compose de plusieurs parties :

- ✓ la fondation
- ✓ le mât
- ✓ la nacelle
- ✓ le rotor (nez+ hélice)
- ✓ la cabine de dispersion

A/ la fondation:

La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

B/ le mât:

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

C/ la nacelle :

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos).

La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème. Les systèmes de supervision et de contrôle sont très performants.

D/ le rotor :

Le rotor est composé du nez de l'éolienne et de l'hélice. L'hélice est généralement composée de trois pales. Les pales sont placées au-devant de la nacelle et reliées ainsi à elle. Les pales produisent une énergie mécanique qui est transformée en électricité par la nacelle. L'électricité produite par la nacelle est transportée par des câbles situés dans le mât jusqu'à une cabine de dispersion.

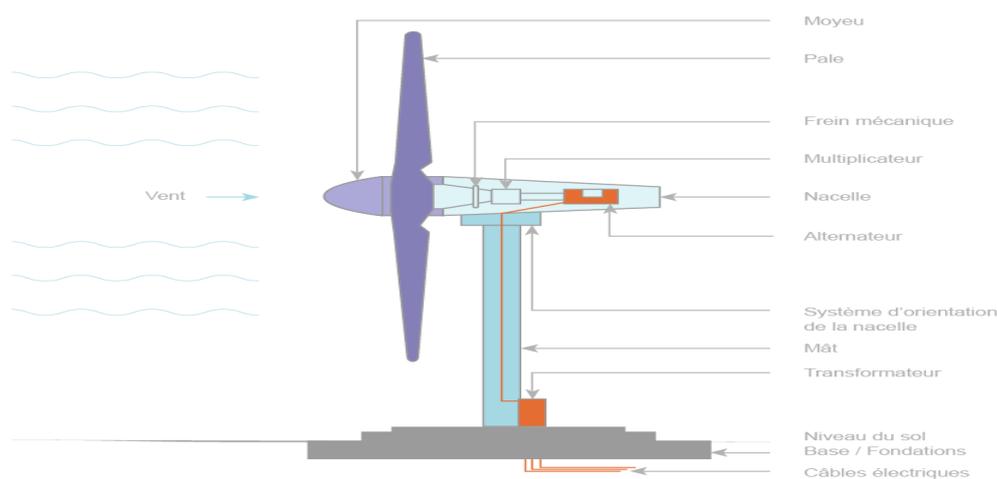


Figure 1.5 : principaux composants d'une éolienne

I.3. Energie cinétique du vent et conversion en énergie mécanique :

I.3.1. Loi de Betz notions théoriques :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (figure 1.5) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est [11]:

$$m = \rho.S.\frac{V_1+V_2}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{1}{2}.m.V^2 \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.2) :

$$P_m = \frac{\rho.S.(V_1+V_2).V^2}{4} \quad (1.3)$$

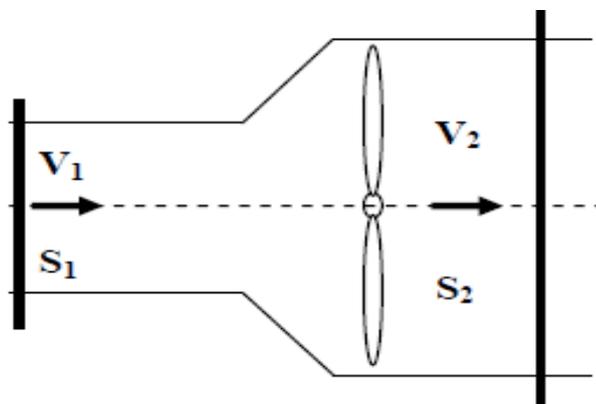


Figure 1.6: Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho.S.V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure 1.6), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximum de 16/27 soit 0.59. C'est cette limite théorique appelée limite de **Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée [12].

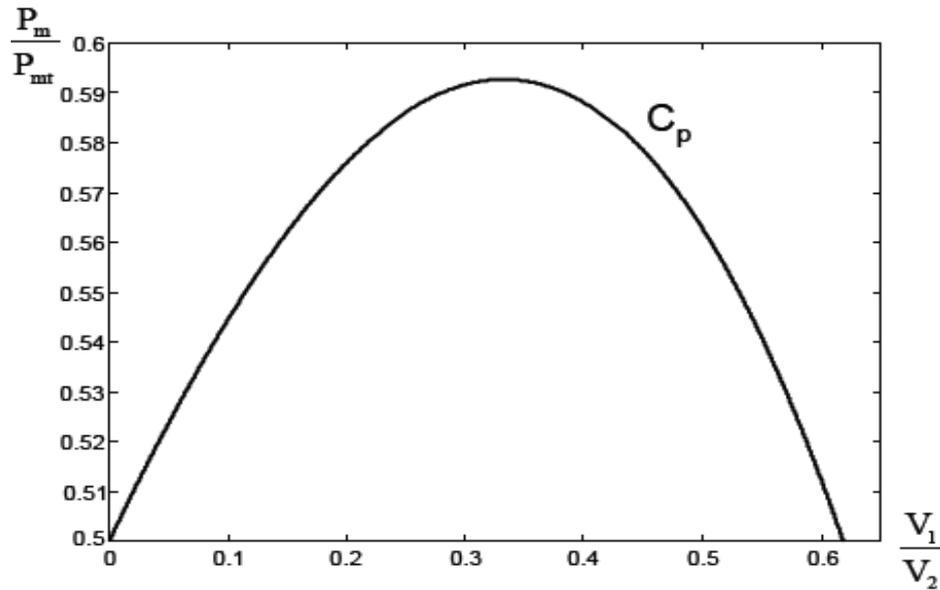


Figure 1.7: Coefficient de puissance

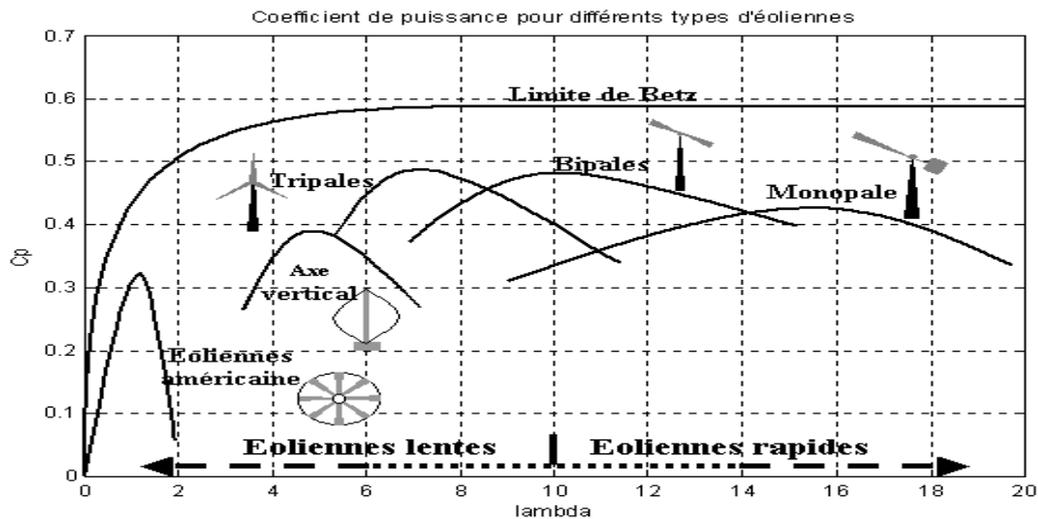


Figure 1.8: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [13]

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (figure 1.7) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts [13].

I.3.2. Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (1.2), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique $m P$ disponible

sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.6)$$

$$\text{avec: } \lambda = \frac{R\Omega_1}{V_1}$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur

R : rayon de l'aérogénérateur.

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R\Omega_2}{V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.7)$$

Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation de générateur pour différentes vitesses du vent (figure 1.8) [12].

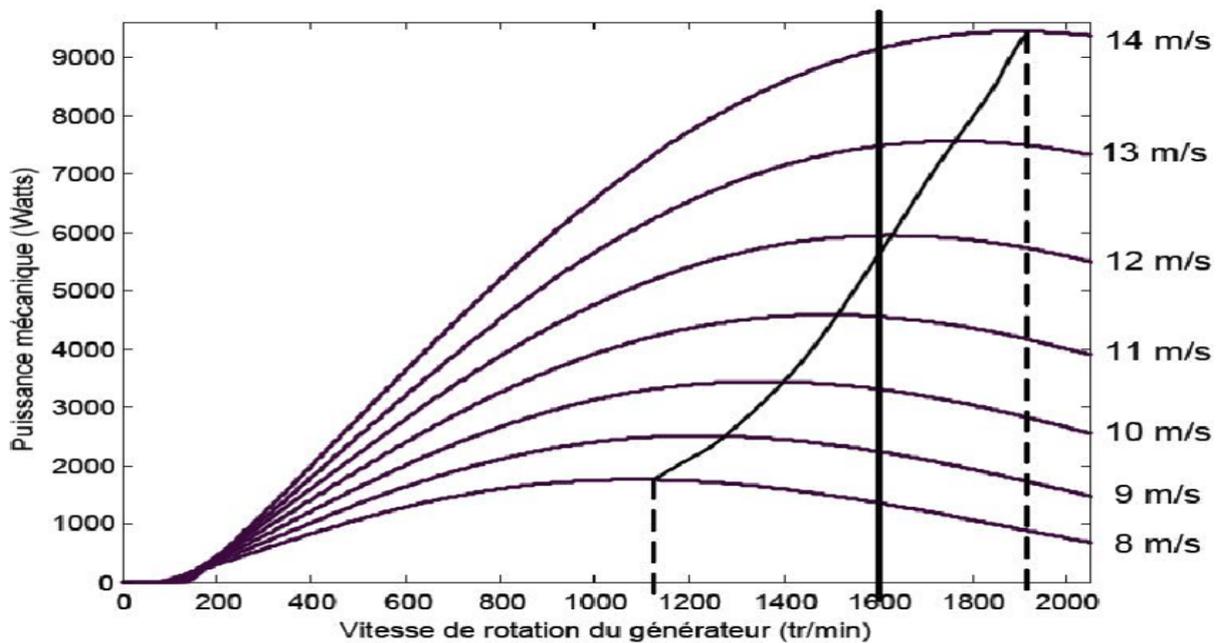


Figure 1.9: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [12]

Selon ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure (1.8) les maximums théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

I.4. L'éolienne en Algérie :

Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimé par Dr. Boudia [14] Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), publiée, à l'occasion du solstice d'hiver, une nouvelle carte du gisement éolien national.

Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent.

De ce fait, plusieurs chercheurs de l'EPST CDER ont depuis quelques années axé leurs recherches dans l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie.

L'étude la plus récente, a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10m [14], en utilisant des données météorologiques plus récentes et un plus grand nombre de points de mesure par rapport aux précédents travaux.

Une autre étude sur le gisement éolien en Algérie fut établie par Dr. Farouk Chellali en 2011 [15-16]. Ce dernier a introduit une analyse spectrale pour étudier le phénomène cyclique du vent et a contribué à l'actualisation de la carte des vents en Algérie en introduisant le site de Hassi-RMel qui avait été sous-estimé dans les précédents travaux. A rappeler que Dr. Farouk Chellali a été lauréat du deuxième prix du DESERTEC Thesis Award pour la région MENA par le travail présenté en étudiant le comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie.

L'un des premiers travaux de cartographie éolienne du pays à 10 m de hauteur a été réalisé en 2006 par Dr. Nachida Kasbadji Merzouk [17].

L'élaboration de l'ensemble des Atlas éoliens par les chercheurs de l'EPST CDER, a été effectuée par des analyses statistiques en utilisant des distributions, afin d'ajuster les données collectées auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM). Bien que le nombre de points de mesures répartis sur l'ensemble du territoire national soit relativement faible par rapport à la grande surface du pays, les cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER restent sans doute une base de référence pour les différents acteurs du secteur socio-économique qui prévoient le développement de cette énergie dans le pays.

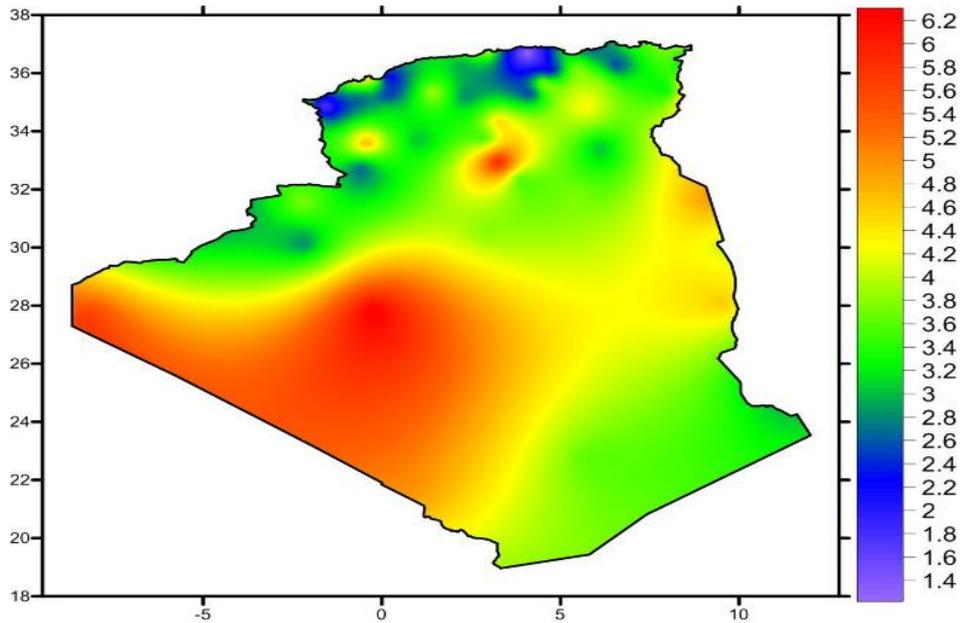


Figure 1.10: carte du gisement éolien en Algérie.

I.5. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne :

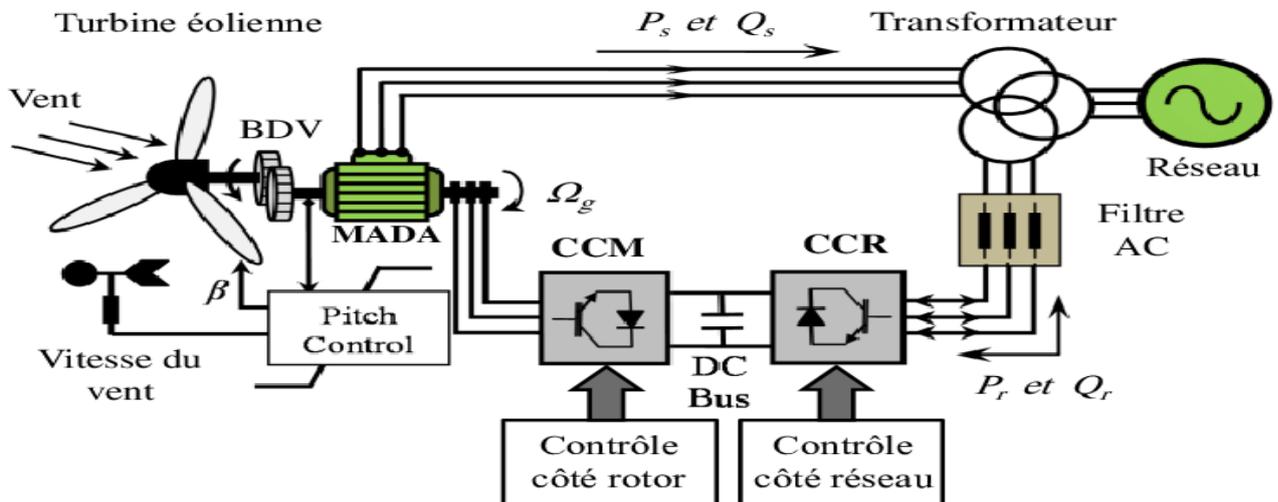


Figure 1.11 : La chaîne de conversion de l'énergie éolienne a base du MADA

I.5.1. Principe de conversion de l'énergie éolienne :

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple :

Le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

I.5.1.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Dans cette technologie, la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance (Figure 1.11), sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de paire de pôles de la génératrice. Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage de synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

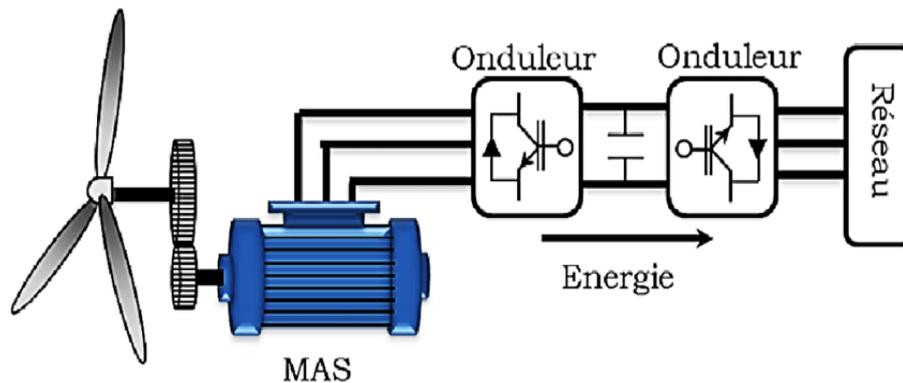


Figure 1.12 : Fonctionnement à vitesse fixe

➤ **Avantage du fonctionnement à vitesse fixe :**

Les principaux avantages de ce mode de fonctionnement sont :

- Structure simple.
- Absence des convertisseurs de puissance.
- Moins cher.

➤ **Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe :**

Cette stratégie pose beaucoup de problèmes au niveau de l'exploitation de l'énergie extraite :

- Puissance extraite non optimisée (On rate les maximas théoriques).
- Rendement très faible pour les moyens et faibles vents.
- Nécessité de la maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- Perte de control de la puissance réactive.
- Magnétisation de la génératrice non contrôlée.

I.5.1.2. Fonctionnement à vitesse variable :

Vu les problèmes causés par un fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre,), on a cherché l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il faut ajuster en permanence la

vitesse de la génératrice à la vitesse du vent. Cette optimisation de la production voulue peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (figure 1.12) [18].

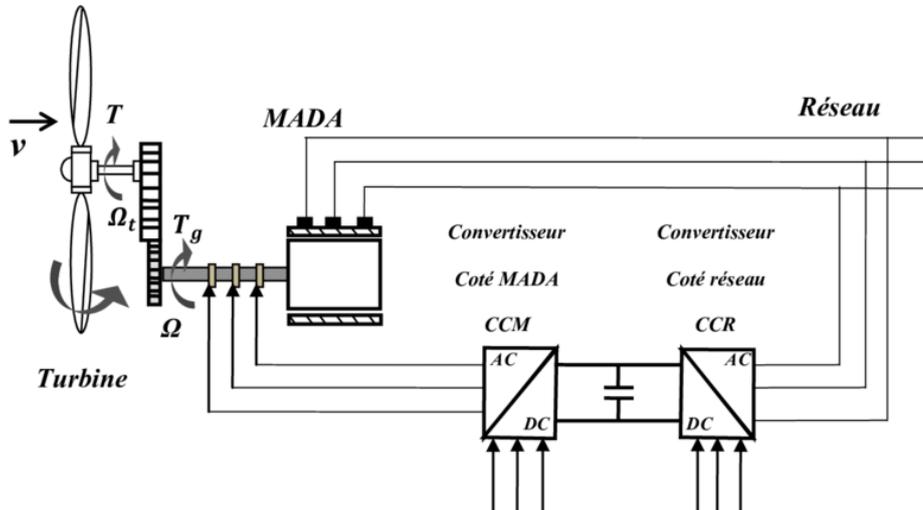


Figure 1.13: Fonctionnement à vitesse variable

I.6. Modélisation de la turbine éolienne :

Le système éolien classique est composé d'une turbine qui transforme l'énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse G qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple et comprenant des pâles entraînées par le vent.

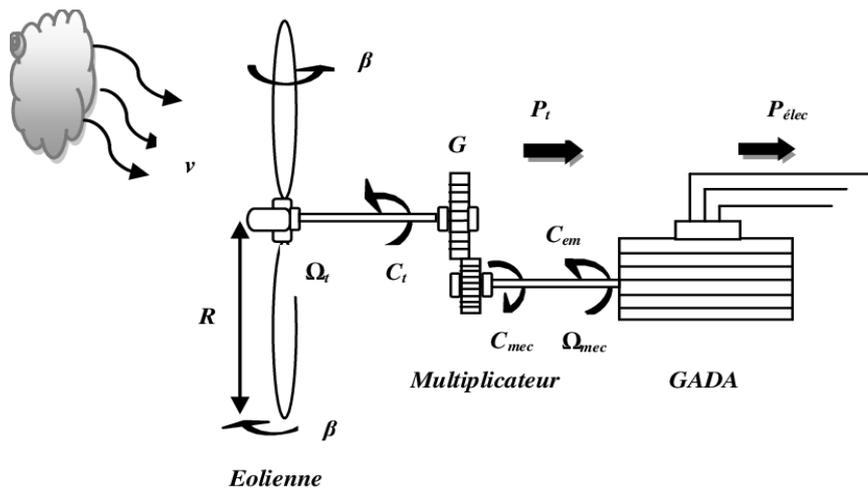


Figure 1.14 : schéma de la turbine éolienne.

La puissance cinétique du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (1.8)$$

Avec :

ρ : La densité volumique de l'air kg / m^3

S : La surface balayée par la turbine m^2

V_v : La vitesse moyenne de vent m / s

La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'écrit par :

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v \quad (1.9)$$

Avec :

$C_p(\lambda, \beta)$: Le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0.593).

La figure 2.2, donne la variation de coefficient de puissance de l'éolienne C_p en fonction de rapport de vitesse λ pour l'angle de calage β .[6]

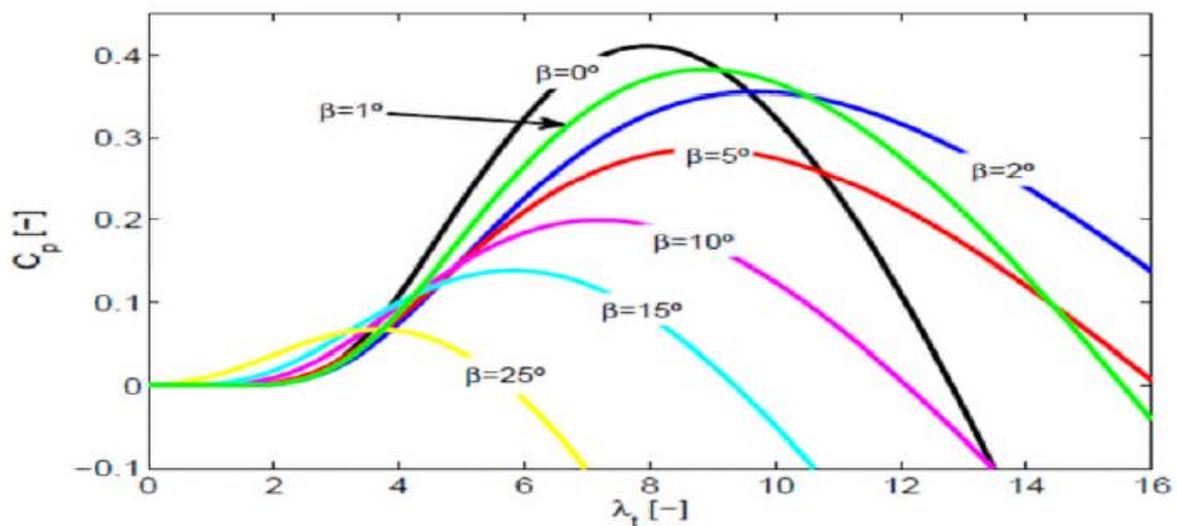


figure 1.15 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

Le rapport de vitesse en bout des pâles est donné par :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \quad (1.10)$$

Avec :

β : L'angle de calage

λ : Rapport de vitesse en bout des pâles

R : rayon de la turbine (m)

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine (rad/s)

Le couple de la turbine éolienne est donné par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (1.11)$$

I.6.1. Modèle du multiplicateur :

Le rôle du multiplicateur est l'adapter la vitesse lente de la turbine Ω_t à celle de la génératrice $\Omega_{méc}$.

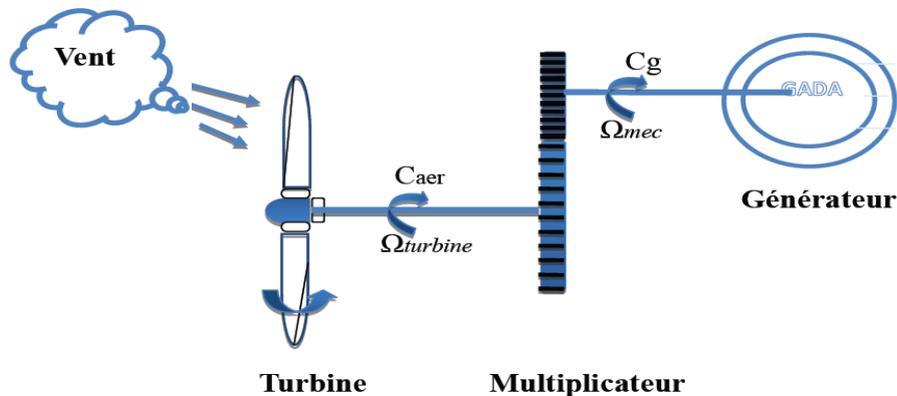


Figure 1.16 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_{méc} = G.\Omega_t \quad (1.12)$$

$$G = \frac{C_t}{C_{méc}} \quad (1.13)$$

Avec :

G : le gain du multiplicateur

C_t : le couple de la turbine éolienne.

$C_{méc}$: le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine.

$\Omega_{méc}$: la vitesse mécanique de la génératrice.

I.6.2. Equation dynamique de l'arbre :

L'équation dynamique est modélisée par la relation suivante [8] :

$$C_{méc} - C_{em} = f.\Omega_{méc} + J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \quad (1.14)$$

avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g$$

Avec :

J_t : Inertie de la turbine éolienne $kg.m^2$

J_g : Inertie du rotor de la génératrice.

J : l'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la

turbine $kg.m^2$

f : coefficient de frottement dynamique $kg.m^2.s^{-1}$

C_{em} : couple électromagnétique (N.m)

On déduit le modèle de la turbine éolienne représenté sur la figure suivante :

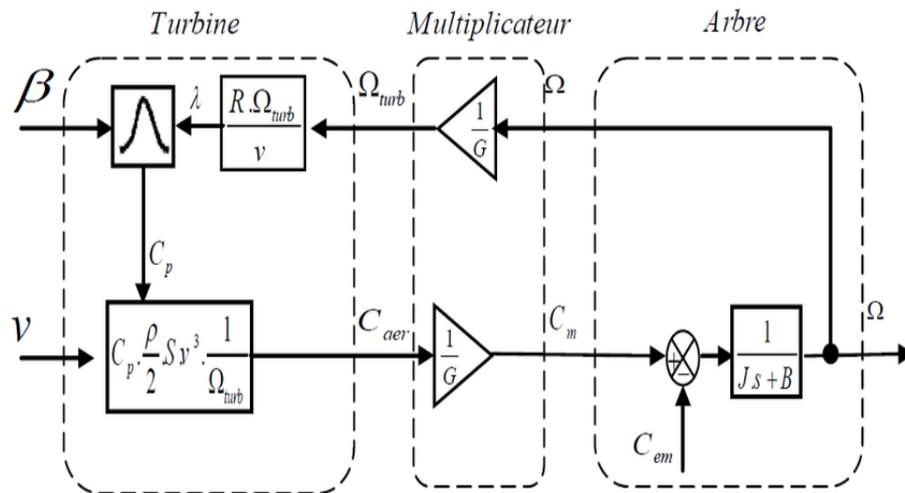


Figure 1.17 : schéma bloc de modèle de la turbine éolienne.

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

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

I.7.1. Avantage :

- ❖ L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui sauvegarde l'environnement.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- ❖ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est
- ❖ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ❖ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- ❖ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- ❖ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- ❖ Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

- ❖ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- ❖ Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

I.7.2. Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- ❖ Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- ❖ L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.

la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.

- ❖ La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne. Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (**Loi de Betz**), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine, Enfin nous avons cité les avantages et les inconvénient d'énergie éolienne.

CHAPITRE

II

**Etude et modélisation de la
machine asynchrone a
double alimentation**

II.1. Introduction :

La plupart des éoliennes installées de nos jours sont équipées d'une machine, asynchrone à double alimentation (MADA). Celle-ci permet de fonctionner sur une large plage de vitesse du vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible pour chacune de ses vitesses.

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) a suscité un grand intérêt surtout en tant que génératrice (GADA) dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement, domaines d'application et ses avantages et ses inconvénients.

Nous essayons d'aborder par la suite la modélisation en mode générateur.

II.2. Machine asynchrone a double alimentation (MADA) :

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution.

Contrairement à certaines machines synchrones qui ont des convertisseurs traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs de la MADA sont dimensionnés pour laisser passer 25% de la puissance nominale seulement. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation mécanique. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone, selon la topologie ces convertisseurs on peut réaliser plusieurs structures de ces machines [19].

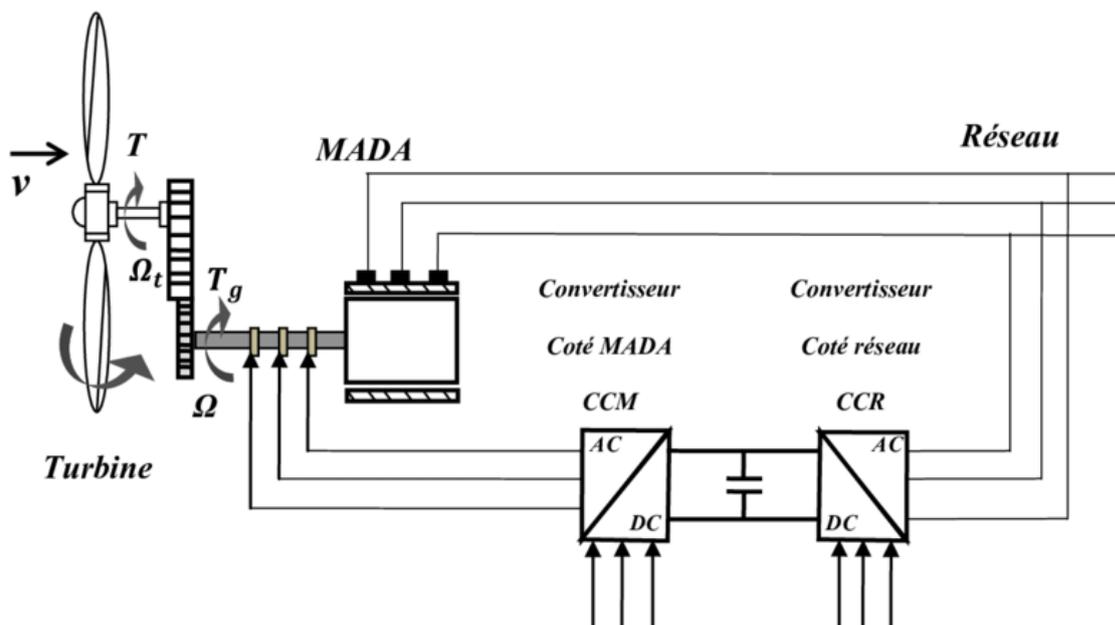


Figure 2.1: Eolienne a vitesse variable basée sur une MADA

II.2.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation :

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [20].

II.2.2. Structure de la machine :

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques (figure 2-2).

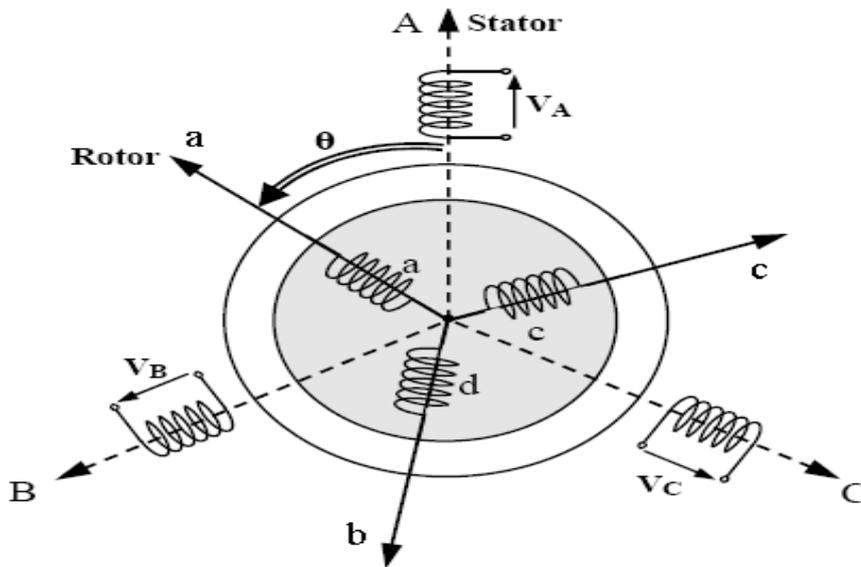


Figure 2.2: Représentation schématique d'une machine asynchrone double alimentée.

II.2.3. Mode de fonctionnement de la MADA :

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [22].

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de

fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

II.2.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

- ✓ La puissance est fournie par le réseau au stator.
- ✓ La puissance de glissement" est renvoyée au réseau.
- ✓ La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- ✓ La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor [21].

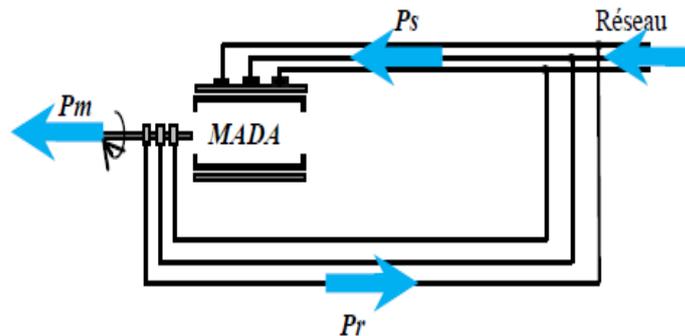


Figure 2.3: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

II.2.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

- ✓ La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- ✓ La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- ✓ La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [23].

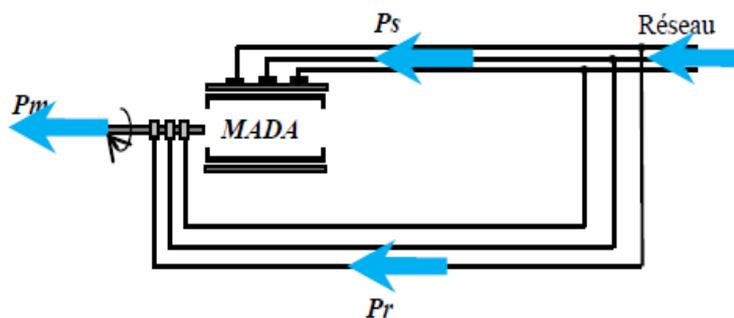


Figure 2.4: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

II.2.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone :

- ✓ La puissance est fournie au réseau par le stator.
- ✓ Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- ✓ La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- ✓ La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [21].

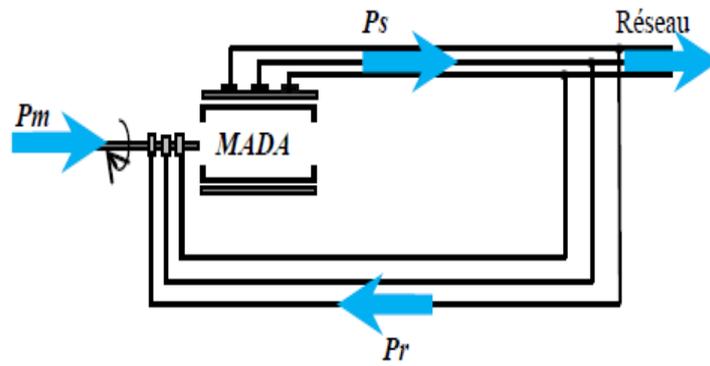


Figure 2.5: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

II.2.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

- ✓ La puissance est fournie au réseau par le stator.
- ✓ La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- ✓ la vitesse de la machine au dessus de la vitesse de synchronisme.
- ✓ La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [24].

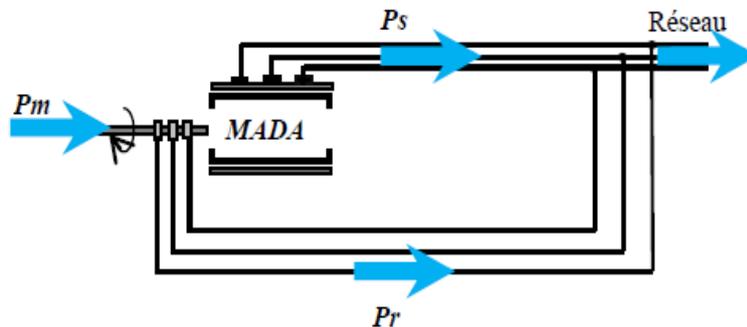


Figure 2.6: Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

II.2.4. Domaines d'application de la MADA :

La MADA a été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%. Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [25].

- ✓ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- ✓ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- ✓ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.

- ✓ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de
- ✓ faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

II.2.5. Avantages et inconvénients de la MADA :

II.2.5.1. Avantages de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer :

- ✓ Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs qui alimentent la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- ✓ Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écurie ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine. [26]
- ✓ Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- ✓ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ✓ En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- ✓ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [26].

II.2.5.2. Inconvénients de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs inconvénients dont on peut citer :

- ✓ Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais [26].
- ✓ La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- ✓ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [26].

II.2.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobine. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rétorques non nulles [27]. Le stator de la machine est constitué de trois enroulements (a_s ; b_s ; c_s) repartis dans l'espace et séparés d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$ et de pulsation ($\omega_s = 2\pi.f_s$). Le rotor est aussi formé de trois enroulements (a_r ; b_r ; c_r) de pulsation ($\omega_r = 2\pi.f_r$) et séparé d'un angle électrique de $\frac{2\pi}{3}$ [28].

La représentation schématisée de la MADA dans le repère triphasé est donnée par la figure en bas (2.5). θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase (a_s) statorique et la phase (a_r) rotorique.

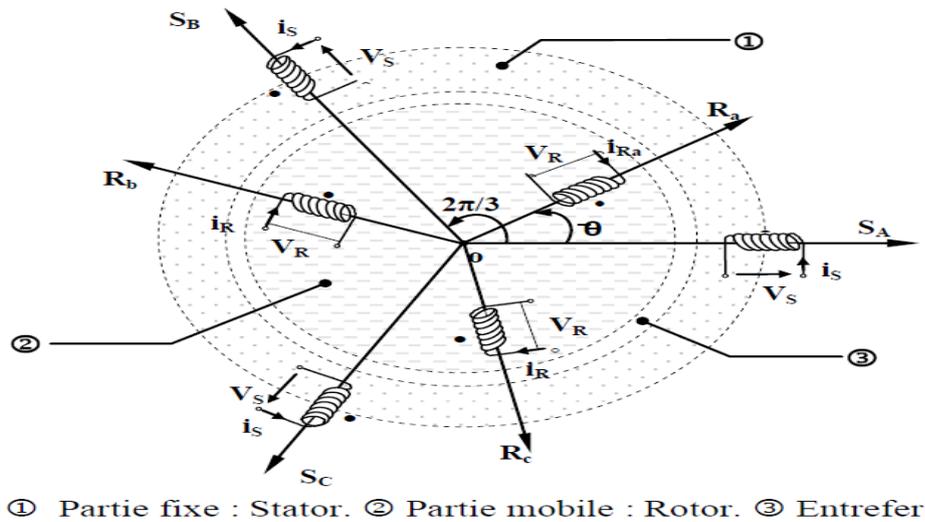


Figure 2.7: Représentation simplifiée de la MADA.

II.2.6 .1. Hypothèses simplificatrices :

La MADA est une machine très complexe. Nous devons procéder à quelques simplifications pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la MADA). On suppose que :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale d'où résulte le fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé. De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [27].

II.2.6.2. Modèle de la MADA dans un repère triphasé (a,b,c):

a) Equations électriques :

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine peuvent être exprimées par la loi de Faraday et s'écrivent comme suit :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

R_s et R_r : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement.

b) Equations magnétiques :

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

De façon similaire on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

M_s ; M_r : Inductances mutuelles.

Et la matrice des inductances mutuelles stator-rotor :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = [M] \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

M : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

c) **Equation mécanique :**

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_m \quad (2.6)$$

La machine asynchrone a des équations compliquées dans le repère triphasé abc. La complexité provient du fait que la matrice $[M_{sr}]$ varie même lorsque la vitesse est en régime stationnaires. Et dans le but de rendre l'écriture de ces équations plus simple à exploiter on a recours au changement de repère. Dans notre étude nous allons utiliser la transformation de Park [28].

II.2.7. La transformation de Park :

La transformation de Park permet de passer du repère triphasé (a-b-c) au repère équivalent biphasés généralisé (d-q-o) et inversement.

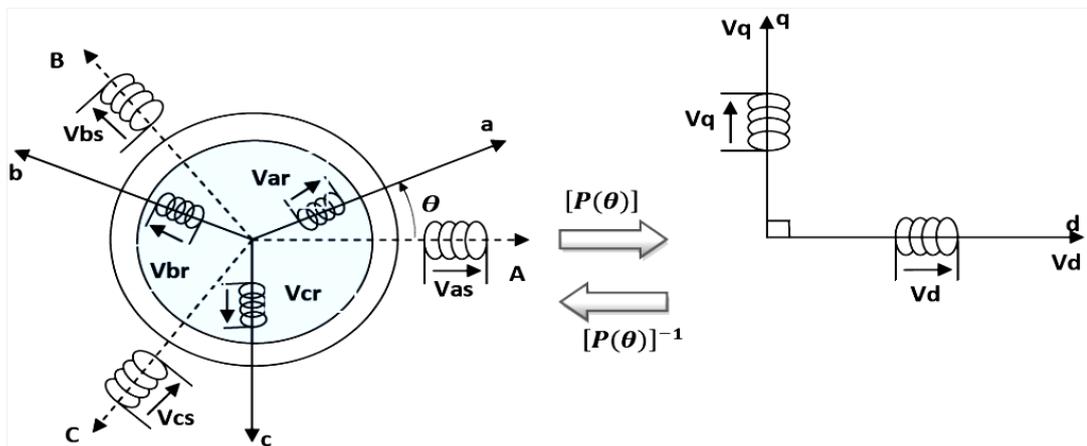


Figure 2.8: Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.

On utilise cette méthode pour simplifier les équations de la machine asynchrone et ainsi obtenir un modèle plus simple .Ce changement permet d'éliminer les inductances variables dans le temps, notamment de rendre la matrices impédance indépendante de θ . Cette transformation permet d'orienter le repère (d-q-o) comme on le désire. Ainsi, on peut l'orienter suivant le stator, le rotor ou encore suivant le champ tournant [29] [30].

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Pour réaliser cette transformation algébrique on utilise les matrices de Park directe (2.7) et inverse (2.8).

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

La projection des grandeurs réelles (a-b-c) sur le repère (d-q) se fait en utilisant la matrice de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Et inversement :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

- $x_a; x_b; x_c$: sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.
- $x_d; x_q$: sont les valeurs instantanées des grandeurs diphasées.
- x_0 : est la composante homopolaire

II.2.8. Modèle de la machine dans le repère biphasé (d,q):

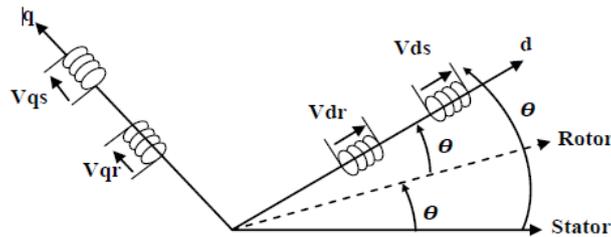


Figure 2.9: Représentation de la machine dans le repère biphasé

Pour un système équilibre la composante homopolaire est considérée comme nulle. L'application de la transformation de Park aux équations de la MADA dans un repère abc, nous donne :

a) Les expressions électriques :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.11)$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad \omega_r = \omega_s - \omega = \frac{d\theta_r}{dt}$$

b) Equations magnétique

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.12)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$ Inductance cyclique statoriques de la machine.

$L_r = l_r - M_r$ Inductance cyclique rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$ Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor de la machine.

c) Equation du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique peut être obtenu à l'aide du bilan de puissance. Il existe plusieurs expressions du couple électromagnétique toutes égales :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{qs} I_{dr} - \phi_{ds} I_{qr}) \quad (2.13)$$

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}) \quad (2.14)$$

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} (I_{qs} \cdot I_{dr} - I_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (2.15)$$

$$C_{em} = P \cdot (\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad (2.16)$$

d) Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par [31] :

Statoriques :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (2.17)$$

Rotoriques :

$$\begin{cases} P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (2.18)$$

II.2.9. Choix du référentiel :

En général l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique. [32].

a) Référentiel lié au Stator :

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées telles que régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \end{cases} \quad (2.19)$$

b) Référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est supposée constante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

c) Référentiel lié au champs tournant :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X, Y), il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \end{cases} \quad (2.21)$$

Dans notre travail on utilise le référentiel lié au champs tournant pour la modélisation et la commande de la MADA. Dans ce cas, le modèle de la MADA devient

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad \text{avec: } \omega_r = \omega_s - \omega \quad (2.22)$$

II.3. Modélisation de convertisseur statique :

II.3.1. Modélisation de l'onduleur de tensions MLI :

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure 2.7, on considère son alimentation comme une source parfaite (bus continu), supposée d'être constituée de deux générateurs de f.e.m égale à $\frac{U_{dc}}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0 .

La machine à été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} V_{bn} V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i' et T_i les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux).

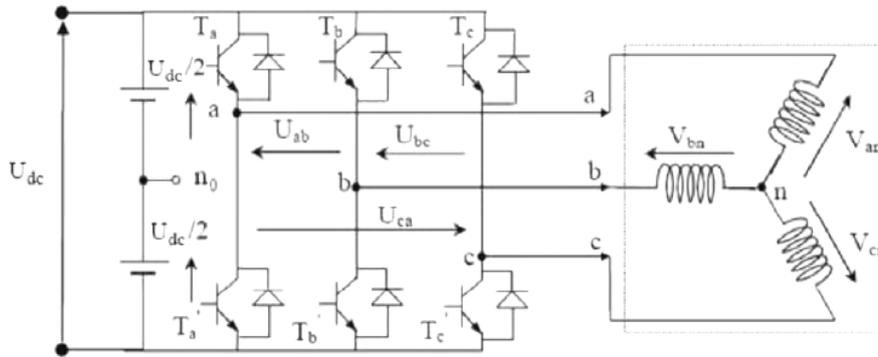


Figure 2.10: Représentation schématique de l'onduleur

On a :

- si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert.
- si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ano} - V_{bno} \\ U_{bc} = V_{bno} - V_{cno} \\ U_{ca} = V_{cno} - V_{ano} \end{cases} \quad (2.23)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (2.24)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_o} = V_{an_o} \\ V_{bn} + V_{nn_o} = V_{bn_o} \\ V_{cn} + V_{nn_o} = V_{cn_o} \end{cases} \quad (2.25)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nno} = \frac{1}{3} [V_{an_o} + V_{bn_o} + V_{cn_o}] \quad (2.26)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits \Leftrightarrow Si ($i = a, b, c$), on a :

$$V_{ino} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad (2.27)$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{an_o} = (S_a - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn_o} = (S_b - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn_o} = (S_c - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad (2.28)$$

En remplaçant l'équation (2.28) dans l'équation (2.27), on obtient :

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{2}{3}V_{an_o} - \frac{1}{3}V_{bn_o} - \frac{1}{3}V_{cn_o} \\ V_{bn} &= -\frac{1}{3}V_{an_o} + \frac{2}{3}V_{bn_o} - \frac{1}{3}V_{cn_o} \\ V_{cn} &= -\frac{1}{3}V_{an_o} - \frac{1}{3}V_{bn_o} + \frac{2}{3}V_{cn_o} \end{aligned} \quad (2.29)$$

En remplaçant l'équation (2.30) dans l'équation (2.31), on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Park pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en générateur(GADA). En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite.

Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de la commande de la machine asynchrone à double alimentation au chapitre suivant.

CHAPITRE

III

Stratège de contrôle vectorielle du système éoliennes

III.1. Introduction :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [33].

Pour la réalisation de ce contrôle nous avons utilisé la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentée. La technique de la commande appliquée à cette machine est réaliser aux moyens des régulateurs PI pour les puissances actif et réactif statoriques

III.2. Modèle pour le contrôle indépendant des puissances :

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique Φ_s .

$$\text{Ains : } \Phi_{ds} = \Phi_s \text{ et } \Phi_{qs} = 0 \quad (3.1)$$

On à Le couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \phi_{ds} I_{qr} \quad (3.2)$$

Donc l'équation des flux sera :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (3.3)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (3.2) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature I_{qr} [33].

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \cdot \phi_s \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec : ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \end{cases} \quad (3.5)$$

A l'aide de l'équation (3.3), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.6)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (3.7)$$

Ou bien encore, d'après l'équation (3.5) par

$$\begin{cases} P_s = V_s \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (3.8)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (3.6) :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} + V_s \cdot \frac{\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir des équations (3.4) et (3.5) nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (3.10)$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (3.11)$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux dans le chapitre(II) paragraphe les courants statoriques par l'expression (3.6) on obtient :

$$F_0(s) = \frac{MV_s}{L_r R_r} \quad (3.12)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (3.12) par leurs expressions dans de chapitre (II) on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec : $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$

Où « g » correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc simplifié à réguler par la suite [33].

En examinant les équations (3.11) et (3.13), on peut établir le schéma bloc de la (figure 3.1) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

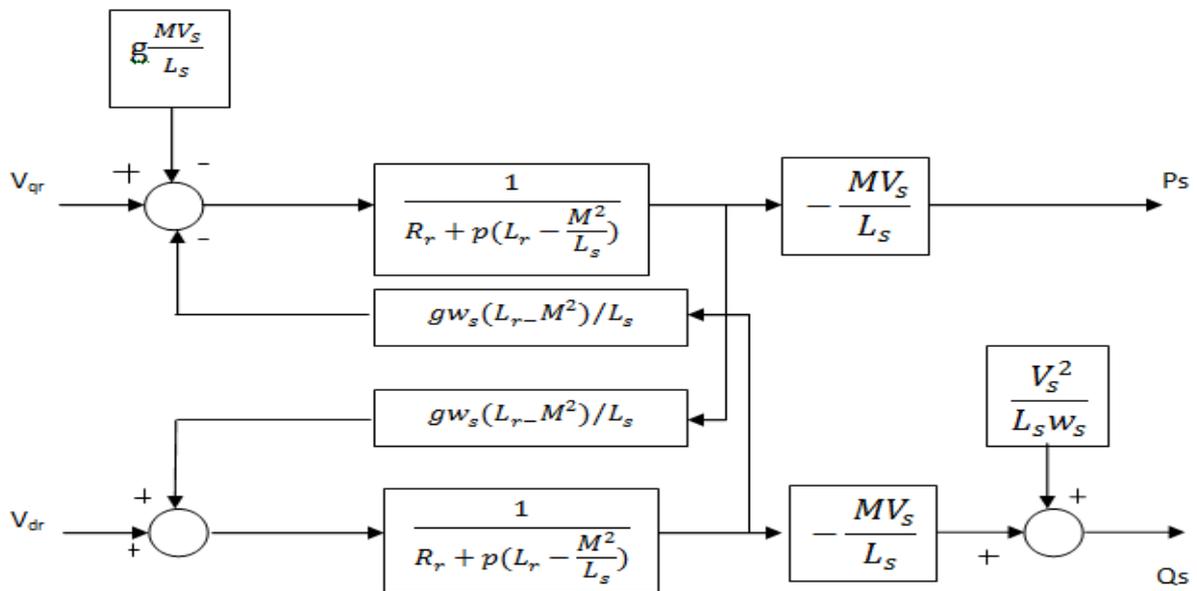


Figure.3.1 : Schéma bloc de la MADA à réguler [34]

III.3. Les différentes méthodes de la Commande des puissances de la MADA :

Il y a deux méthodes pour la commande en puissance de cette machine :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée « *méthode directe* » car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [33].
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée « *méthode indirecte* » [33].

III.3.1. Commande directe :

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{dr} .

III.3.1.1. Mise en place de la régulation :

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (figure 3.1) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$.

Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. Nous ne placerons donc pas de régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la (figure 3.1)

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande avec un seul régulateur par axe, présentée sur la (figure 3.2) [33].

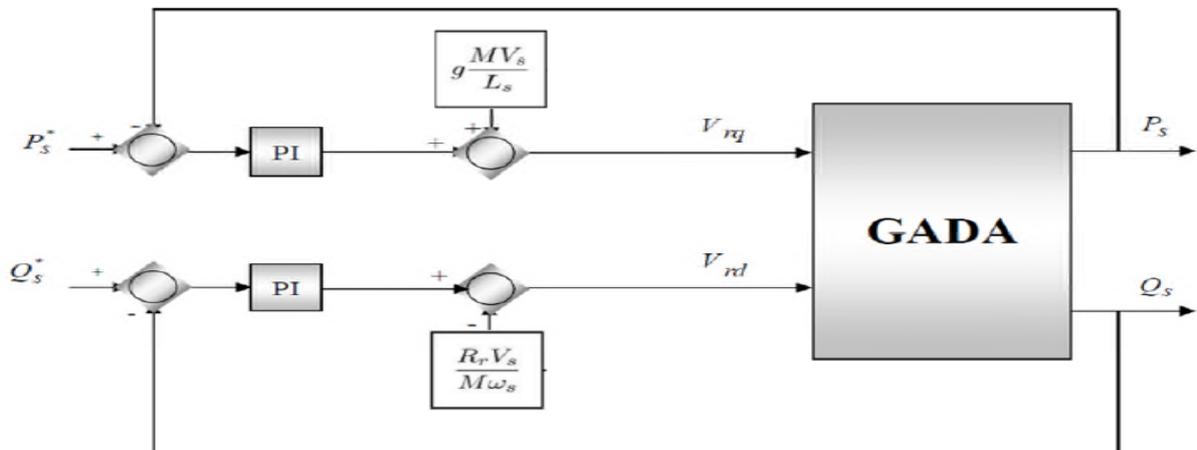


Figure.3.2 : Schéma bloc de la commande directe [33]

III.3.1.2. Commande indirecte :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous l'élément présent dans le schéma bloc que la MADA.

On parle donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques [33].

III.3.1.2.a. Commande sans boucle de puissance :

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la figure (3.3) où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

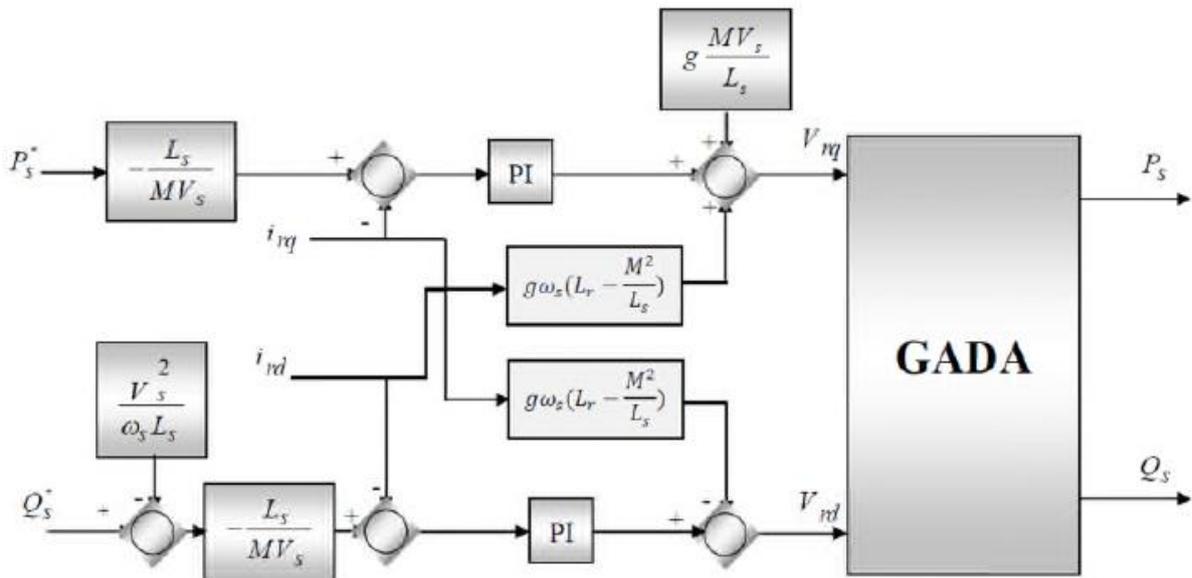


Figure.3.3 : Schéma bloc de la commande indirecte

III.3.1.2.b. Commande avec boucles de puissance :

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en (figure 3.4) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

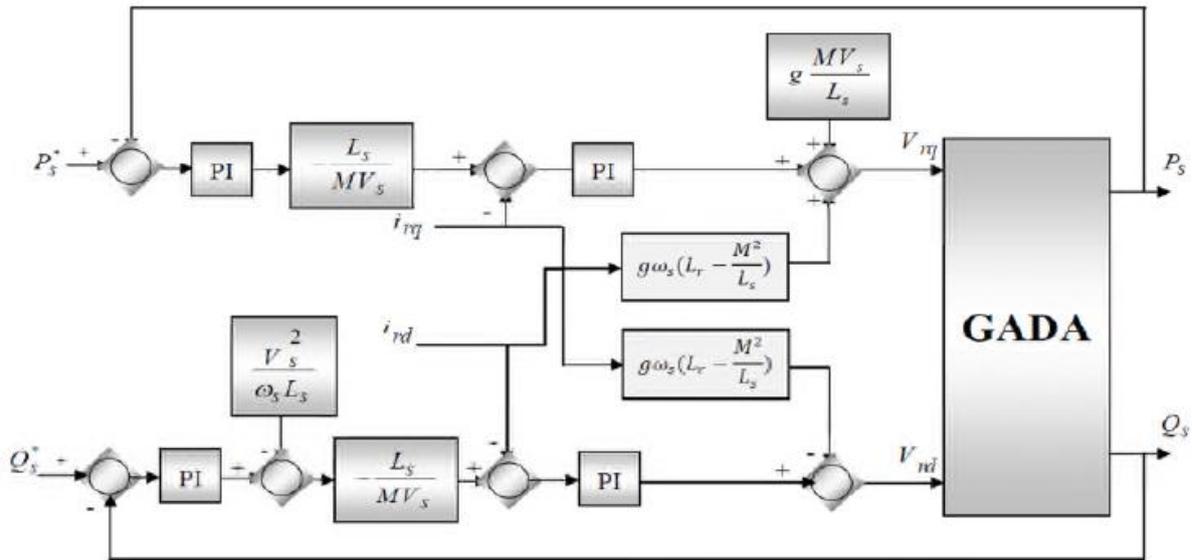


Figure.3.4. Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance [BOY 06]

III .4. Synthèse du régulateur PI :

La régulation proportionnelle intégral (PI) : utilisé pour commander la MADA en génératrice : est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C’est pour cela qu’il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien. La figure (3.5) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur « PI » dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$ correspondant aux deux régulateurs utilisés dans les figures (3.2 ;3.3 ;3.4).

III.4.1. Calcul des régulateurs : [33]

Pour la régulation de notre système on s’intéresse au contrôle des puissances (P_s, Q_s) ainsi que les courants rotoriques (i_{dr}, i_{qr}). La figure (3.5) montre un régulateur proportionnel – intégrale applique au système de primaire ordre.

D’après le schéma des fonctions de transfert en détermine la valeur des PI.

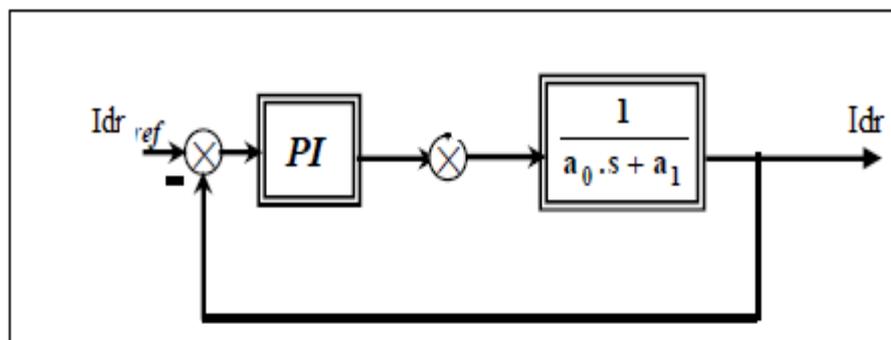


Figure.3.5 : Schéma de la fonction de transfert d’un régulateur PI.

La fonction de transfert du régulateur PI est donnée par :

$$C_s = k_p + \frac{k_i}{S} \tag{3.14}$$

Donc, La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F(s) = \frac{k_p \cdot S + k_i}{a_0 \cdot S^2 + a_1 \cdot S} \tag{3.15}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$F(s) = \frac{T(s)}{1+T(s)} = \frac{1 + \tau S}{\frac{a_0}{k_i} S^2 + \tau S + 1} \tag{3.16}$$

Avec : $\tau = \frac{k_p}{k_i}$

III.4.2. La régulation des puissances [34] :

Le schéma suivant montre la boucle de régulation du système corrigé par le PI. Sa fonction de transfert est de la forme :

$$F(s) = \frac{1 + ST_n}{ST_i} \tag{3.17}$$

T_n et T_i représentent respectivement la constante de temps de dosage de la corrélation d'intégration et la constante de temps d'intégration.

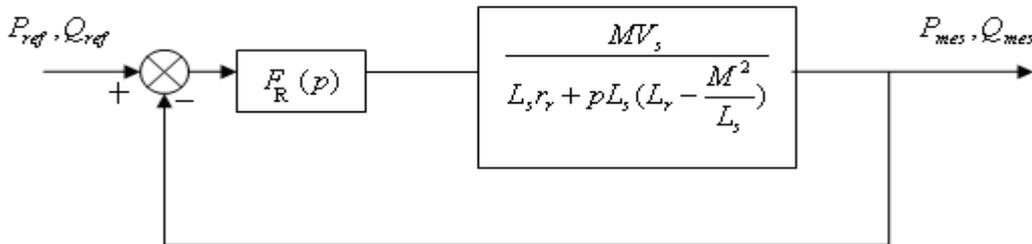


Figure.3.6 : Schéma de régulation des puissances [34]

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est donnée par :

$$F_0(s) = \frac{1 + ST_n}{ST_i} = \frac{\frac{MV_s}{L_r R_r}}{1 + S \left(\frac{L_r - M^2}{L_s} \right) \frac{1}{R_r}} \tag{3.18}$$

Afin d'éliminer la constante de temps T_n ; on choisit la méthode de compensation selon laquelle :

$$T_n = \frac{\frac{L_r - M^2}{L_s}}{R_r} \quad (3.19)$$

Ainsi la fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$F_0(s) = \frac{\frac{MV_s}{L_s R_r}}{ST_i} \quad (3.20)$$

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$F_F(s) = \frac{F_0(s)}{1 + F_0(s)} = \frac{1}{1 + \tau_r S} \quad (3.21)$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{T_i L_s R_r}{MV_s}$$

τ_r est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes. S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

$$\text{La constante de temps d'intégration est : } T_i = \frac{MV_s \tau_r}{L_s R_r}$$

III.5. Modèle de simulation du système éolien :

La modalisation de la machine, de la partie mécanique et de la commande directe a été implanté dans l'environnement simulink (figure (3.7)) afin d'effectuer des tests de la régulation. Les figures suivantes présentent les résultats de simulation avec les paramètres suivants pour la génératrice :

$R_s=0.95\Omega$; $R_r=1.8\Omega$; $L_s=0.094H$; $L_r=0.088H$; $M=0.082H$

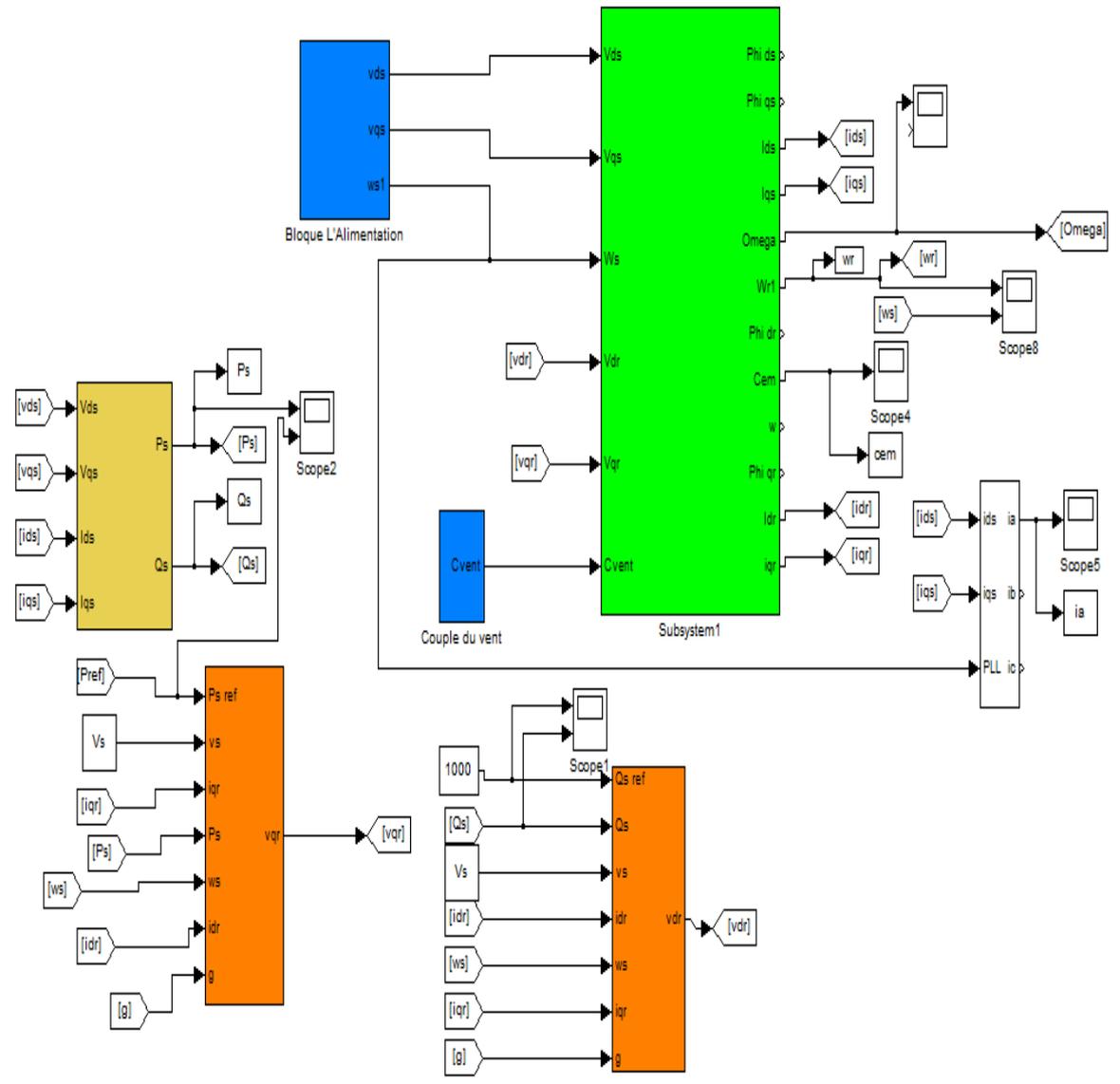


Figure.3.7 : Modèle du système éolien

III.5.1. Résultat de simulation :

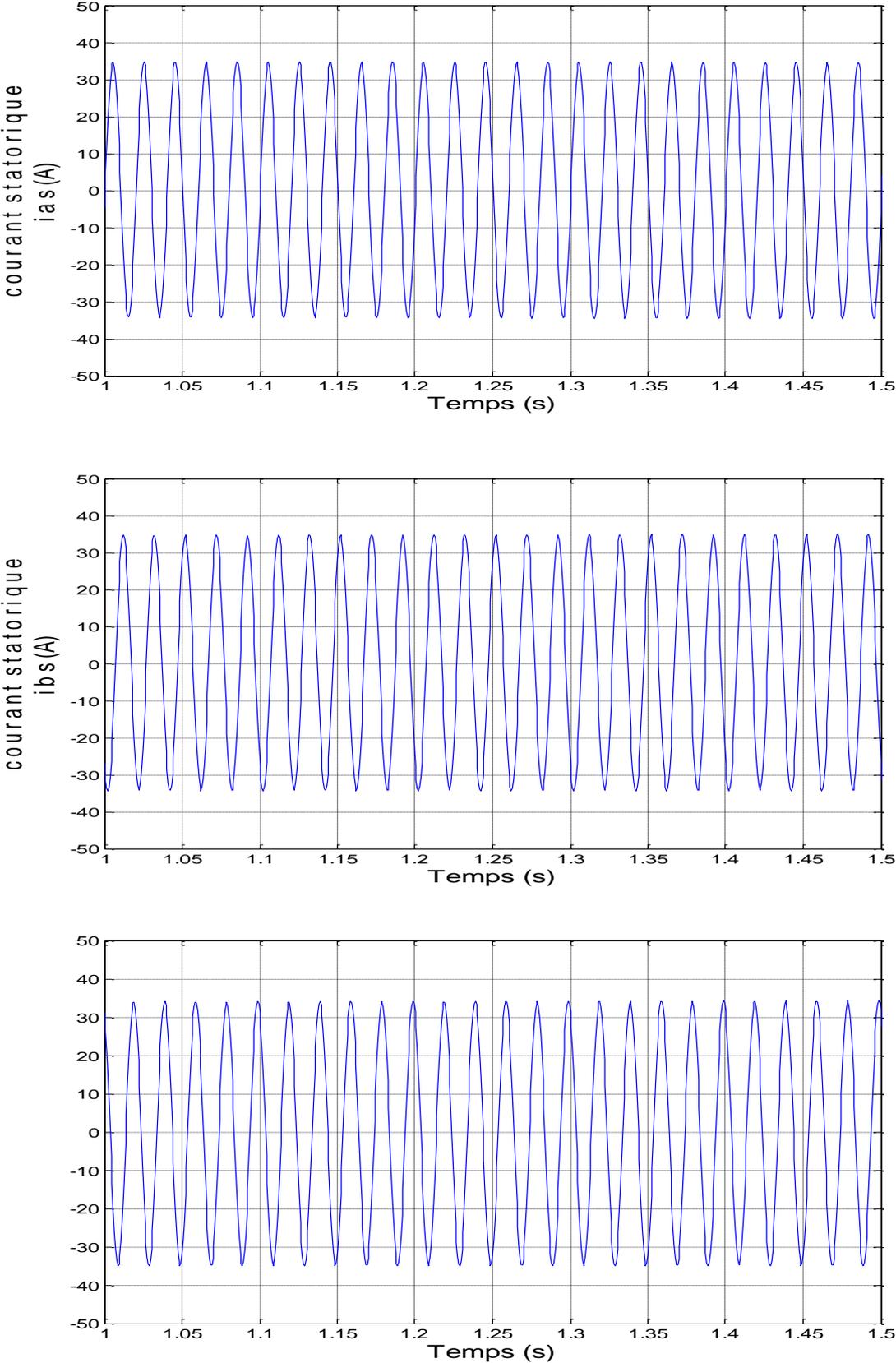


Figure.3.8 : Courant statorique généré par le système en fonction du temps.

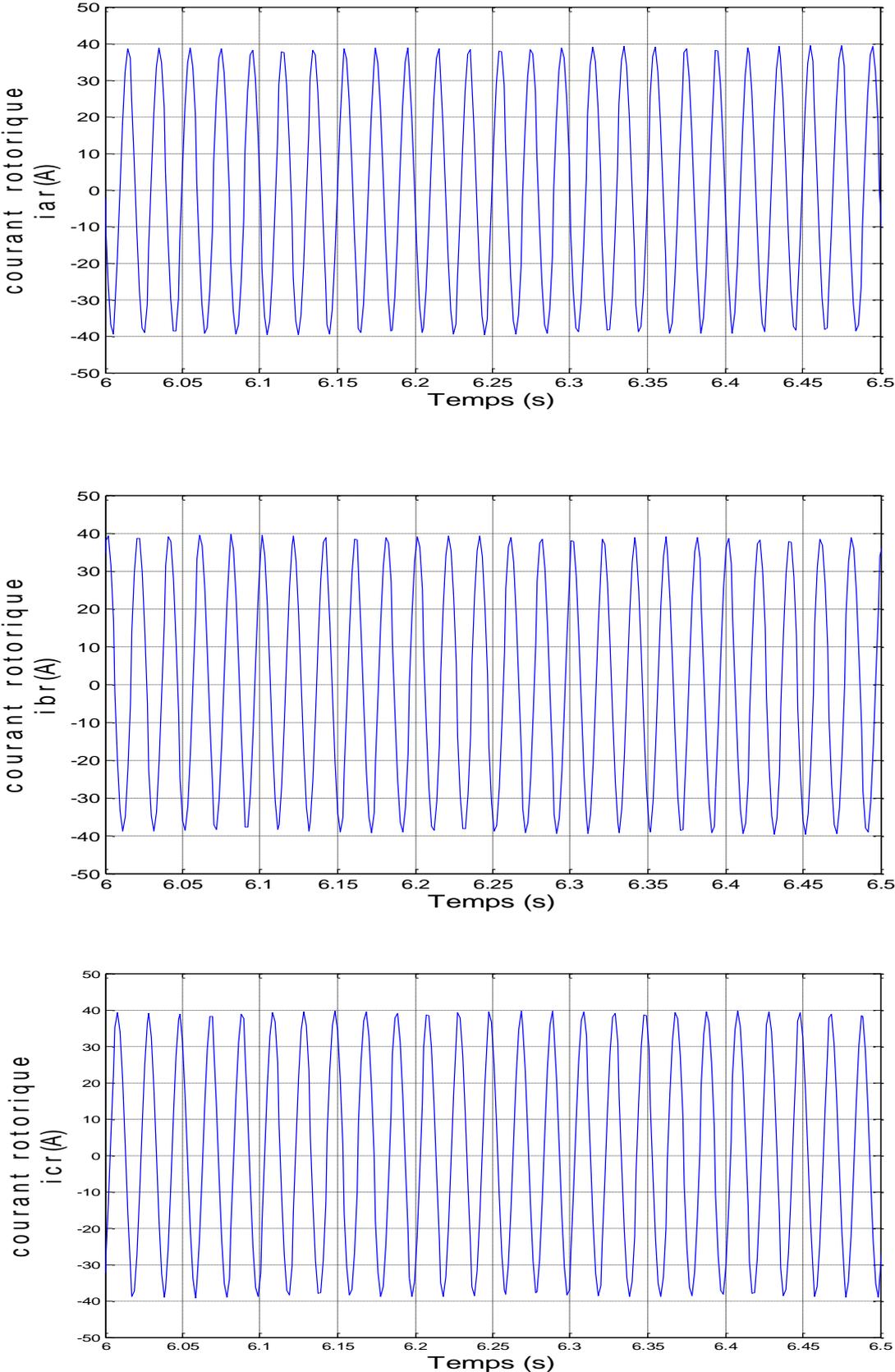


Figure.3.9 : Courant rotorique du système en fonction du temps.

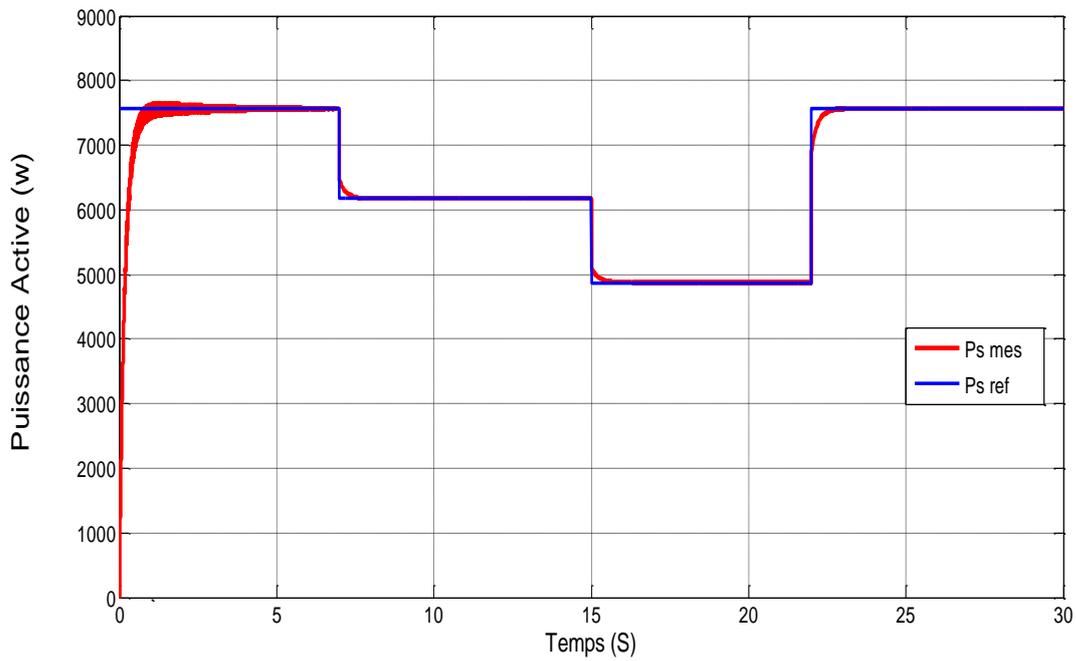


Figure.3.10 : Evolution de la puissance active statorique généré par le système en fonction du temps

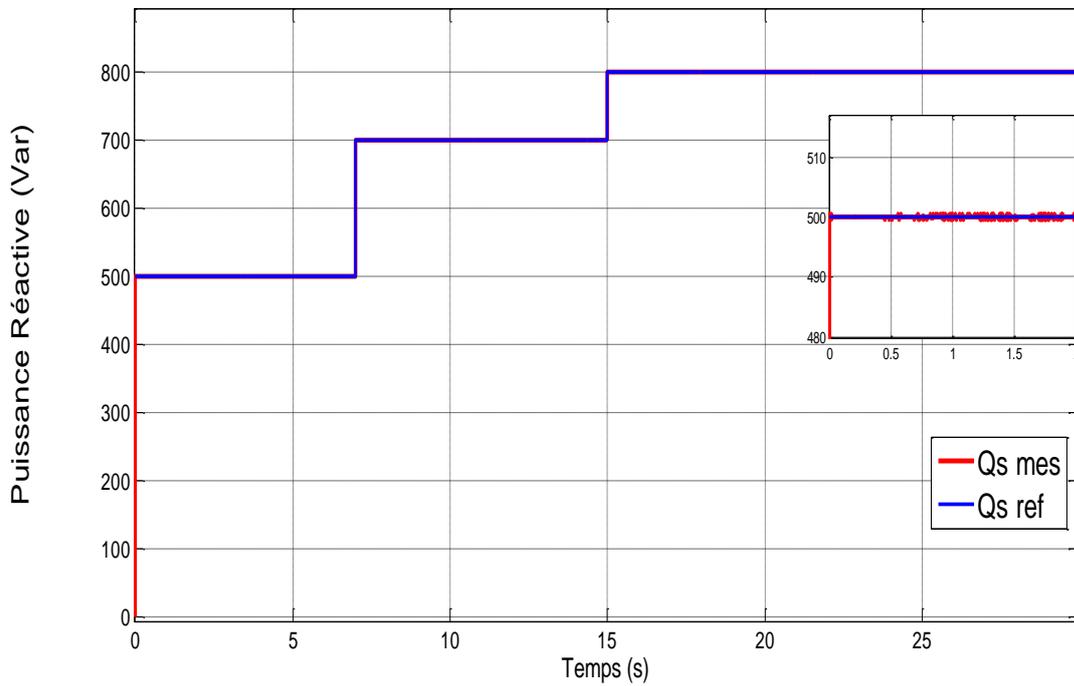


Figure.3.11 : Evolution de la puissance réactive statorique généré par le système en fonction du temps.

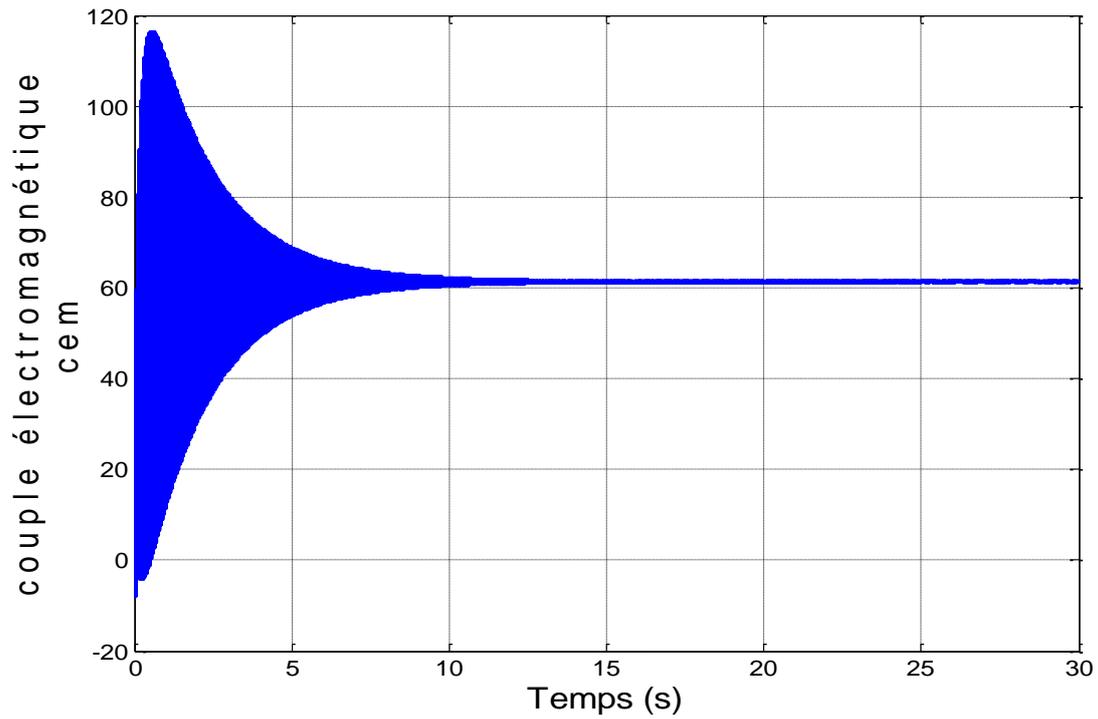


Figure.3.12 : Evolution du couple électromagnétique du système en fonction du temps

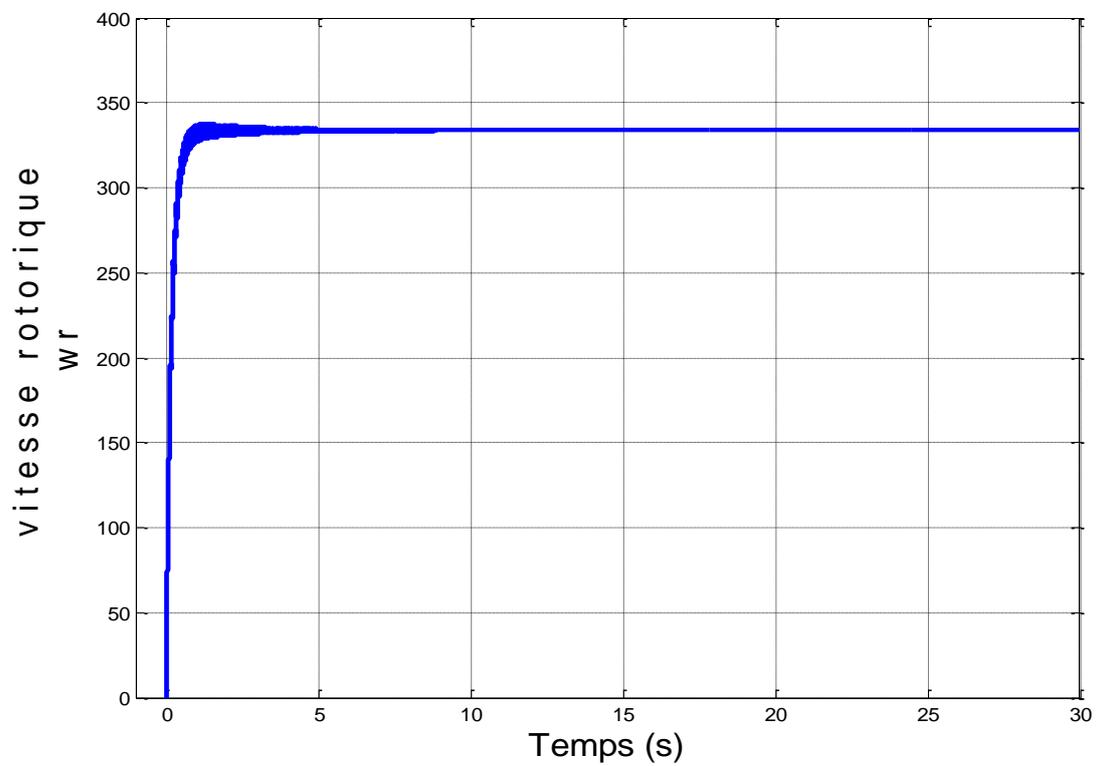


Figure.3.13 : Evolution de la vitesse rotorique en fonction du temps

III.5.2. Interprétation des résultats :

Après La simulation sous Matlab/Simulink du système éolien contrôlé par PI nous avons trouvé le résultat suivant :

La figure (3.8 et 3.9) montrée respectivement l'évolution du courant statorique généré par le système et le rotorique au niveau du rotor de la MADA en fonction du temps avec des amplitudes égales à 35A et 40A pour les trois phases.

L'évolution de la puissance active et réactive statorique généré par le système en fonction du temps est d'une façon sinusoïdale vers la valeur de 7.5Kw pour la puissance active et 800var pour la puissance réactive (figure (3.10 et 3.11)).

La stabilisation de puissance actives vers la valeur de 7.5Kw est dépassé les premières 5s après Le démarrage du système jusqu'au la 7^{ème} seconde.

Dans la 7^{ème} seconde la valeur de la puissance active est diminuer a 6.1Kw puis reste stable jusqu'au la 15^{ème} seconde.

Dans la 15^{ème} seconde la puissance active est diminuer a 4.9Kw puis reste stable jusqu'au la 23s seconde, puis augmenté dans le temps 23s jusqu'au 7.5Kw et reste stable jusqu'au la seconde 30s

La puissance réactives est stabilisé à 500var dans l'intervalle 0s-7s, après augmenté à la valeur 700var est stabilisé vers cette valeur jusqu'au la 15^{ème} seconde.

Dans la 15^{ème} seconde la valeur de la puissance réactive est augmentée à 800var puis reste stable.

La figure 3.12 montrée l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps d'une façon sinusoïdale vers la valeur de 61N.m.

La figure 3.13 montrée l'augmentation de la vitesse rotorique de 0 rad/s jusqu'à 335 rad /s d'une façon sinusoïdale. La stabilisation de la vitesse rotorique est dépassé l'instant $t=5s$.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a modélisé le système global turbine-Machine d'une éolienne de 7.5Kw de puissance à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation est contrôlée à l'aide de régulateurs PI. Malgré plusieurs avantages (simplicité, rapidité, coûts), la variation de la vitesse du vent impose un contrôle complexe.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif préalablement défini de ce travail consistait à étudier et modéliser la machine double alimentation en mode génératrice (GADA) pour une application dans un système de conversion d'énergie éolienne. Notre objectif était de mettre en œuvre une stratégie de commande nécessaire au bon fonctionnement de l'éolienne.

Dans le premier chapitre, nous avons vu des généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne, On a donné un aperçu sur les différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique avec leurs différentes structures, les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal, nous avons modélisé le système turbine éolienne associé à la MADA. Ce chapitre a traité également les différents types de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

Dans le deuxième chapitre, et comme une première partie nous avons vu une étude sur la machine asynchrone à double alimentation, la structure de cette machine ainsi que les modes de fonctionnement. Dans la deuxième, nous avons modélisé cette machine en mode génératrice en utilisant une transformation triphasé-biphasé qui appelé la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants facile à exploiter et résoudre.

Dans le troisième chapitre, et afin de mieux commander la vitesse de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation, on a appliqué la technique de la commande vectorielle à la MADA pour maîtriser la difficulté de son réglage. On a associé à cette technique de commande vectorielle un régulateur de puissance de type PI, ce qui a permis au système éolien d'obtenir une bonne performance en terme de poursuite du point de fonctionnement optimal à maximum de puissance. D'autre part, la structure choisie pour alimenter le rotor de la MADA constituée par deux convertisseurs électroniques réversibles, a été d'une grande importance dans le fonctionnement de la MADA à facteur de puissance unitaire, et a permis la bidirectionnalité de la conversion énergétique rotorique.

Finalement, Les résultats de simulation obtenus montrent bien les performances de la commande au point de vue précision, stabilité et robustesse.

ANNEXES

Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

Resistance du stator	$R_s = 0.95\Omega$
Resistance du rotor	$R_r = 1.8\Omega$
Inductance propre du stator	$L_s = 0.094H$
Inductance propre du rotor	$L_r = 0.088H$
Inductance mutuelle	$M = 0.082H$
Moment d'inertie	$J = 0.1Kg.m^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.06m.s/rd$
Nombre des pôles	$p = 2$
puissance nominale	$P_n = 7.5Kw$
Tension statorique nominale	$V_{ns} = 220V$
Fréquence nominale	$F = 50Hz$

REFERENCE
BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. LEBADI, L. LOUAFI, « Control Des Puissances Active et Réactive De LA MADA » Mémoire De fin d'étude, Université De Mohamed BOUDIAF- M'SILA, Algérie 2018.
- [2] F. KENDOULI, « Centrale éolienne et Qualité de L'énergie Electrique » Thèse Doctorat en Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, Algérie 2012.
- [3] A. GAILLARDA, « Système éolienne base sur une MADA contribution a l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service » Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, avril2010.
- [4] B. KELKOUL, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone a Double Alimentation » Mémoire pour obtenir le grade de Magister API, Université de Tlemcen Algérie juin2011.
- [5] Y. DJERRIRI, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorante Electrotechnique, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbes, Algérie, octobre 2015.
- [6] Rachel Baïle, « analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne », thèse de doctorat ; université de corse, 2010.
- [7] Luc Moreau, « modélisation, conception et commande de génératrices à reluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, université de Nantes ; 2005.
- [8] J. MARTIN, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [9] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, « Eoliennes », techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21.
- [10] M. HASSAD, « influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », mémoire de magister, université setif 2012.
- [11] B. Boukhezzar, « sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable » thèse de doctorat, université de Paris, 2006.
- [12] F. poitiers, « étude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome -machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau) », thèses de doctorat, université de Nantes, 2003.
- [13] C. Bennour, « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en : Electrotechnique Université Mohamed Khider – Biskra 2012
- [14] S.M. Boudia, Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2013.

- [15] F. Chellali, « Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie ». Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2011.
- [16] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Recioui, « A contribution in the actualization of wind map of Algeria. Renewable and Sustainable Energy Reviews » 2011 ; vol 15, pp : 993-1002.
- [17] N. Kasbadji Merzouk. Evaluation du gisement énergétique éolien. Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2006
- [18] M.A. HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012.
- [19] A. Kheniche, F. Boutaghane. « Modélisation et commande un générateur asynchrone a double alimentation pour production éolienne » l'obtention du diplôme de master en électrotechnique 2015.
- [20] B. toual « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » thèse de magister de l'Université de Batna ,2010.
- [21] F. POITIERS, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France 2003.
- [22] N. Cherfia, « conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens », thèse de Magister, Université Mentouri - Constantine.
- [23] M. Bouaraki, « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M'hamed bougara-Boumerdes, 2012.
- [24] M.A. HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012
- [25] F. merrahi, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) » thèse de magister de l'Ecole Nationale polytechnique, 2007.
- [26] M. Bouaraki, « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbin éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magister de l'université M'hamed bougara, boumardas ,2011.
- [27] Y. BEKAKRA « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone a double alimentation. Thèse de doctorat en science université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, octobre 2014

- [28] F. OUAOUDIA, Y. Thinhinane. « Commande non linéaire en puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation dédiée à une éolienne ». Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Electrique Université A. Mira de Bejaia 2020.
- [29] Y. DJERRIRI, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Doctorante Electrotechnique, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbes, Algérie, octobre 2015.
- [30] R. Defontaines « Etude et simulation de MADA Mémoire pour l'obtention d'une maîtrise en génie électrique », école technologie supérieure université du Québec Canada,2012.
- [31] Proceedings of the 6th International Conference on Systems and Control, University of Batna 2, Batna, Algeria, May 7-9, 2017.
- [32] F. TRIA « Contribution à la commande d'un système éolienne base sur une MADA Par différentes techniques » M'EMOIRE de Magister, Université d'El-oued, Algérie,2013.
- [33] A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy1, décembre 2006.
- [34] A. MOUSSA SIDDO « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie 2007.