

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Automatique

Filière : Génie Electrique

Présenté par

Sofiane DJEMA

Noureddine NASRI

Mémoire dirigé par **Ahmed KASRI**

Thème

Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation destinée à l'énergie éolienne

Mémoire soutenu publiquement le 09 juillet 2015 devant le jury composé de :

M Med Tahar BENSIDHOUM

MCA, UMMTO, Président

M Ahmed KASRI

MAA, UMMTO, Rapporteur

Mme Khedoudja KHERRAZ

MAA, UMMTO, Examineur

Mme Prénom YUCEFI

MAA, UMMTO, Examineur



Remerciements

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier profondément Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à Mr. KASRI Ahmed, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de sa large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Nos remerciements aux membres du jury qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont directement contribué au bon déroulement de ce projet de fin d'étude:

- ❖ Aux personnels du département et particulièrement ceux de la bibliothèque.
- ❖ A tous les professeurs de la faculté génie électrique d'université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU pour leurs conseils et leurs orientations.
- ❖ A nos parents et à toute la famille DJEMA et NASRI
- ❖ A nos frères et sœurs.
- ❖ A tous nos amis particulièrement ceux qui nous ont aidé dans ce projet.

Et enfin nos remerciements à toutes les personnes qui ont eu la gentillesse et la gratitude de nous aider de près ou de loin dans la réalisation de ce projet.

Et merci à tous.....



Dédicaces

DEDICACES

SOFIANE

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma très chère mère qui m'a aidé, soutenu et encouragé pendant mon travail.*
- *Mon très cher père qui a fait beaucoup de sacrifices pour moi.*
- *Ma très chère sœur : CHAHIRA*
- *Ma nièce : MERIEM*
- *Mon neveu : ANICE*
- *Mes très chers frères : KHALED et BILAL*
- *Mes proches : MES tentes et mes oncles*
- *Mes chers amis : ALI, AMINE, BRAHIM, TOUFIK, AHMED, MADJID, RAFIK, DJAMAL, FATEH.....*

SOFIANE



DEDICACES

NOUREDDINE

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma très chère mère qui m'a aidé, soutenu et encouragé pendant mon travail.*
- *Mon très cher père qui a fait beaucoup de sacrifices pour moi.*
- *Mes très chères sœurs : LYNDA , LILA et FARIDA*
- *Mes très chers frères : KAMEL et SLIMANE*
- *Mes proches : MES tentes et mes oncles*
- *Mes chers amis : ALI, AMINE, BRAHIM, TOUFIK, AHMED, MADJID, RAFIK, DJAMAL, FATEH.....*

Noureddine



Notations et symboles

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation

s, r	Indice du stator, du rotor
d, q	Indice des composantes orthogonales directes et en quadrature
R_s, R_r	Résistance statorique, rotorique
L_s, L_r	Inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine
l_s, l_r	Inductances propres statoriques et rotoriques de la machine
M_{sr}	Inductance mutuelle stator-rotor
L_m	Inductance mutuelle maximum entre les enroulements du stator et rotor
Φ_s, Φ_r	Flux statorique et rotorique
V_s, V_r	Tension simple respectivement statorique et rotorique
θ_s, θ_r	Angle électrique statorique, rotorique
ω_s, ω_r	Pulsation statorique, rotorique
p	Nombre de paires de pole
g	Glissement
P	Opérateur de LAPLACE
C_{em}	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
C_{aer}	Couple aérodynamique
F	Coefficient de frottement visqueux
J	Inertie de la machine
P_{mec}	La puissance mécanique
P_s	Puissance active statorique
Q_s	Puissance réactive statorique
P_r	Puissance active rotorique
Q_r	Puissance réactive rotorique
Φ_{ds}, Φ_{qs}	Flux statorique dans le repère (d;q)
Φ_{dr}, Φ_{qr}	Flux rotorique dans le repère (d;q)
P_{vent}	Puissance du vent



Notations et symboles

φ	Masse volumique du vent
v	Vitesse du vent
C_p	Coefficient de puissance
B	Angle de calage
P_{tur}	Puissance de la turbine
S	Surface balayée par la turbine
Λ	Vitesse spécifique
Ω_{tur}	vitesse de la turbine
G	Multiplicateur mécanique
C_G	Couple issu du multiplicateur
R	Rayon de la turbine
MCC	La machine à courant continu
[P]	Transformation de park directe
$[P]^{-1}$	Transformation de park inverse
P_{aero}	Puissance aérodynamique
C_{mec}	Couple mécanique
Ω_{mec}	La vitesse de rotation de la MADA,
P_n	Puissance nominale de l'éolienne
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
PWM	Pulse Width Modulation
Ki, Kp	Gains du régulateur PI classique
RSC	Rotor side converter (Convertisseur de côté du rotor)
GSC	Grid side converter (Convertisseur côté Grille)
MPPT	Maximum Power Point Trackin (Point de puissance maximale poursuite)
FMM	Force magnétomotrice

Notations et symboles

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	(Page - 1)
Chapitre I : Généralités sur les système éoliens	
I.1. Introduction.....	(Page - 3)
I.2. Définition de l'énergie éolienne.....	(Page - 3)
I.3. Les différents composants d'une éolienne.....	(Page - 4)
I.4. Les différents types d'éoliennes.....	(Page - 6)
➤ L'éolienne à axe horizontal.....	(Page - 6)
➤ L'éolienne à axe vertical.....	(Page - 6)
I.5. La puissance disponible et la puissance prélevée au vent.....	(Page - 8)
I.6. Les générateurs asynchrones.....	(Page - 10)
I.6.1. Généralités.....	(Page - 10)
I.6.2. Principe de fonctionnement.....	(Page - 11)
I.6.3. Générateur asynchrone à cage d'écureuil (auto excité).....	(Page - 12)
I.6.4. Générateur asynchrone à double alimentation (MADA).....	(Page - 13)
I.7. Conclusion.....	(Page - 15)
Chapitre II : Modélisation de la MADA	
II.1. Introduction.....	(Page - 16)
Partie I : Modélisation de la partie électrique (Page - 16)	
II.I.1. Les différents modes de fonctionnement de la MADA.....	(Page - 16)
II.I.1.1. Mode générateur hypo synchrone.....	(Page - 17)
II.I.1.2. Mode générateur hyper synchrone.....	(Page - 17)
II.I.1.3. Mode moteur hypo synchrone.....	(Page - 18)
II.I.1.4. Mode moteur hyper synchrone.....	(Page - 18)
II.I.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation.....	(Page - 19)
II.I.2.1. Avantages de la MADA.....	(Page - 19)
II.I.2.2. Inconvénients de la MADA.....	(Page - 20)
II.I.3. Modèle de la MADA dans le repère de Park.....	(Page - 21)
II.I.4. Les différentes équations de la MADA.....	(Page - 21)
II.I.5. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park (d;q;0).....	(Page - 25)
Partie II : Modélisation de la partie mécanique (Page - 28)	
II.II.1. Quelques définitions.....	(Page - 28)
II.II.2. Puissance récupérable par une turbine.....	(Page - 29)
II.II.3. Spécificités liées à la technologie des turbines éoliennes.....	(Page - 29)



Sommaire

II.II.4. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	(Page - 33)
II.II.5. Modèle du multiplicateur de vitesse.....	(Page - 34)
II.II.6. Equation mécanique sur l'arbre à la sortie du multiplicateur.....	(Page - 35)
II.II.7. Conclusion.....	(Page - 36)

Chapitre III : Commande de la MADA

III.1. Introduction.....	(Page - 37)
III.2. Principe du contrôle vectoriel à flux orienté.....	(Page - 37)
III.3. Commande vectorielle de la MADA.....	(Page - 39)
III.4. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	(Page - 40)
III.4.1. Orientation du flux statorique.....	(Page - 40)
III.4.2. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique.....	(Page - 42)
III.4.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	(Page - 42)
III.4.4. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	(Page - 43)
III.5. Mise en œuvre de la régulation.....	(Page - 45)
III.5.1. Mise en place de la régulation.....	(Page - 45)
III.5.2. Synthèse de régulateur PI.....	(Page - 47)
III.6. Dispositif de puissance.....	(Page - 50)
III.6.1. Commande du convertisseur côté rotor (RSC).....	(Page - 50)
III.6.2. Association onduleur MADA.....	(Page - 51)
III.7. Modélisation de l'onduleur triphasé de tension.....	(Page - 51)
III.8. Conclusion.....	(Page - 54)

Chapitre IV : Simulations et résultats

IV.1. Introduction.....	(Page - 55)
IV.2. Simulation du système éolien.....	(Page - 55)
IV.2.1. Schémas bloc de la simulation.....	(Page - 55)
IV.2.2. Résultats de la simulation.....	(Page - 57)
➤ Modèle du vent.....	(Page - 57)
IV.3. Simulation de l'onduleur triphasé.....	(Page - 62)
IV.4. Conclusion.....	(Page - 65)
<u>Conclusion générale</u>	(Page - 66)
Annexe	(Page - 68)



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer.

Il est nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquence pour l'homme et l'environnement. C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,...

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'accroissement de la demande de plus en plus galopante. Après des siècles d'évolution et des recherches plus poussées depuis quelques décennies, plusieurs pays se sont, aujourd'hui, résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont: l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, la Hollande 912 MW et l'Amérique du nord 6677 MW. Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon). Par contre en Afrique, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la technologie accessible.

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre que le mémoire que nous vous présentons décrit une étude sur l'utilisation des machines asynchrones dans un système éolien.

Introduction générale

Actuellement, le système éolien à vitesse variable basé sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les fermes éoliennes terrestres. Son principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ses convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique .

Notre travail est réparti comme suit:

Le chapitre I sera consacré à l'étude assez détaillée du système éolienne et des différentes structures existantes (les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et leur constitution). Dans notre travail, on s'intéressera à la génératrice à double alimentation.

Le deuxième chapitre introduira la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice à double alimentation, qui est effectuée dans un repaire déphasé lié au champ statorique.

Dans le troisième chapitre , on utilisera la commande vectorielle à flux statorique orienté, puis on présentera le calcul de régulateurs de type PI. Ensuite une modélisation d'un onduleur de tension contrôlés par PWM sera effectuée.

Dans le quatrième et dernier chapitre de ce mémoire on validera la commande choisie par les résultats de simulation qui seront commentés.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction

Depuis des siècles, l'homme utilise l'énergie du vent pour faire avancer des bateaux, moudre du grain ou pomper de l'eau. Cette source d'énergie nous sert maintenant à produire de l'électricité.

Depuis quelques années, la production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux atouts : c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui utilise les ressources nationales et concourt donc à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements. Enfin, le démantèlement des installations et la gestion des déchets générés pourront se faire sans difficultés majeures et les sites d'implantation pourront être réutilisés pour d'autres usages. Des difficultés existent malgré tout : la gestion technique de la production sur le réseau électrique, certains impacts environnementaux (avifaune, paysage, bruit) et l'aménagement du territoire [22].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des rappels sur les systèmes éoliens et leur évolution dans le temps, les concepts physiques régissant leur fonctionnement, suivis d'un rappel des différentes configurations possibles des systèmes éoliens et les convertisseurs qui leur sont associés.

I.2. Définition de l'énergie éolienne

Le vent est principalement le résultat de mouvements de masses d'air chaud et d'air froid. Le soleil chauffe les masses d'air au niveau du sol, celles-ci deviennent plus légères et s'élèvent.

Des masses d'air froid s'empressent de combler ce vide pour rétablir l'équilibre ce qui crée les vents locaux. Le même principe s'applique à une plus grande échelle entre les masses d'air des calottes polaires (froides) et celles de l'équateur (chaudes). Ce phénomène est en plus associé à la rotation de la Terre et forme alors les vents dominants.

Le vent est donc de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique qui dépend de sa masse (m) et de sa vitesse (v).

La masse de l'air s'exprime comme le produit du volume occupé (V) en mètre cube par la masse volumique (ρ) en kilogramme par mètre cube.

Dans le cas du vent actionnant une éolienne, le volume occupé dépend de la zone balayée par le rotor. La puissance du vent sur l'éolienne correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

Ce n'est toutefois qu'au cours des 40 dernières années environ que les éoliennes modernes ont commencé à transformer les grandes quantités d'énergie contenues dans le vent en électricité.

Les éoliennes modernes sont de plus en plus concurrentielles avec des sources traditionnelles de production de l'énergie elles ne sont plus une technologie expérimentale, mais bien des appareils disponibles dans le commerce. Il est possible d'en installer une seule ou d'en mettre plusieurs ensembles et de former ainsi un parc d'éoliennes. L'une des certitudes de la transformation d'énergie éolienne en électricité est que l'air n'est pas un fluide dense [23].

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

I.3. Les différents composants d'une éolienne

Généralement, l'éolienne est constituée d'une hélice, une nacelle et d'une tour.

- L'hélice est composée de pales qui transforment l'énergie présente dans le vent en un mouvement rotatif.

- La nacelle est la partie où l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Il y a aussi dans la nacelle des systèmes de contrôle et de frein dans le cas où le vent serait trop fort.

- Le mât et les fondations, qui supportent la nacelle et le rotor, ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes qu'il peut y avoir. Le mât est plus ou moins haut (dépend de la machine et de la vitesse du vent qui cherche à être récupérée). Il peut faire en général de 10 à 100 m de hauteur.

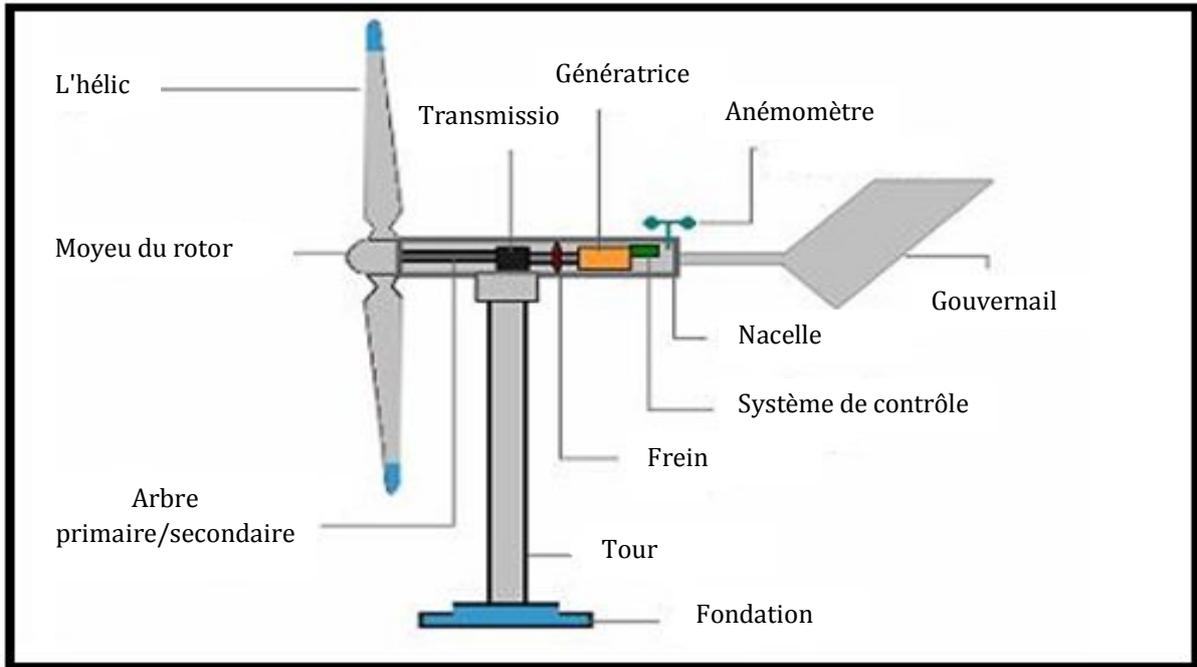


Figure I.1 : schéma d'une éolienne horizontal

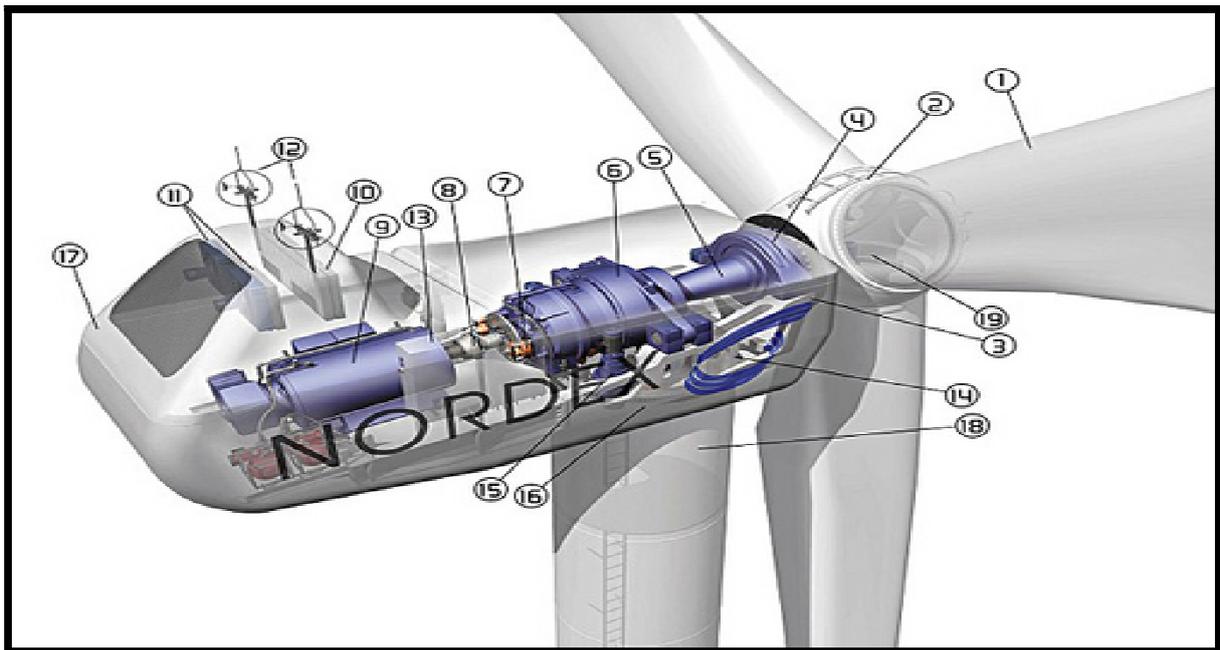


Figure I.2 :Eléments constituant une éolienne

1. les pales, 2. le moyeu, 3. la turbine, 4. le rotor, 5. l'arbre de rotor, 6. le multiplicateur, 7. le rein de disque, 8. l'accouplement flexible du générateur, 9. le générateur asynchrone à refroidissement, 10. le radiateur de refroidissement, 11. le ventilateur, 12. le système de mesure du vent, 13. le système de commande, 14. le circuit hydraulique, 15. le système d'orientation, 16. Châssis, 17. Gouvernail, 18. Tour, 19. Nez conique

1.4. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent se classer en deux catégories selon l'axe de rotation du rotor (voir figure I.3)

➤ L'éolienne à axe horizontal :

Cette éolienne a besoin de s'orienter par rapport au vent pour fonctionner. L'hélice de ce type d'éolienne est perpendiculaire au vent sur un mât qui varie de 10 à 100 m en général. Elle possède entre 1 et 4 pales. L'hélice peut être en amont de la machine par rapport au vent, on dit alors que l'éolienne est à « hélice au vent ». Dans le cas contraire, l'éolienne est à « hélice sous le vent ». C'est le type le plus répandu à l'heure actuelle car c'est celui qui possède le rendement le plus élevé.

➤ L'éolienne à axe vertical :

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables. On les doit aux inventeurs Savonius et Darrieus.

L'éolienne **Savonius** comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer.
- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français **Darrieus** est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes (Aéole, 4 MW, installée au Canada en 1987), n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient consentis dans la recherche sur ce sujet.

Malgré le fait que la technologie n'est pas encore mûre, les éoliennes à axe vertical font l'objet d'intenses recherches, et de nombreux nouveaux modèles apparaissent régulièrement sur le marché. Celles-ci présentent en effet plusieurs atouts :

- Elles sont généralement moins bruyantes que les éoliennes à axe horizontal.
- Elles supportent des vents plus forts (jusqu'à 40m/s).
- Elles captent les vents de toutes directions, notamment les vents turbulents, étant ainsi plus appropriées en milieu urbain.
- Elles sont souvent jugées plus esthétiques et entraînent dès lors un impact visuel moindre [24].

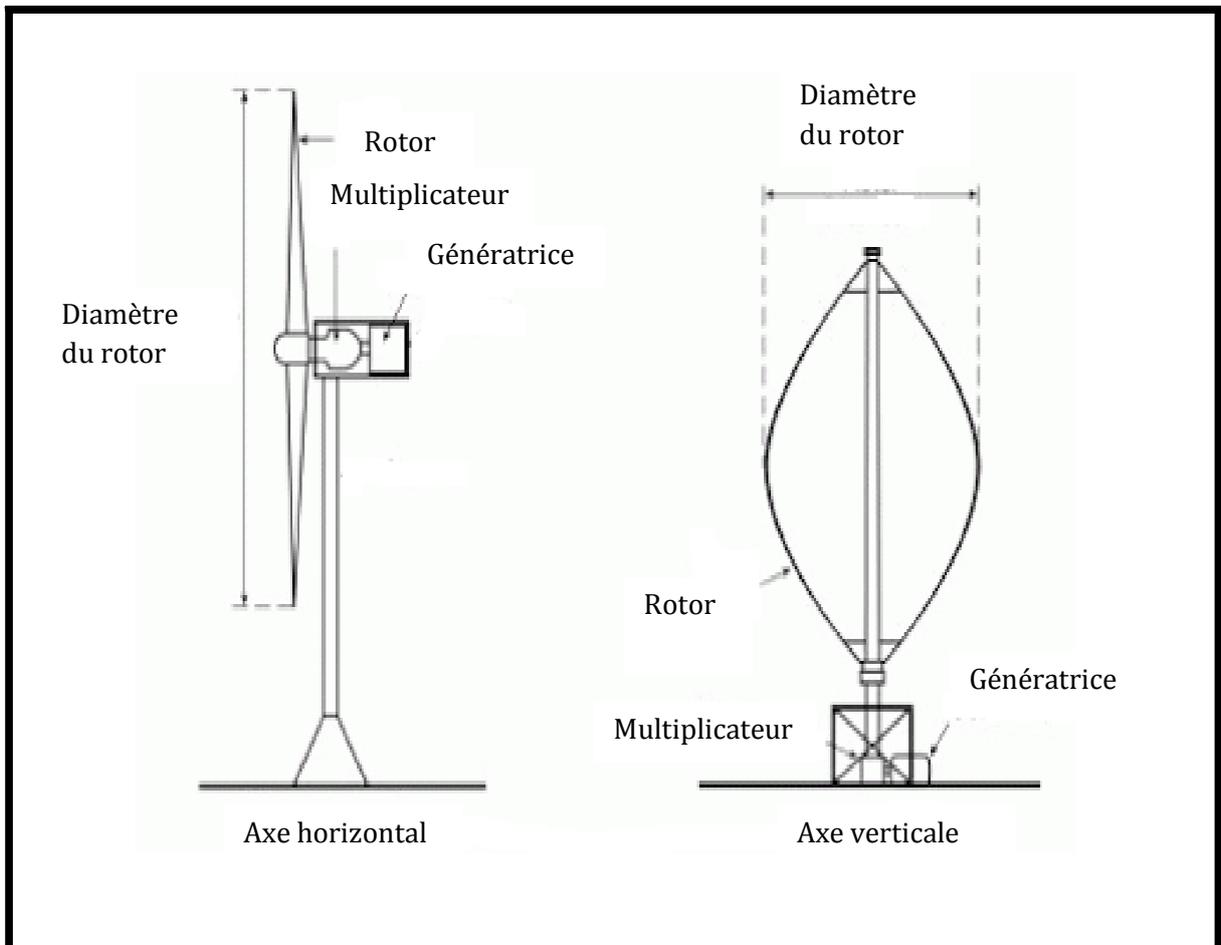


Figure I.3 : Les différents types d' éoliennes

I.5. La puissance disponible et la puissance prélevée au vent

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. A titre de comparaison, la puissance d'une tranche de centrale nucléaire est de 1400 MW environ.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45 m	40 à 100 KW
Grande	46 m et plus	Plus de 1 MW

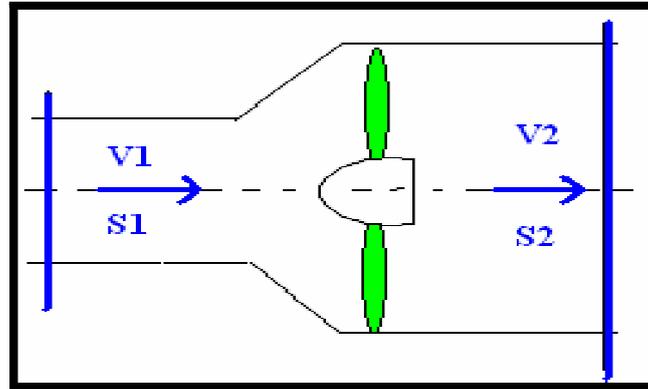
La loi de la variation de la vitesse du vent V en fonction de la hauteur h est donnée par l'expression suivante:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (I.1)$$

V_0 :vitesse en m/s à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol

α :Coefficient caractéristique du lieu entre 0,1 et 0,4

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 .



La production d'énergie ne peut se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine fluide traverse les pales en s'élargissant.

Désignons par V , la vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur et par S la surface balayée par les pales. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$S_1 \times V_1 = S \times V = S_2 \times V_2 \quad (I.2)$$

Par ailleurs d'après le théorème d'Euler, la force exercée par les pales sur l'air en mouvement est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à :

$$F = \rho \times Q(V_1 - V_2) = \rho \times S \times V(V_1 - V_2)$$

Et la puissance développée par la force F (c'est-à-dire par l'aéromoteur) dont le point d'application se déplace à la vitesse V par rapport aux molécules d'air en mouvement est :

$$P = F \times V = \rho \times S \times V^2(V_1 - V_2) \quad (I.4)$$

Ainsi la puissance maximale susceptible d'être recueillie s'exprime par :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \times \rho \times S \times V^3 \quad (I.5)$$

C'est la formule de **Betz**.

Avec: ρ : densité de l'air, environ $1,3 \text{ KG}/\text{m}^3$

S : surface balayée par l'hélice en m^2

V : vitesse du vent en m/s

P : puissance en Watts

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P = 0,2 \times D^2 \times V^3 \quad (\text{I.6})$$

D: diamètre de l'hélice en mètres

I.6. Les Générateurs asynchrones

I.6.1. Généralités

Le moteur asynchrone couplé à un variateur de fréquence est de loin le type de moteur le plus utilisé pour les applications où il est nécessaire de contrôler la vitesse et le déplacement d'une charge.

Quant au moteur asynchrone seul, sa popularité résulte du peu d'entretien nécessaire, de sa simplicité de construction, de sa standardisation et de sa robustesse.

Il existe deux type de machines asynchrones : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné .

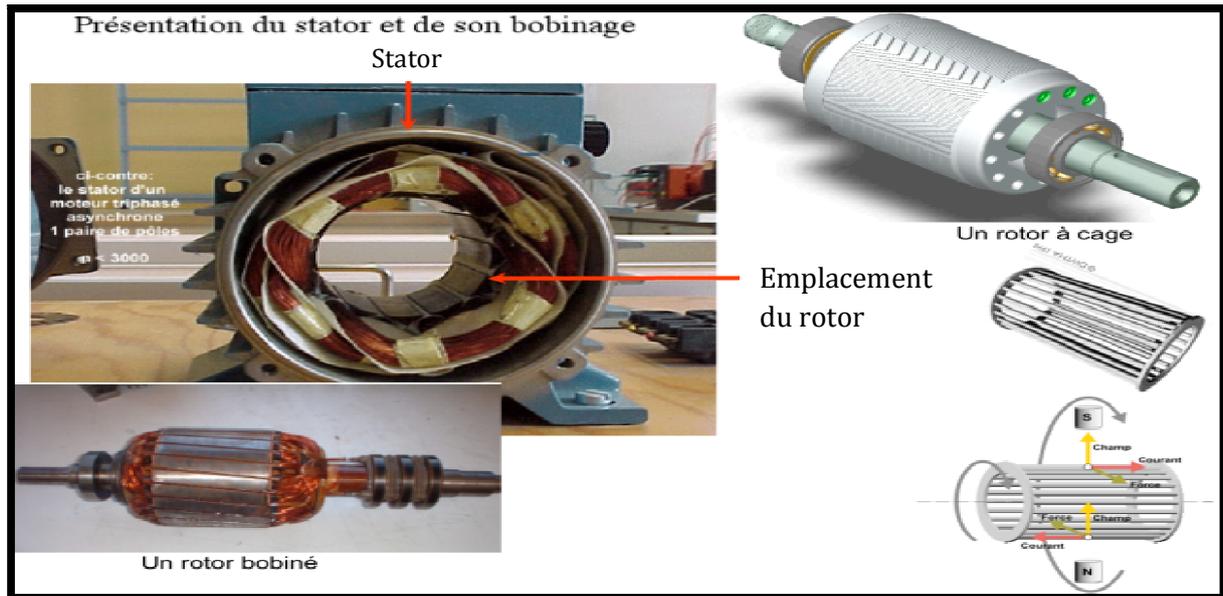


Figure I.4 : Machine asynchrone à rotor bobiné et à rotor à cage

I.6.2. Principe de fonctionnement

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances (<500kW), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gP sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs. Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

I.6.3. Générateur asynchrone à cage d'écureuil (auto excité)

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la figure I.5 [1].

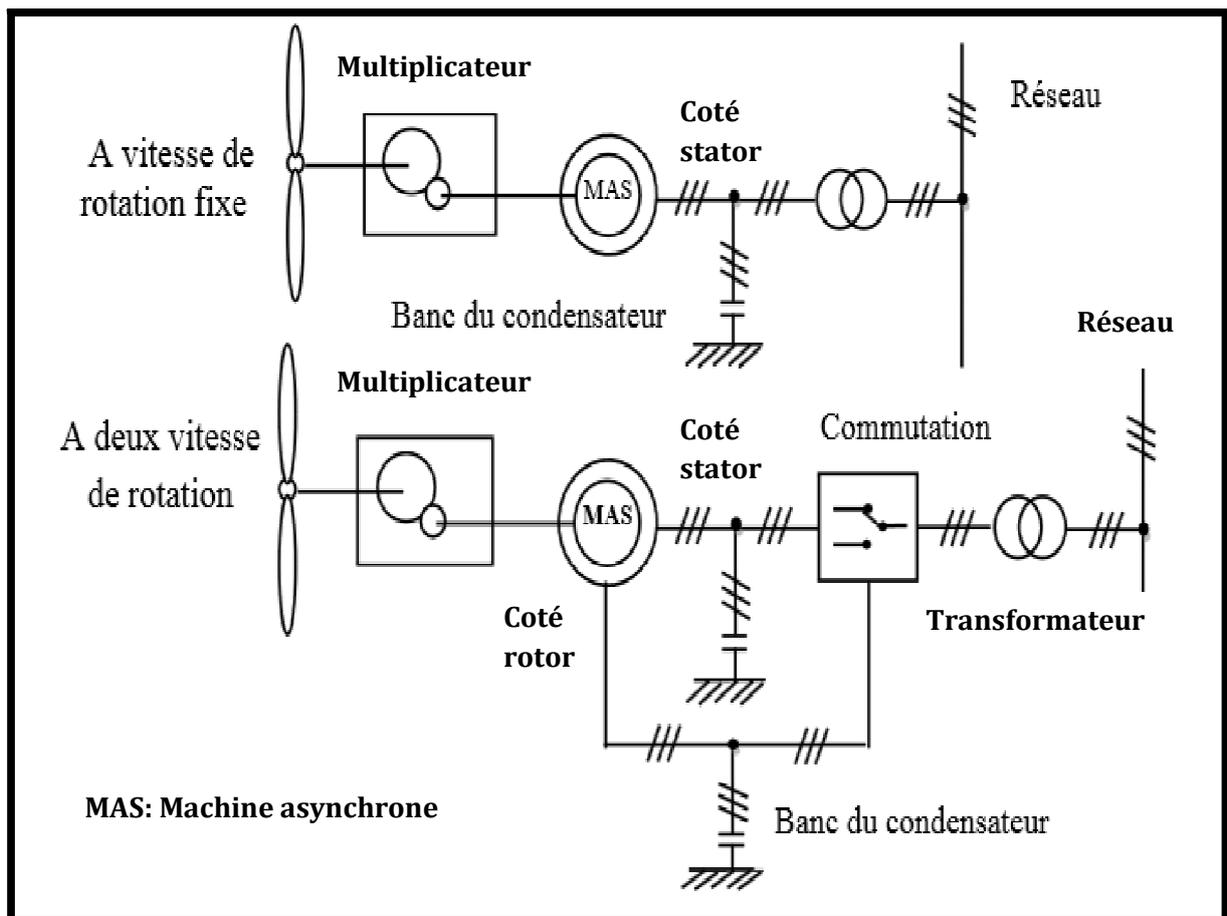


Figure I.5 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée comme le montre la figure I.6.

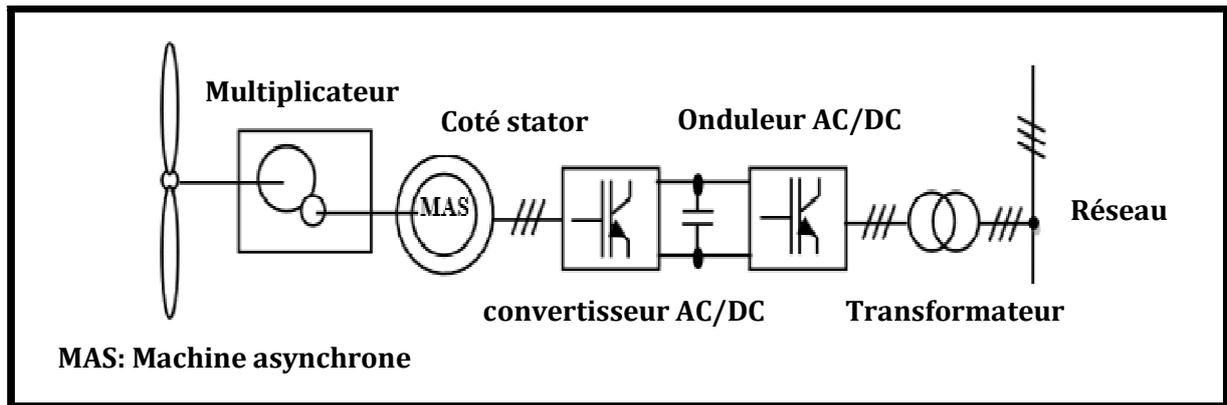


Figure I.6 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

I.6.4. Générateur asynchrone à double alimentation (MADA)

Avec les génératrices asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor.

La figure I.7 montre la technologie (Optislip de Vestas) qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance du rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs [1].

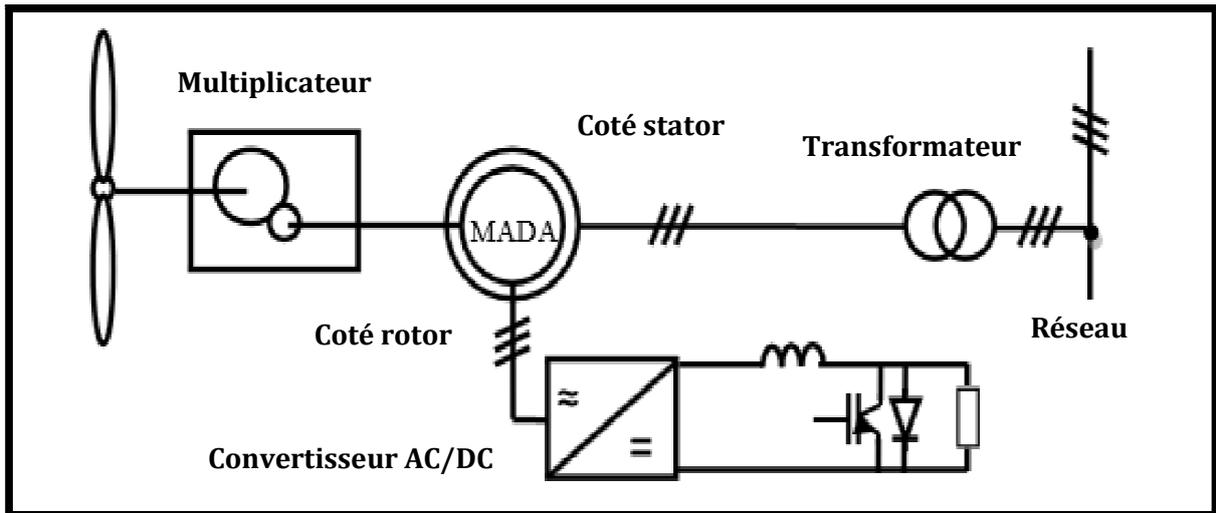


Figure I.7 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor

Une autre solution utilise une interface d'électronique de puissance qui est constituée de deux convertisseurs (onduleurs réversibles à base de composants semi-conducteurs commandable IGBT ou IGCT contrôlés par Modulation de Largeur d'impulsions MLI).

La structure de cette technologie et les moyens de contrôle associés sont présentés sur la figure ci-dessous [1].

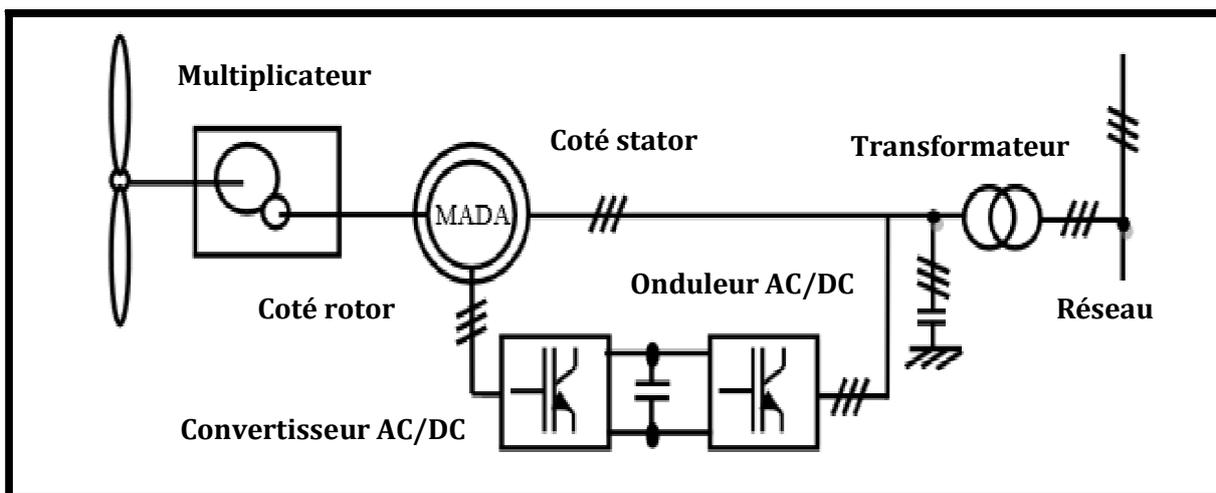


Figure I.8: Système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par action sur le glissement

I.7. 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 ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation, et les différents générateurs utilisés, et leurs schémas .

Chapitre II

Modélisation de la MADA

II.1. Introduction

La modélisation est la description mathématique d'un processus technique d'un système c'est une étape très importante de l'étude préliminaire.

Les différentes modélisations se sont basées généralement sur des modèles mathématiques triphasés ou biphasés en vue d'une représentation vectorielle des différentes grandeurs électriques et mécaniques de la machine. La représentation vectorielle, comme l'affirment certains auteurs, est un outil puissant qui facilite l'évaluation des performances de la machine car il réduit les calculs matriciels et simplifie la résolution des équations électriques et mécaniques [2].

Dans ce chapitre, nous allons étudier et modéliser la machine asynchrone à double alimentation. Dans un premier temps, nous présentons les équations électriques en acceptant certaines hypothèses simplificatrices, et nous allons voir aussi les différents modes de fonctionnement de la MADA en mode moteur (hypo et hypersynchrone) et en mode générateur (hypo et hypersynchrone), nous utiliserons ensuite la transformation de PARK pour la facilité et la souplesse de son modèle.

Finalement on va étudier la partie mécanique d'une éolienne présentant ses équations mécaniques et construire un modèle réduit de cette dernière.

Partie I : Modélisation de la partie électrique

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est le plus souvent transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, ces derniers ont différents modes de fonctionnement :

II.1.1. Les différents modes de fonctionnement de la MADA

La MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Ici, 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 hypo ou hyper synchronisme aussi bien en mode générateur qu'en mode moteur [3].

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement.

II.I.1.1. Mode générateur hypo synchrone.

La figure II.1 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

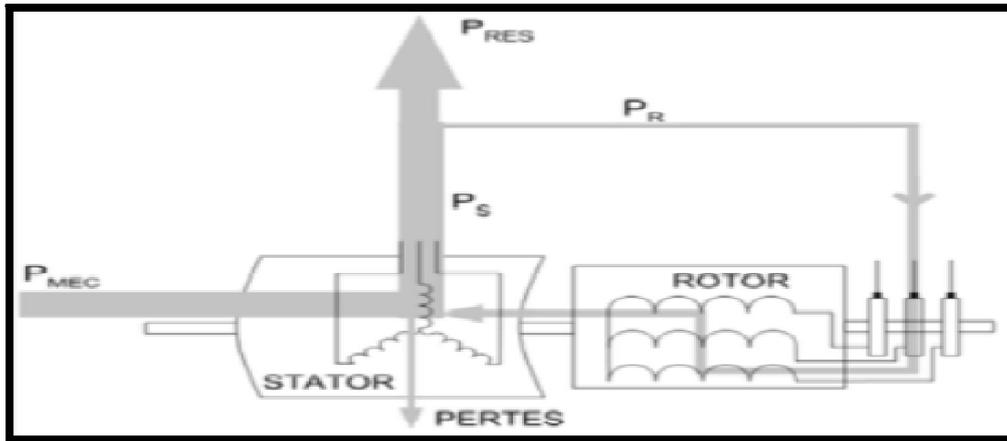


Figure II.1 : fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

II.I.1.2. Mode générateur hyper synchrone.

La figure II.2 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme.

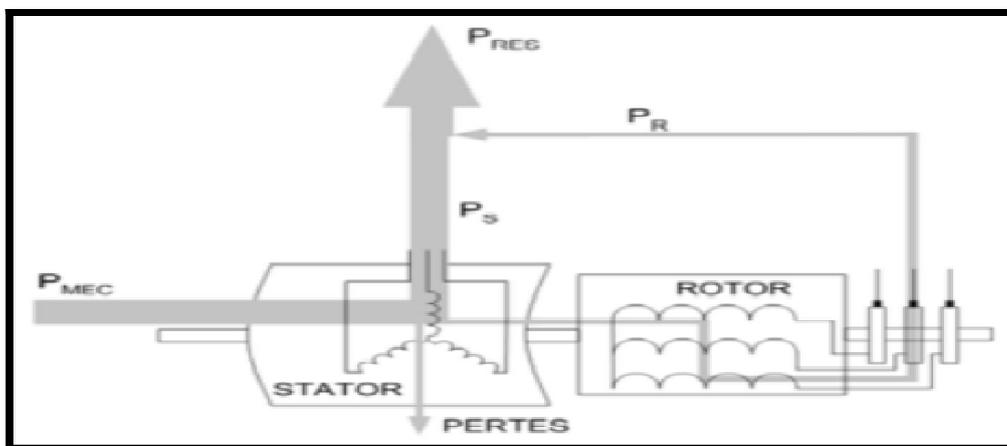


Figure II.2 : fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

II.I.1.3. Mode moteur hypo synchrone.

La figure II.3 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme .

Ce régime est généralement connu comme mode de récupération d'énergie de glissement [4] .

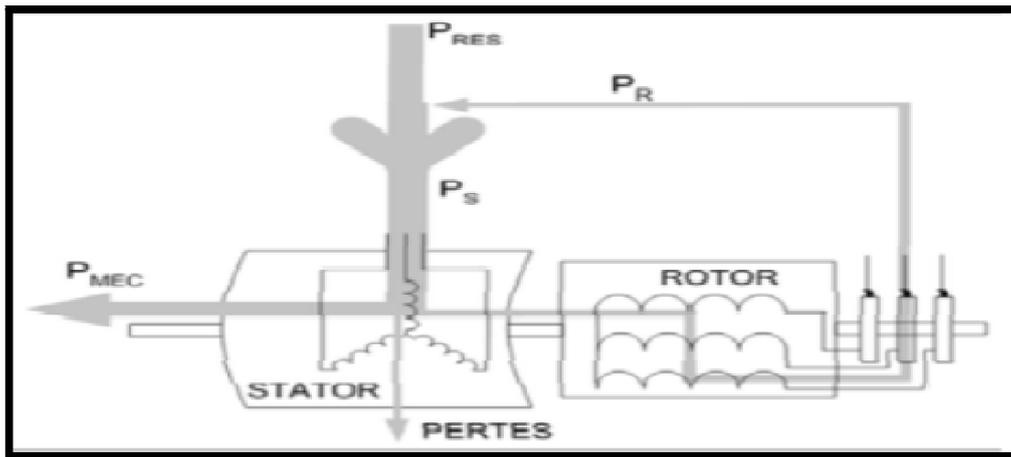


Figure II.3 : fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

II.I.1.4. Mode moteur hyper synchrone.

La figure II.4 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme.

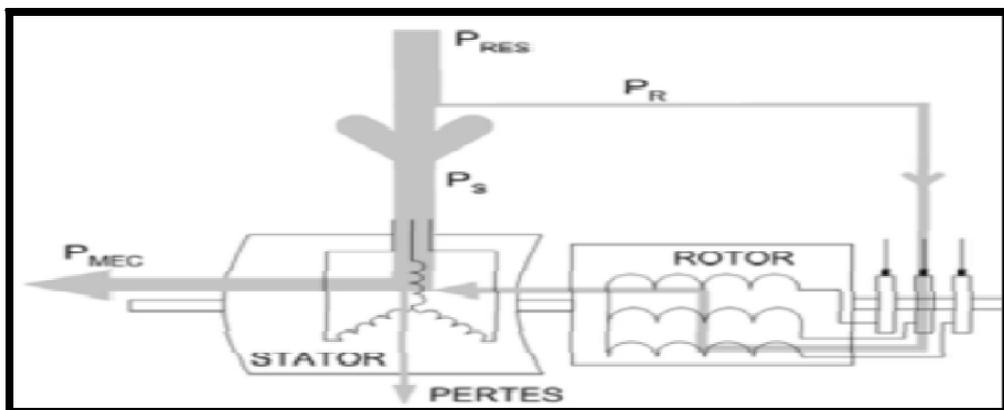


Figure II.4 : fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II.1.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation

Comme les autres machines, la machine asynchrone à double alimentation présente des avantages et des inconvénients :

II.1.2.1. Avantages de la MADA

La MADA présente plusieurs avantages. Parmi ces nombreux avantages, nous citons:

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [4].
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [5].

- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [6].

II.I.2.2. Inconvénients de la MADA

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; donc le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire [7].
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [5].
- 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.
- Elle est plus longue à causes des balais [5].

II.1.3. Modèle de la MADA dans le repère de Park

Dans le but d'établir une commande vectorielle de la MADA qu'on va voir dans le 3^{ème} chapitre, nous rappelons ici sa modélisation dans le repère de Park.

Dans cette étude le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

- entrefer constant.
- effet des encoches négligé.
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte.
- La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- On admet de plus que la f.m.m créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale .

Ces choix signifient entre autres que les flux sont additifs, que les inductances propres sont constantes et qu'il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.1.4. Les différentes équations de la MADA

La machine est représentée par six enroulements dans un espace électrique; un angle θ_e repère un axe d'une des phases rotoriques par rapport à un axe fixe de la phase statorique. Les flux sont comptés positivement selon les axes des phases; Les sens des enroulements sont repérés conventionnellement par un point (.), un courant de signe positif entrant par ce point crée un flux positif dans un enroulement. (Voire figure II.5)

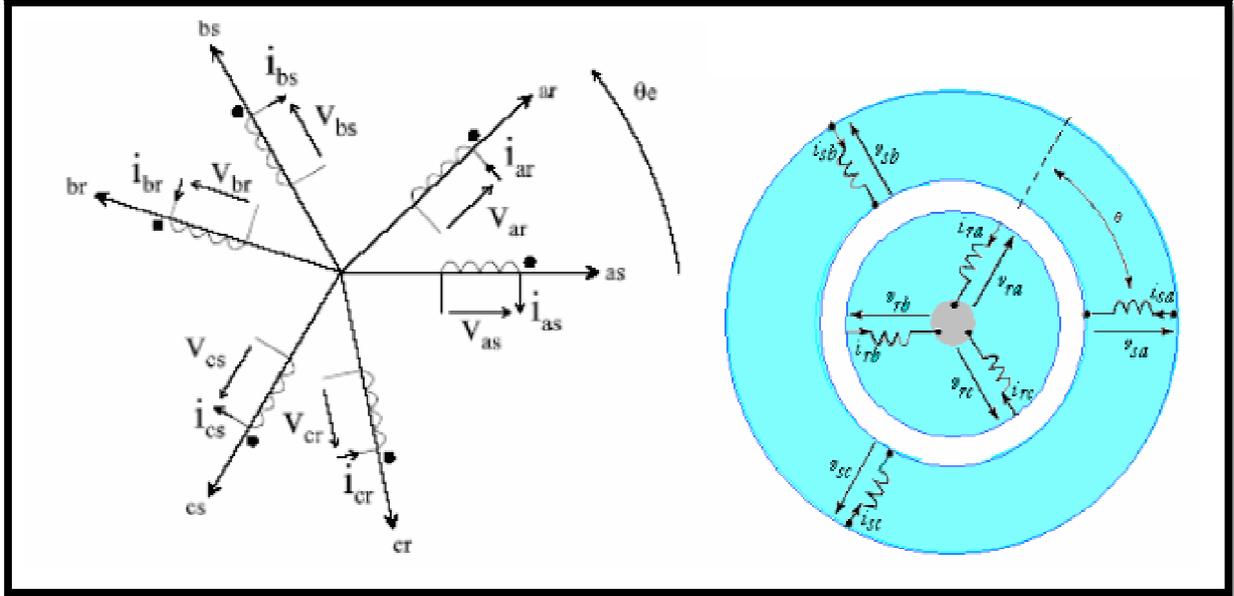


Figure II.5 : Représentation de la machine asynchrone a double alimentation

as (a), bs (b), cs (c) : phases du stator et ar (A), br (B), cr (C) : phases du rotor.

Les équations générales de la machine s'écrivent sous forme matricielle :

Equations électriques :

$$\text{Stator :} \quad [V_{s abc}] = [R_s] [I_{s abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{s abc}] \quad (\text{II.1})$$

Avec $[R_s]$ la matrice des résistances statorique par phase.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}$$

$[V_{s abc}]$ $[I_{s abc}]$ sont respectivement les vecteurs tensions et courants statorique.

$$[V_{s abc}] = \begin{bmatrix} V_{s a} \\ V_{s b} \\ V_{s c} \end{bmatrix} \quad [I_{s abc}] = \begin{bmatrix} I_{s a} \\ I_{s b} \\ I_{s c} \end{bmatrix}$$

$[\phi_{s abc}]$ la matrice des flux statorique suivant les axes a, b, c.

$$[\phi_{s abc}] = \begin{bmatrix} \phi_{s a} \\ \phi_{s b} \\ \phi_{s c} \end{bmatrix}$$

l_s : Inductances propres statorique.

Aussi : $[L_s]$ représente la matrices inductance statorique exprimée en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_{s aa} & l_{s ab} & l_{s ab} \\ l_{s ab} & l_{s aa} & l_{s ab} \\ l_{s ab} & l_{s ab} & l_{s aa} \end{bmatrix}$$

Rotor : $[V_{r ABC}] = [R_r] [I_{r ABC}] + \frac{d}{dt} [\phi_{r ABC}]$ (II.2)

Avec $[R_r]$ la matrice des résistances rotorique par phase.

$$[R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

$[V_{r ABC}]$ et $[I_{r ABC}]$ sont respectivement les vecteurs tensions et courants rotorique.

$$[V_{r ABC}] = \begin{bmatrix} V_{r A} \\ V_{r B} \\ V_{r C} \end{bmatrix} \quad [I_{r ABC}] = \begin{bmatrix} I_{r A} \\ I_{r B} \\ I_{r C} \end{bmatrix}$$

$[\phi_{r ABC}]$ la matrice des flux rotorique suivant les axes A, B, C.

$$[\phi_{r ABC}] = \begin{bmatrix} \phi_{r A} \\ \phi_{r B} \\ \phi_{r C} \end{bmatrix}$$

l_r : Inductances propres rotorique.

Aussi : $[L_r]$ représente la matrice inductance rotorique exprimée en fonction des inductances propres et mutuelles.

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_{r AA} & l_{r AB} & l_{r AB} \\ l_{r AB} & l_{r AA} & l_{r AB} \\ l_{r AB} & l_{r AB} & l_{r AA} \end{bmatrix}$$

Equations magnétiques :

$$\text{Stator :} \quad [\phi_{s abc}] = [L_s] [I_{s abc}] + [M_{sr}] [I_{r ABC}] \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Rotor :} \quad [\phi_{r ABC}] = [L_r] [I_{r ABC}] + [M_{sr}] [I_{s abc}] \quad (\text{II.4})$$

l_m : Inductances mutuelles maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrice inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

$$[M_{sr}] = l_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Equations mécaniques :

Le fonctionnement d'une charge mécanique en rotation est régi par l'équation fondamentale suivante :

$$C_{mec} - C_{em} = J \frac{d\Omega r}{dt} + f\Omega r \quad (\text{II-5})$$

Avec:

C_{mec} : couple mécanique.

C_{em} : couple électromagnétique.

$$\Omega r = \frac{\omega_r}{P}$$

Ωr : Pulsation mécanique du rotor.

ω_r : Pulsation électrique du rotor.

II.1.5. Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park (d;q;0)

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\alpha)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a;b;c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d;q;0). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par [8] :

$$[P(\alpha)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}$$

Avec α : angle entre l'axe d et l'axe as pour une transformation au stator ou l'angle entre d et As pour une transformation au rotor, avec $\alpha = \theta_s$.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé (d;q) sont égales à la matrice de Park $[P(\alpha)]$ multipliée par les grandeurs du système du repère triphasé (a;b;c) :

$$[X_{s dq}] = [P(\theta_s)][X_{s abc}] \quad (\text{II-7})$$

$$[X_{r dq}] = [P(\theta_s - \theta)][X_{r ABC}] \quad (\text{II-8})$$

Equations électrique dans le nouveau repère de Park (d;q) :

Au stator :

$$V_{ds} = r_s I_{ds} + \frac{d}{dt} [\Phi_{ds}] - \omega_a \Phi_{qs} \quad (\text{II-9})$$

$$V_{qs} = r_s I_{qs} + \frac{d}{dt} [\Phi_{qs}] + \omega_a \Phi_{ds} \quad (\text{II-10})$$

Au rotor :

$$V_{dr} = r_r I_{dr} + \frac{d}{dt} [\Phi_{dr}] - (\omega_a - \omega_r) \Phi_{qr} \quad (\text{II-11})$$

$$V_{qr} = r_r I_{qr} + \frac{d}{dt} [\Phi_{qr}] + (\omega_a - \omega_r) \Phi_{dr} \quad (\text{II-12})$$

Equations magnétiques dans le nouveau repère de Park (d;q) :

Au stator :

$$\Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \quad (\text{II-13})$$

$$\Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \quad (\text{II-14})$$

Au rotor :

$$\Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \quad (\text{II-15})$$

$$\Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \quad (\text{II-16})$$

Avec :

$$\theta_s = (oas, od)$$

$$\theta_r = (oAr, od)$$

$$\theta = (oas, oAr)$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

ω_a : vitesse angulaire électrique du repère (d;q) par rapport au stator.

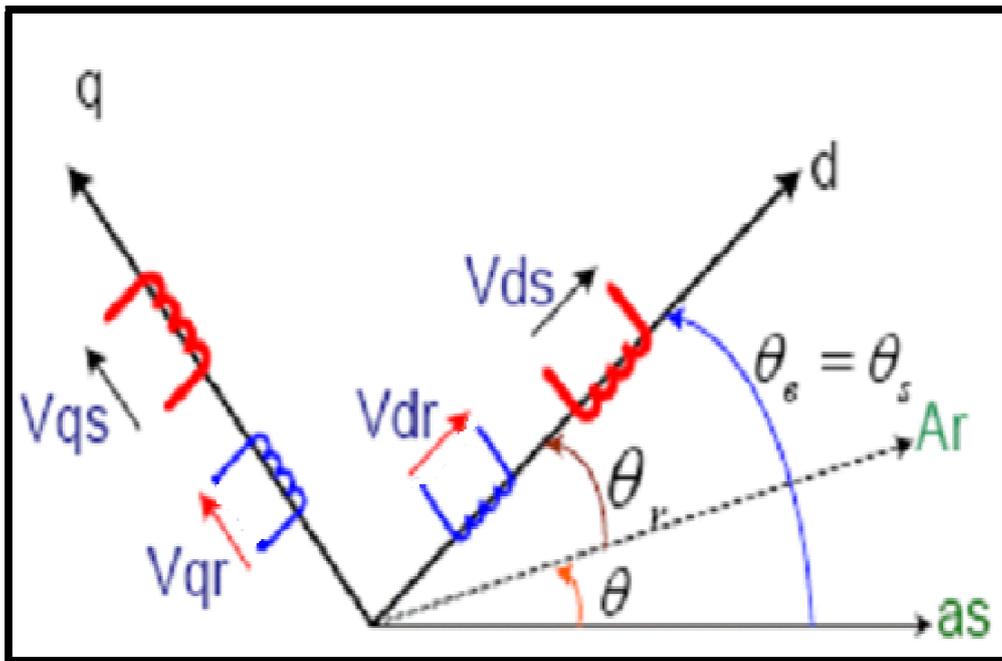


Figure II.6 : Représentation de la machine dans le repère (d;q)

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application.

Dans chacun de ces nouveaux référentiels, les équations de la machine deviennent plus simples que dans le référentiel quelconque.

Le choix du référentiel se fait en fonction de la valeur de ω_a :

$\omega_a = 0$: correspond au référentiel lié au champ tournant.

$\omega_a = \omega_r$: correspond au référentiel lié au rotor.

$\omega_a = \omega_s$: correspond au référentiel stationnaire.

Equation électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant es donné par [9] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \quad (\text{II-17})$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques en fonction des inductances, on vérifie que :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p M_{sr} (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (\text{II-18})$$

On pose : $\frac{3}{2} M_{sr} = M$ inductance magnétisante, donc on aura :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{ds} I_{qr} - \Phi_{qs} I_{dr}) = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}) \quad (\text{II-19})$$

Cette relation met en évidence le fait que le couple résulte de l'interaction de composantes des courants statorique et rotorique en quadrature.

Partie II : Modélisation de la partie mécanique

II.II.1.Quelques définitions

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique. Elle est en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse.

- **La surface balayée par le rotor**

L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor, donc de la longueur des pales. Cela découle de l'équation de puissance aérodynamique.

- **La densité de l'air**

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à-d. la masse de l'air par unité de volume. Autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.[10]

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

- **La Vitesse du vent**

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et différent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations.

II.II.2. Puissance récupérable par une turbine

Soit une turbine qui comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, qui entraîne une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure suivante montre le schéma de cette turbine éolienne[11].

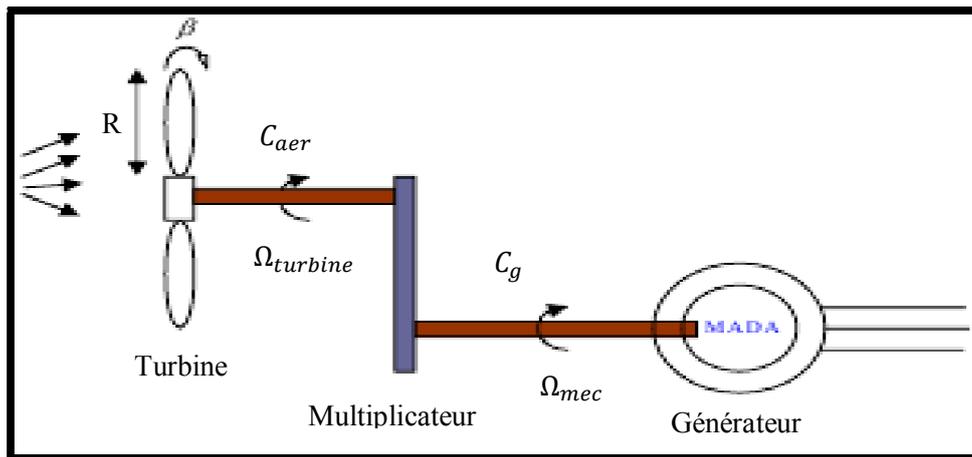


Figure II.7 : Schéma de la turbine éolienne

II.II.3. Spécificités liées à la technologie des turbines éoliennes :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes [12] :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure (II.8). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [13].

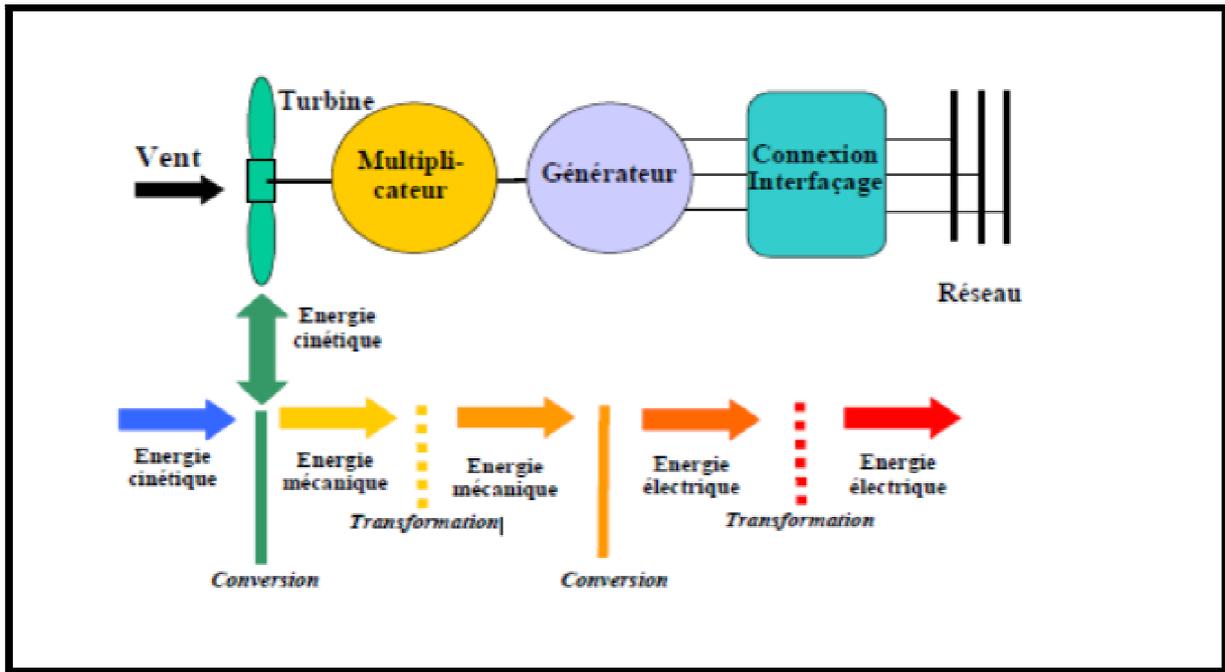


Figure II.8 : Principe de la conversion d'énergie

L'énergie éolienne est une énergie cinétique, c'est-à-dire une énergie liée au déplacement d'une masse. L'énergie cinétique se calcule comme suit :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (\text{II.20})$$

Où m est la masse d'air et v la vitesse de la masse d'air

On considère une masse d'air qui traverse la surface balayée par les pales de l'éolienne à un instant t . La puissance maximal instantanée se calcule comme suit :

$$P_{max} = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2t} \varphi V v^2$$

Où V est le volume de la masse d'air qui traverse la turbine et φ la masse volumique

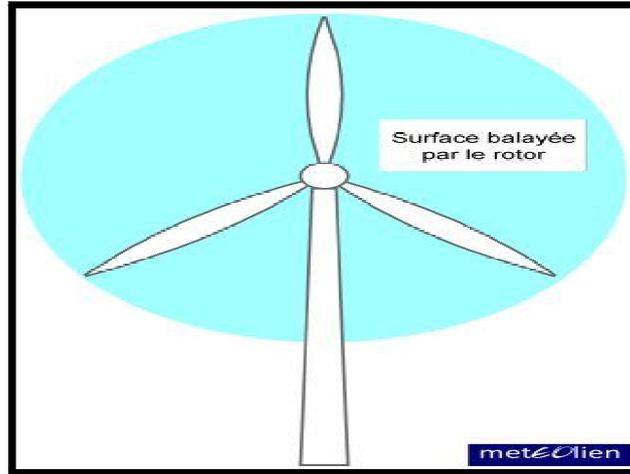


Figure II.9 : Surface balayée par le rotor

Or, la masse instantanée d'une quantité d'air se calcule comme suit :

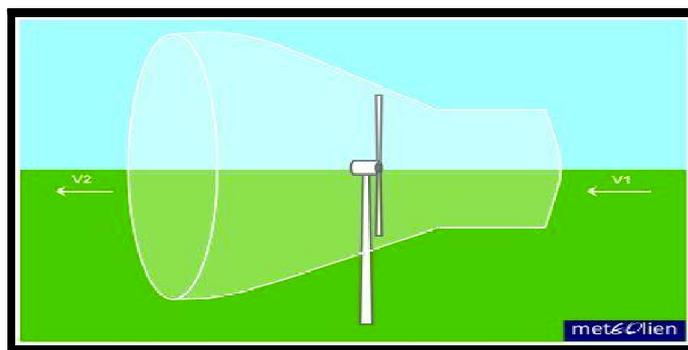
$$M_t = A \rho V_t \quad (\text{II.22})$$

Où A est la surface balayée par le rotor de la turbine, ρ est la densité de l'air qui dépend de l'altitude, V_t est la vitesse instantanée de la masse d'air.

Donc la puissance instantanée dégagée par la masse d'air à l'instant t est la suivante :

$$P_t = \frac{1}{2} A \rho V_t^3 \quad (\text{II.23})$$

Or, une éolienne ne permet de récupérer qu'une partie de cette puissance, car le vent ne « s'arrête » pas après son passage au travers des pales. Une éolienne ralentit le vent.



La puissance captée par une éolienne est donc :

$$P = \frac{1}{2} A \rho V_t^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.24})$$

$$A = \pi R^2$$

Où C_p est un coefficient de performance de l'éolienne qui dépend de la différence entre la vitesse du vent avant le passage au travers des pales et celle à la sortie des pales. La puissance énergétique qui traverse une éolienne dépend donc en grande partie de la vitesse du vent qui la traverse.

C_p : coefficient de puissance

β : angle d'orientation des pales.

λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales, et la vitesse du vent V .

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{v} \quad (II.25)$$

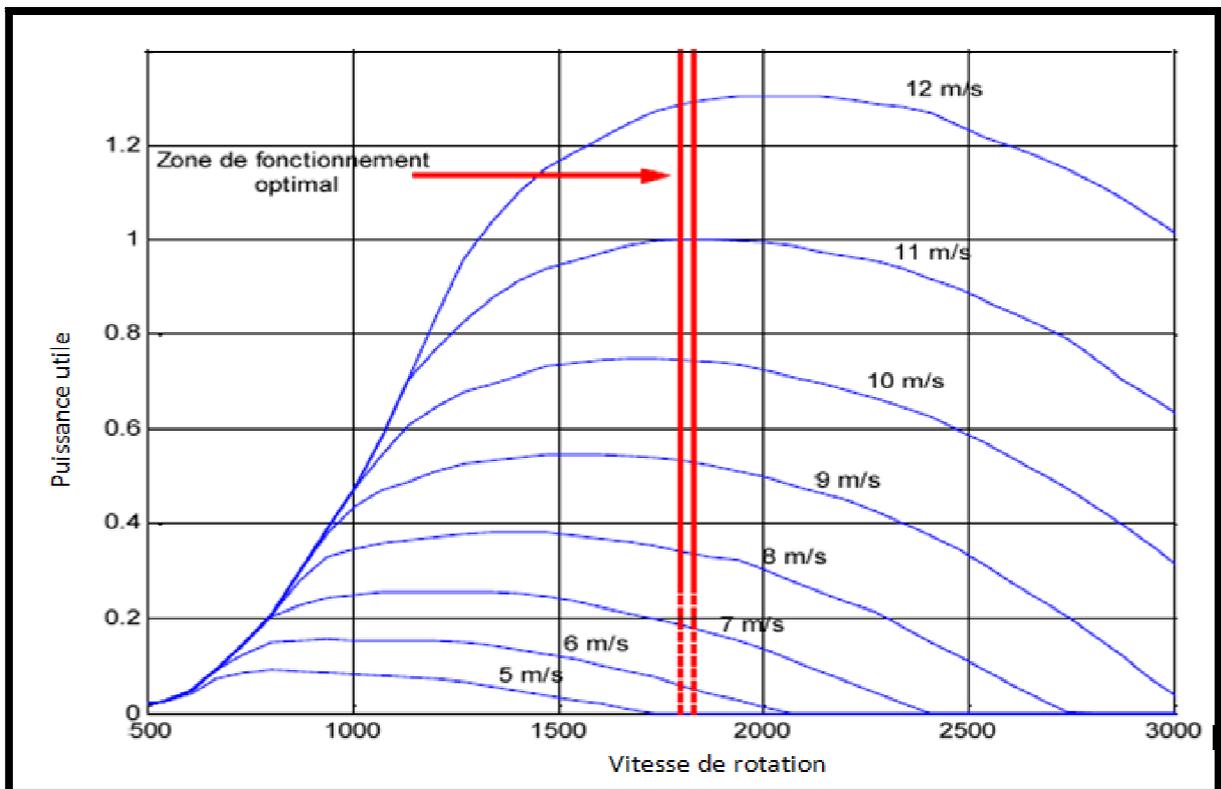


Figure II.10 : Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée pour différentes vitesses du vent

Le coefficient de puissance est donné par la relation suivante (on prend $\beta = 0$) [14].

$$C_p = [0.35 - 0.00167(\beta - 2)] \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.26})$$

Pour les autres valeurs de l'angle β , le coefficient de puissance est illustré par la figure ci-dessous.

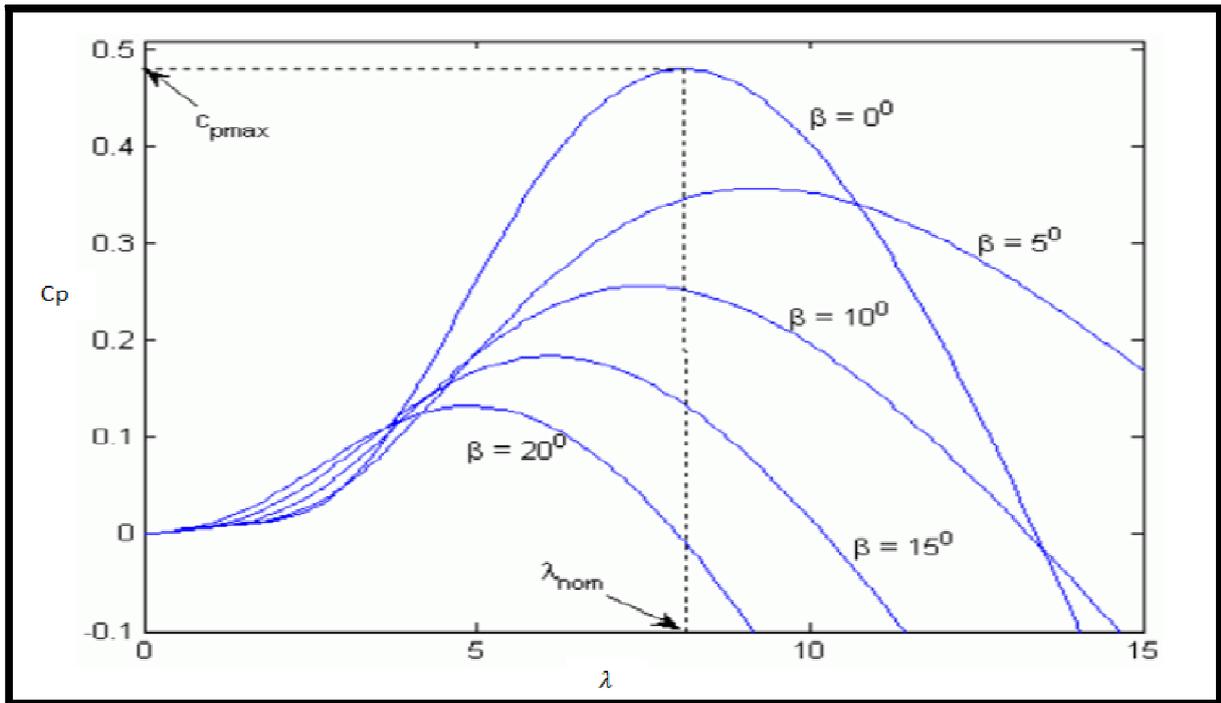


Figure II.11 : Le coefficient de puissance pour différentes valeurs de β

II.II.4. Le MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Un Maximum Power Point Tracking (abrégé MPPT, litt. dispositif de poursuite du point de puissance maximale), régulateur MPP ou tracker MPP est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire.

Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens.

Le MPPT a été créé pour avoir la meilleure connexion possible entre la source non linéaire et le réseau et ainsi toujours extraire le maximum de puissance[15].

II.II.5. Modèle du multiplicateur de vitesse

A l'intérieur de la nacelle, il y a un multiplicateur. Celui-ci est constitué d'un grand nombre de roues dentées qui s'engrènent. Le rotor tourne à une vitesse d'environ 22 tours par minute. L'arbre principal tourne lentement transmettant une très grande force de rotation au multiplicateur. Celui-ci transforme ensuite cette force : au lieu d'une rotation lente avec une grande force, nous obtenons maintenant une rotation rapide avec une petite force.

Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplication de l'ordre de 100. Ces engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques [16].

Pour pouvoir le modéliser, nous allons utiliser un gain de vitesse G qui correspond au rapport de multiplication.

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \quad (II.27)$$

Avec : C_g : couple issue du multiplicateur.

C_{aero} : couple aérodynamique de la turbine.

G : gain du multiplicateur.

On aura aussi le rapport de transformation de la vitesse :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.28)$$

Avec :

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine

Ω_{mec} : Vitesse de rotation issue du multiplicateur

II.II.6. Equation mécanique sur l'arbre à la sortie du multiplicateur

Le fonctionnement d'une génératrice entraînée par un couple mécanique est régi par l'équation fondamentale suivante :

$$\Sigma C_{moteur} = \Sigma C_{résistant}$$

$$C_g = C_{em} + C_f + J \frac{d\Omega_{mec}}{dt}$$

$$C_g = C_{em} + f\Omega_{mec} + J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \tag{II.29}$$

J : représente le moment d'inertie de la turbine équivalent ramené à l'arbre d'entraînement de la génératrice asynchrone.

f : coefficient des frottements visqueux

C_{mec} : le couple mécanique.

C_{em} : le couple électromagnétique.

C_g : le couple a la sortie du multiplicateur.

Ω_{mec} : pulsation mécanique de l'arbre de la génératrice.

- **Modèle de la partie mécanique de l'éolienne**

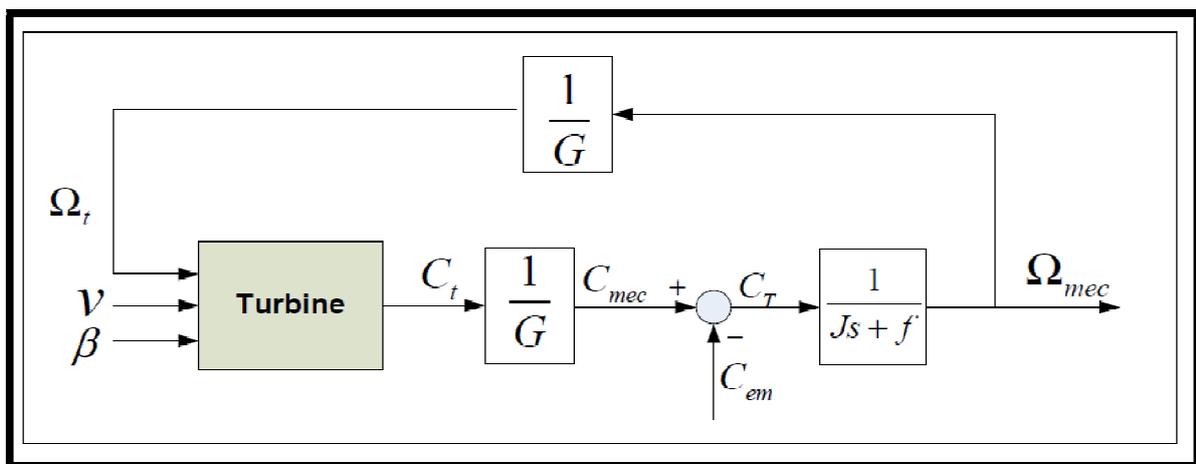


Figure II.12 : Schéma block de la partie mécanique

II.II.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la recherche de la modélisation et du schéma équivalent électrique de la machine asynchrone à double alimentation. Nous avons commencé par les différents modes de fonctionnement de la machine à double alimentation nous avons vu que la (MADA) a beaucoup d'avantages et très peu d'inconvénients.

Nous avons utilisé le modèle déphasé ($d; q$) qui sert à simplifier le modèle qui a été en triphasé pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone. Ce dernier est donné par la transformation de Park. Ainsi nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec cette machine.

Le modèle de la MADA élaboré dans ce chapitre sera utilisé dans le chapitre suivant, dans lequel nous présenterons la commande en puissance active et réactive de MADA.

Chapitre III

Commande de la MADA

III.1. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d, q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner.

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

III.2. Principe du contrôle vectoriel à flux orienté

L'objectif de ce type de contrôle est d'aboutir à un modèle simple de la machine asynchrone qui rende compte de la commande séparée de la grandeur Flux Φ et de la grandeur courant I , générateur de couple.

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes $(d; q)$, repère tournant biphasé orienté sur Φ_r (flux rotorique) ou Φ_s (flux statorique) et un type de commande qui permettent de découpler le couple et le flux.

La commande à flux orienté permet ainsi de considérer la MADA comme une machine à courant continu, c'est à dire réaliser un contrôle similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Dans le cas de la machine à courant continu, le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel $(d; q)$ de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d) , ainsi le flux est commandé par la composante direct du courant et le couple par l'autre composante.

L'orientation de l'un de ces trois champs suivant l'axe (d) du référentiel constitue le principe de base de la commande vectorielle.

Dans notre travail nous nous intéressons à la commande à flux statorique orienté.

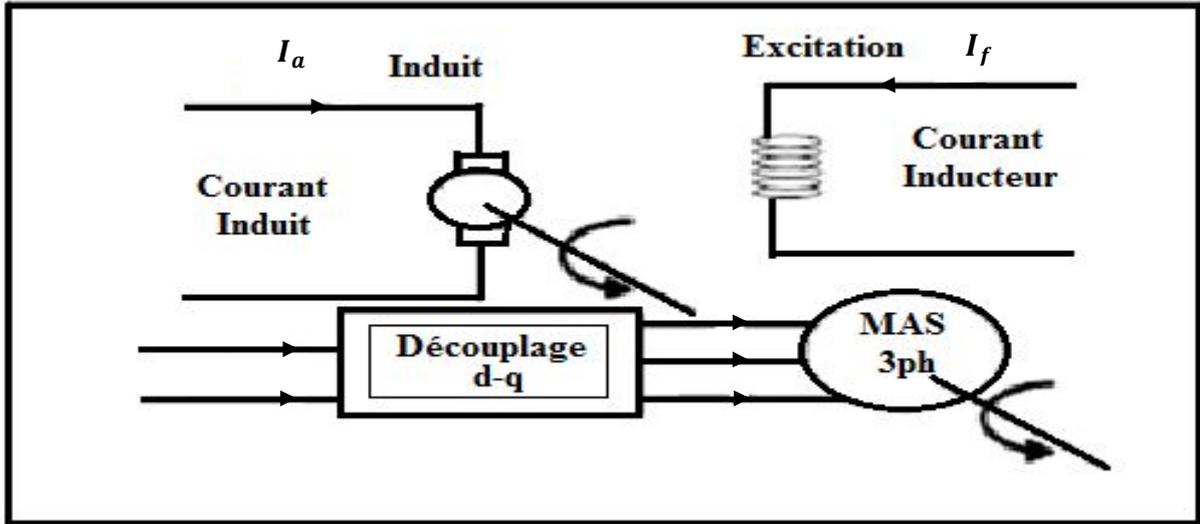


Figure III.1 : Equivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une MADA

L'expression du C_{em} (couple électromagnétique) de la machine à courant continu :

$$C_{em} = K\Phi_f I_a \quad (III.1)$$

$$\Phi_f = K' I_f \quad (III.2)$$

Nous avons vu dans le chapitre II que le C_{em} s'exprime comme un produit croisé de courants ou de flux. Si nous reprenons l'écriture:

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \Phi_{qs} - I_{qr} \Phi_{ds}) \quad (III.3)$$

Dans ce cas la machine est modélisée en moteur, en génératrice le C_{em} prend un signe (-) et servira à modéliser la machine en génératrice.

$$C_{em} = - p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \Phi_{qs} - I_{qr} \Phi_{ds}) \quad (III.4)$$

En se basant sur cette équation on peut réaliser un découplage de telle sorte que le couple soit commandé uniquement par le courant rotorique en quadrature I_{qr} .

III.3. Commande vectorielle de la MADA

Le comportement dynamique de la machine asynchrone n'est jamais satisfaisant avec une commande scalaire. C'est pourquoi, nous nous intéresserons à une commande mieux adaptée aux régimes dynamiques: la commande vectorielle à flux statorique orienté qui assure la maîtrise du couple et la régulation du flux en régime transitoire.

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence, En parlant d'orientation du flux, c'est plutôt le système d'axe (d;q) que l'on oriente de manière à ce que l'axe (d) soit en phase avec le flux [17].

En choisissant le repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe (d).

Afin d'obtenir un couple maximale il faut imposer l'une des conditions suivantes :

- Orientation du flux rotorique :

$$\Phi_{dr} = \Phi_r \quad \text{et} \quad \Phi_{qr} = 0 \quad (\text{III.5})$$

Φ_r : flux rotorique.

- Orientation du flux statorique :

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \quad \text{et} \quad \Phi_{qs} = 0 \quad (\text{III.6})$$

Φ_s : flux statorique.

- Orientation du flux d'entrefer :

$$\Phi_{def} = \Phi_{ef} \quad \text{et} \quad \Phi_{qef} = 0 \quad (\text{III.7})$$

Φ_{ef} : flux d'entrefer ou flux magnétisant.

III.4. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

On rappelle d'abord l'ensemble d'équations différentielles du système de la machine sans orientation du flux statorique dans le chapitre II.

$$\begin{aligned}
 V_{d s} &= r_s I_{d s} + \frac{d}{dt} [\phi_{d s}] - \omega_s \phi_{q s} \\
 V_{q s} &= r_s I_{q s} + \frac{d}{dt} [\phi_{q s}] + \omega_s \phi_{d s} \\
 V_{d r} &= r_r I_{d r} + \frac{d}{dt} [\phi_{d r}] - (\omega_s - \omega_r) \phi_{q r} \\
 V_{q r} &= r_r I_{q r} + \frac{d}{dt} [\phi_{q r}] + (\omega_s - \omega_r) \phi_{d r}
 \end{aligned}
 \tag{III.8}$$

III.4.1. Orientation du flux statorique

On choisit convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux statorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) du référentiel diphasé (d;q).

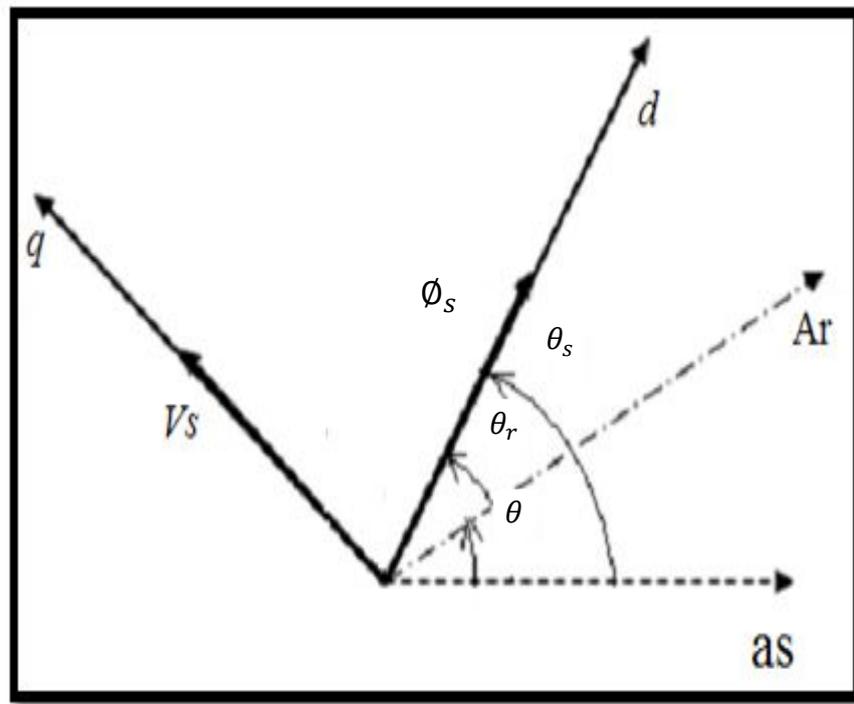


Figure III.2 : Orientation du flux statorique selon l'axe (d)

On s'aperçoit que si on élimine le deuxième produit ($I_{dr}\phi_{qs}$) de l'expression du C_{em} alors le coupleressemblerait fort à celui d'une MCC.

$$\text{On aura alors :} \quad \phi_{ds} = \phi_s \text{ et } \phi_{qs} = 0$$

Et le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{qr} \phi_{ds}) \quad (\text{III.9})$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, cela conduit à un flux statorique ϕ_{ds} constant. Cette considération associée à l'équation (III.9) montre que le couple électromagnétique C_{em} et la puissance active dépendent uniquement de I_{qr} .

Les équations électriques au stator s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

La résistance statorique (r_s) peut être négligée étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes.

Les équations électriques deviennent alors:

$$\begin{bmatrix} V_s a \\ V_s b \\ V_s c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_s a \\ \phi_s b \\ \phi_s c \end{bmatrix}$$

Ce qui montre que le vecteur tension statorique est en avance de $\pi/2$ par rapport au flux.

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\text{Ainsi on obtient :} \quad V_{ds} = 0 \text{ et } V_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} = \omega_s \phi_s \quad (\text{III.10})$$

$$\begin{aligned} \phi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} = \phi_s \\ \phi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

III.4.2. Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

On peut écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques

$$I_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III.12})$$

$$I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \quad (\text{III.13})$$

III.4.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \quad (\text{III.14})$$

$$Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \quad (\text{III.15})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{ds} = 0$) donne :

$$P_s = V_{qs} I_{qs} \quad (\text{III.16})$$

$$Q_s = V_{qs} I_{ds} \quad (\text{III.17})$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leur expression donnée à l'équation (III.12,13), nous obtenons :

$$P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \quad (\text{III.18})$$

$$Q = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III.19})$$

On a : $V_s = \omega_s \phi_s$ donc $\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$

L'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III.20})$$

III.4.4. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

D'abord, pour les flux on a au stator :

$$\begin{aligned}\Phi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr}\end{aligned}\quad (III.21)$$

Et au rotor :

$$\begin{aligned}\Phi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs}\end{aligned}\quad (III.22)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{aligned}\Phi_{dr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \Phi_{qr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr}\end{aligned}\quad (III.23)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe (d) et (q) sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.8). Nous obtenons alors :

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr}\quad (III.24)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}\quad (III.25)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient :

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) P \times I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr}\quad (III.26)$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) P \times I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s}\quad (III.27)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

$(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est le terme de couplage entre les deux axes.

$g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Les équations (III.26), (III.27) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler.

Ces expressions peuvent être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle à flux statorique orienté des machines asynchrones alimentées en tension.

On remarque que v_{dr} et v_{qr} influent à la fois sur le i_{dr} et i_{qr} donc sur la puissances active et réactive statoriques.

La figure ci-dessous décrit le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation.

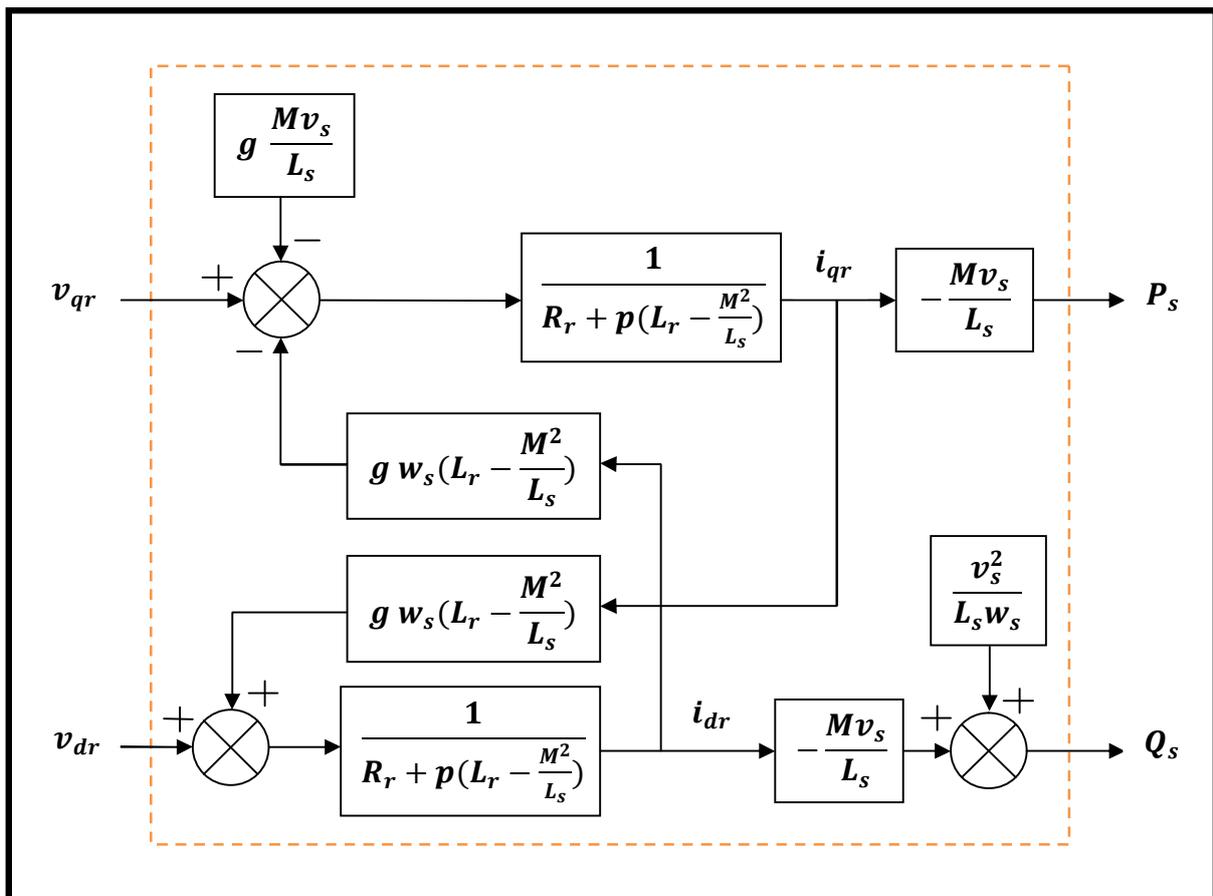


Figure III.3 :Schéma bloc du système à réguler du modèle simplifié de la MADA

La figure III.3 fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplage près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe (q) et la puissance réactive pour l'axe (d).

III.5. Mise en œuvre de la régulation

Dans cette section, nous allons présenter la régulation des puissances actives et réactives, en utilisant les équations précédentes, il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part entre la puissance réactive et la tension V_{dr} .

III.5.1. Mise en place de la régulation

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 (MV_s /Ls). Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, ce terme donc est constant, nous ne placerons donc pas de régulateurs 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 perturbations qui sont présent dans le schéma bloc de la (figure III.3).

La commande vectorielle vient régler le problème de découplage. Ainsi, il ya deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la Méthode qui consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine (figure III.4).

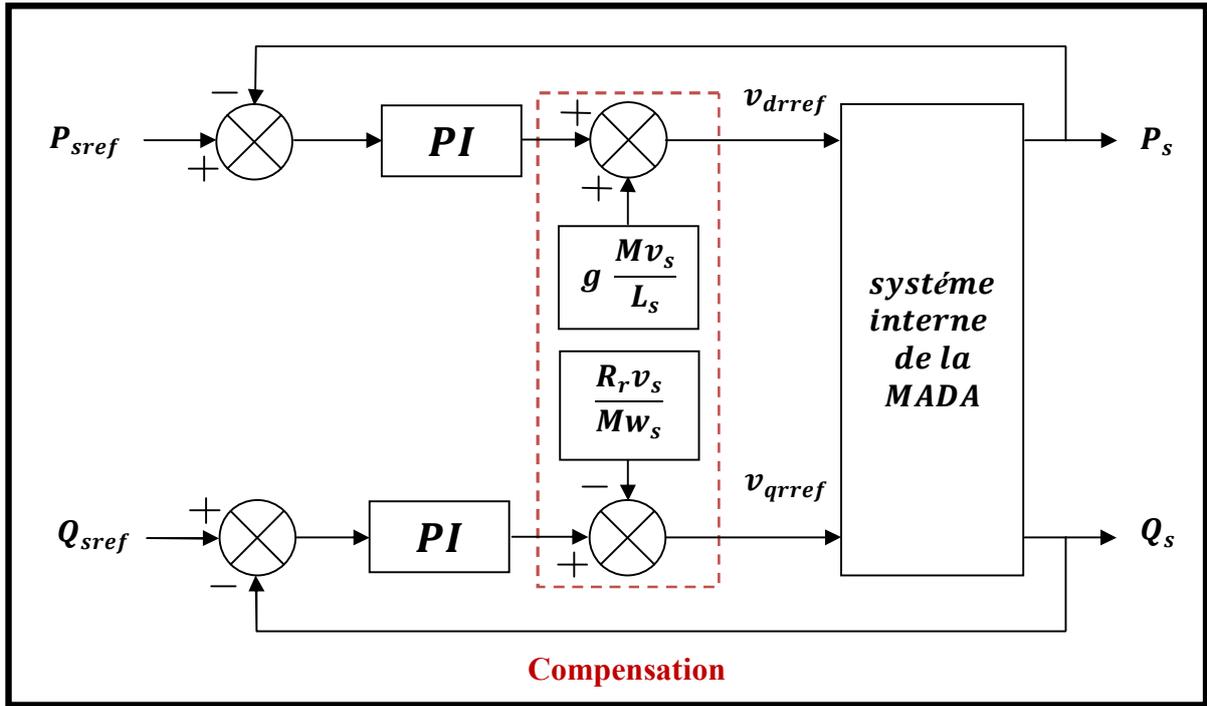


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande directe

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 découle directement des équations (III.18,20) et (III.26,27). (figure III. 5)

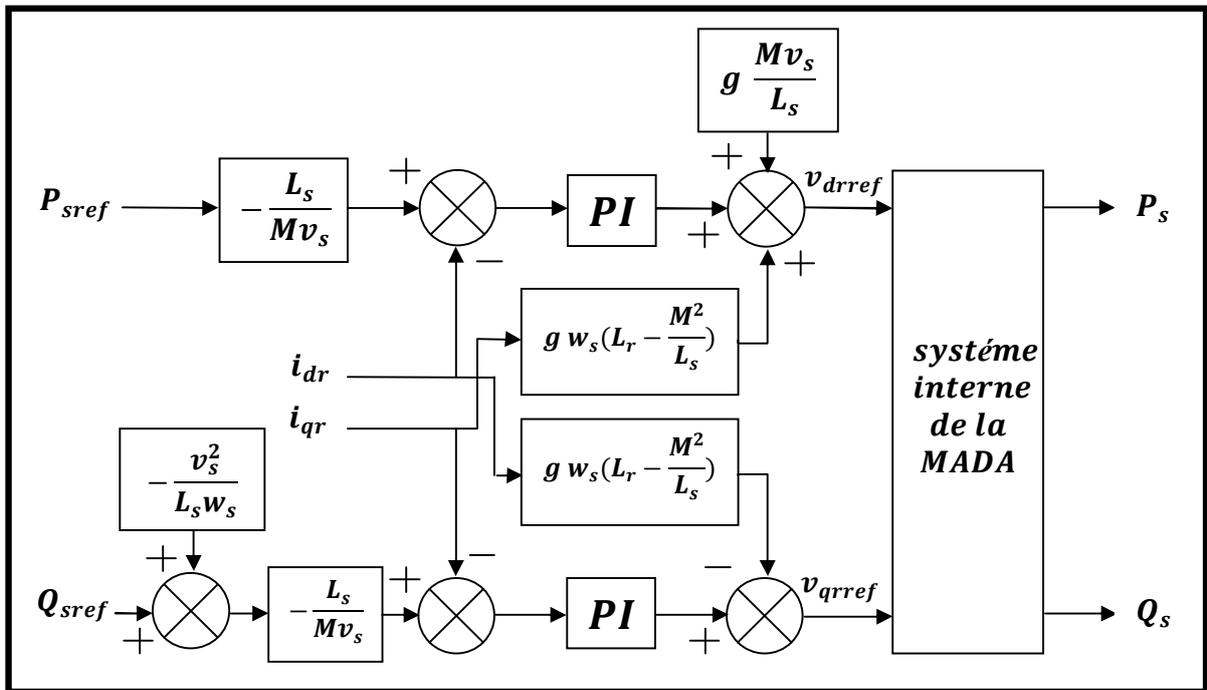


Figure III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance

C'est la méthode directe (figure III.4) que nous allons étudier et simuler. Son intérêt est que sa mise en place est simple. Par contre, la méthode indirecte (figure III.5) qui est plus complexe a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permet d'avoir une protection de la machine en limitant ces courants.

III.5.2. Synthèse de régulateur PI

Nous allons procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice [13], ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Il est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. [22]

Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'éliminer l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée.

Pour notre système, la fonction de transfert du régulateur est donnée par:

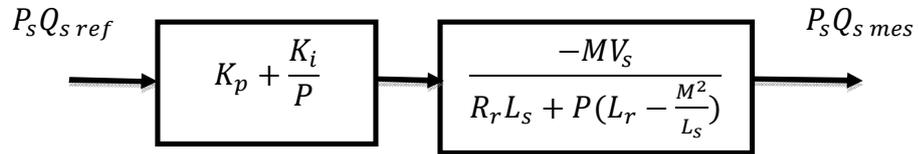


Figure III.6 : Schéma bloc du système à réguler en boucle ouverte

$$K_p + \frac{K_i}{P} = K_p \left(1 + \frac{K_i}{K_p P} \right) = \frac{K_p}{P} \left(P + \frac{K_i}{K_p} \right) = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}}$$

$$FT_{BO} = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \times \frac{-MV_s}{R_r L_s + P L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}$$

$$= \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \times \frac{\frac{-MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (III.28)$$

On élimine le zéro présent dans la fonction avec la méthode de compensation des pôles.

En remplaçant les gains de régulateur $\frac{K_i}{K_p}$ par $\frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}$ on obtiendra une fonction en boucle ouverte :

$$FT_{BO} = \frac{K_p}{P} \times \frac{-MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}$$

on fait le travail avec une fonction de transfert en boucle fermée :

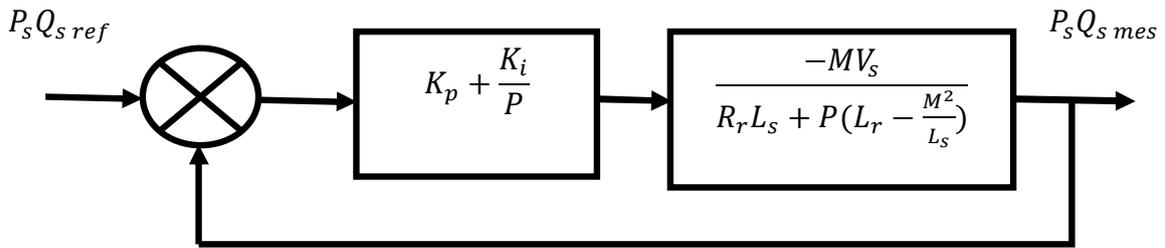


Figure III.7 : Schéma bloc du système à réguler en boucle fermée

$$FT_{BF} = \frac{F_{BO}}{1 + F_{BO}} = \frac{\frac{K_p}{P} \times \frac{-MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{1 + \frac{K_p}{P} \times \frac{-MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}$$

$$FT_{BF} = \frac{1}{1 + \frac{-1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} P} = \frac{1}{1 + \tau P} \quad (III.29)$$

On déduit :

$$\tau = \frac{-1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}$$

τ est le temps de réponse du système. Généralement, pour ce type de calcul on prend le $\tau_{reponse} = 3\tau_{BO}$. Nous choisissons de fixer celui-ci à 10 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements importants et ne présente pas d'intérêt particulier pour notre application [18].

Les termes K_p et K_i sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine :

Donc

$$K_i = K_p \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{III.30})$$

Finalement :

Le PI pour P et Q c'est le même.

$$K_p = \frac{1 - L_s}{\tau MV_s} (L_r - \frac{M^2}{L_s})$$

$$K_i = \frac{1 R_r L_s}{\tau MV_s}$$

III.6. Dispositif de puissance

III.6.1. Commande du convertisseur côté rotor (RSC)

Le convertisseur côté rotor RSC (rotor side converter) sera commandé par la méthode de séparation de puissances (régulateur PI) pour imposer une puissance active statorique optimale a la MADA, calculée par la commande MPPT, et un facteur de puissance unitaire au stator de la MADA. Le schéma de principe de cette commande est illustré sur la figure suivante : [18]

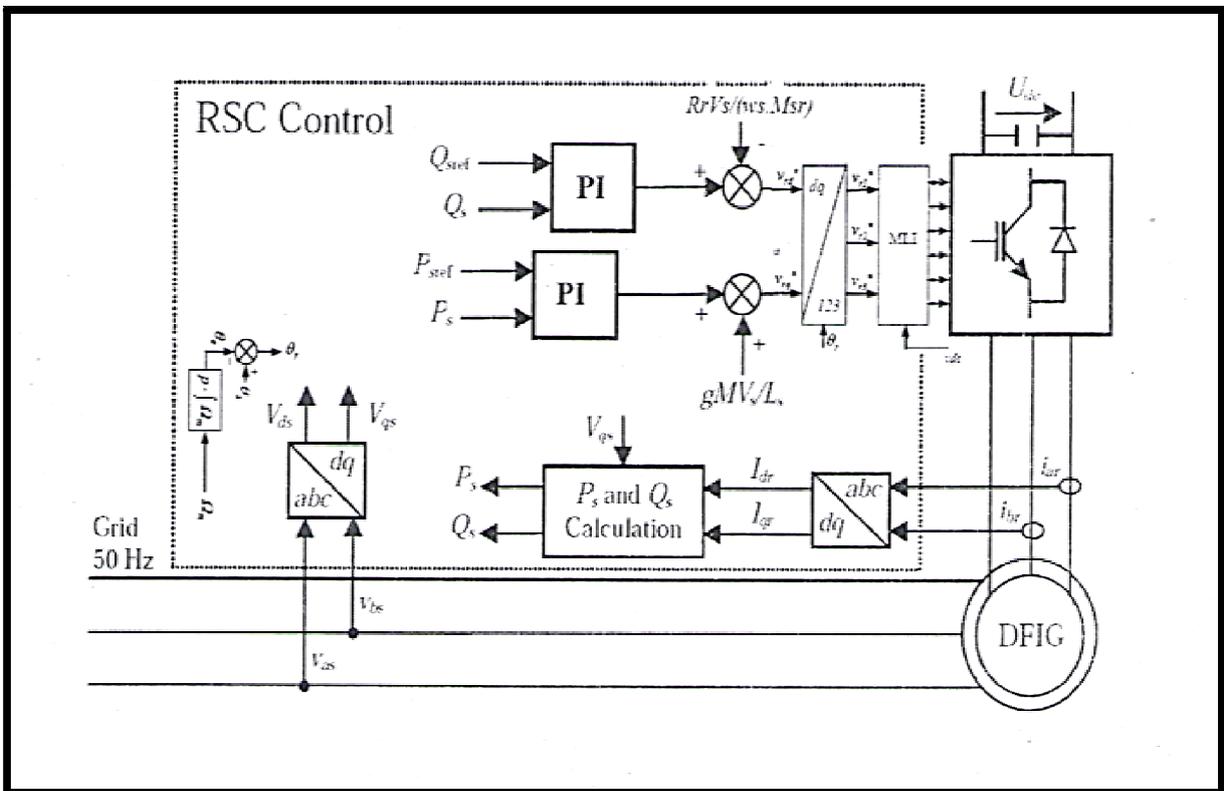


Figure III.8 : Schéma de principe de commande du RSC

Cette partie de commande du convertisseur ne sera pas étudiée et simulée dans notre travail.

III.6.2. Association onduleur MADA

Le réglage de la vitesse du rotor de la MADA se réalise par un onduleur de tension. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. Une structure intéressante est celle utilisant la technique de la PWM (Pulse Width Modulation) ou modulation des largeurs d'impulsion, elle consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs. [17]

III.7. Modélisation de l'onduleur triphasé de tension

L'onduleur triphasé est représenté par la figure (III.8). Il est constitué de trois cellules de commutation. Pour simplifier l'étude on suppose que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tensions aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge est équilibrée et couplée en étoile avec neutre isolé.

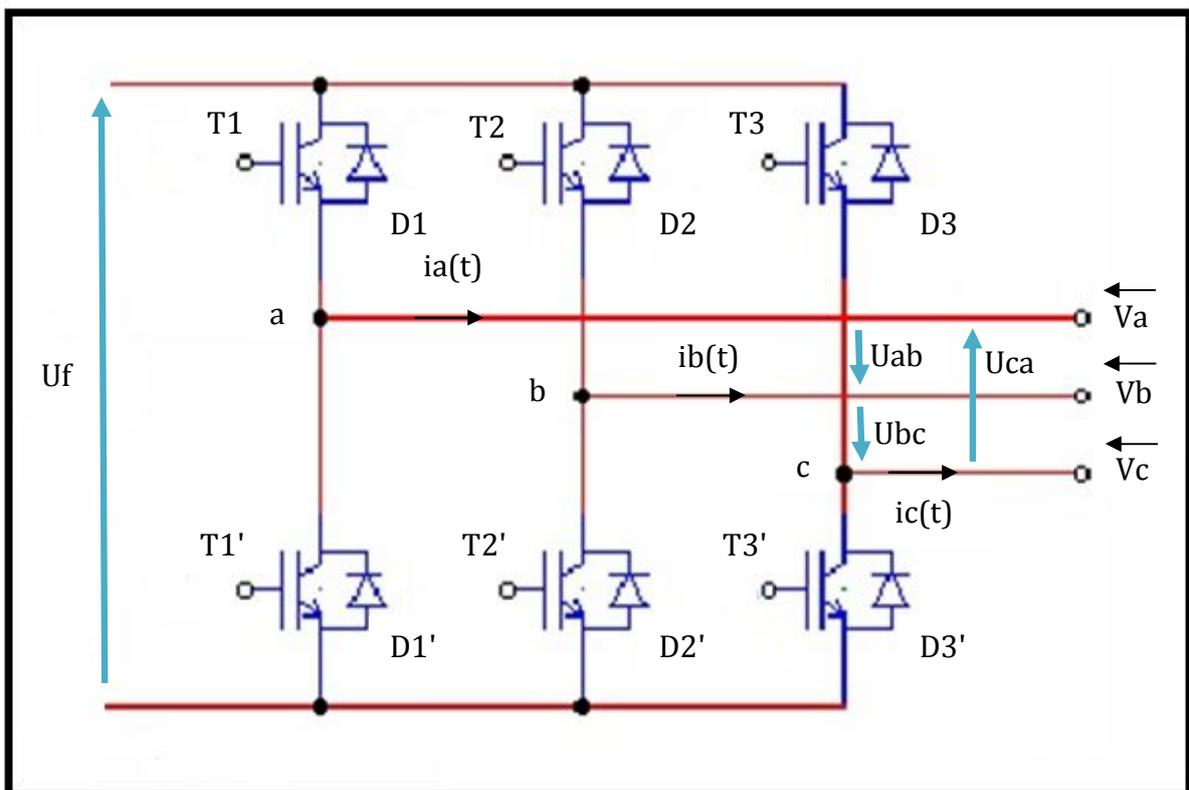


Figure III.9 : Structure de l'onduleur triphasé

V_a, V_b, V_c : les tensions simples délivrées d'un par l'onduleur.

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} : les tensions composées par l'onduleur.

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_a - V_b \\ U_{bc} &= V_b - V_c \\ U_{ca} &= V_c - V_a \end{aligned} \tag{III.31}$$

Ou les tensions simples sont données par :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b &= \frac{1}{3} (U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c &= \frac{1}{3} (U_{ca} - U_{bc}) \end{aligned} \tag{III.32}$$

Etant donné que chaque bras de l'onduleur est le résultat d'un transistor et d'une diode shuntés en antiparallèle, cela correspondrait à un composant bidirectionnel.

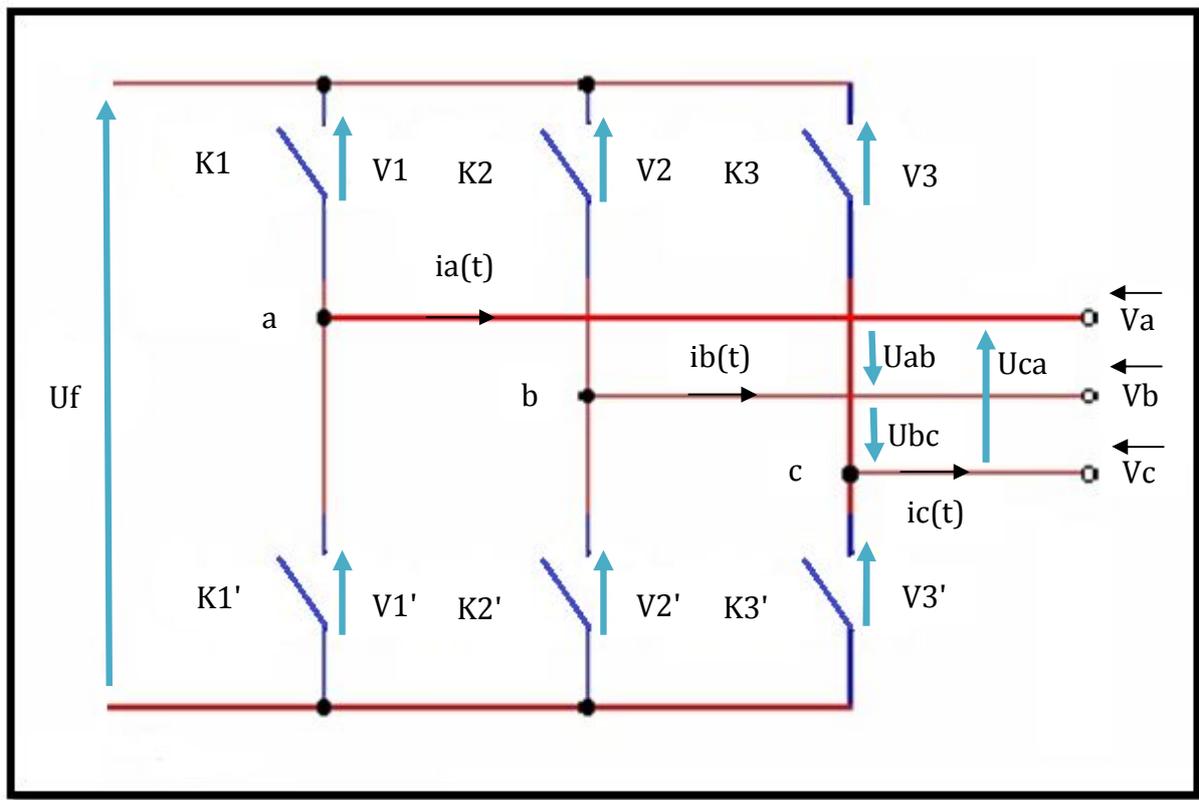


Figure III.11 : Schéma simplifié d'un onduleur de tension commandé en tension.

Soit F_i une fonction logique associée a l'interrupteur K_i définie comme suit :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } K_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}, i=1, 2, 3$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } F_1 = 1 \Rightarrow V_1 = 0 \\ \text{Si } F_1 = 0 \Rightarrow V_1 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_1 = (F_1 - 1) U_f$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } F_2 = 1 \Rightarrow V_2 = 0 \\ \text{Si } F_2 = 0 \Rightarrow V_2 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_2 = (F_2 - 1) U_f$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } F_3 = 1 \Rightarrow V_3 = 0 \\ \text{Si } F_3 = 0 \Rightarrow V_3 = U_f \end{array} \right\} \Rightarrow V_3 = (F_3 - 1) U_f$$

Nous avons :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_1 - V_2 \Rightarrow U_{ab} = (F_1 - F_2) U_f \\ U_{bc} &= V_2 - V_3 \Rightarrow U_{bc} = (F_2 - F_3) U_f \\ U_{ca} &= V_3 - V_1 \Rightarrow U_{ca} = (F_3 - F_1) U_f \end{aligned}$$

Ce qui donne sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = U_f \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

En considérant que (V_a, V_b, V_c) forment un système équilibré, nous avons :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{III.34})$$

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

En remplaçant la formule (III.33) dans (III.35), on aura :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons opté pour la méthode du contrôle vectoriel à flux statorique orienté qui est utilisé pour avoir un modèle simple de la machine asynchrone .

Cette méthode nous a permis non seulement de simplifier notre modèle mathématique mais aussi, elle nous a assuré un découplage entre le couple et le flux.

On a vu les différentes relation entre les paramètres (statorique et rotorique) courant, tension et puissance .

Nous avons vu également que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous a permis de réaliser deux boucles de régulation de puissance en utilisant le régulateur PI.

Ce dernier est simple à mettre en place et offre de bonnes performances, chose qui nous a permis d'avoir des performances dynamiques élevées similaires à celle obtenues avec la machine à courant continu (MCC).

Enfin nous avons effectué la modélisation de l'onduleur de tension, à commande PWM.

Cet onduleur sera simulé dans le quatrième chapitre.

Chapitre IV

Simulations et résultats

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler le système éolien, partie électrique et mécanique, avec la commande qu'on a établie dans le chapitre précédent.

Nous allons construire un schéma bloc sous le logiciel MATLAB SIMULINK, qui représente le modèle de la MADA, la partie mécanique et la MPPT.

Nous allons aussi simuler l'onduleur de tension triphasé.

Enfin on aura à interpréter les résultats obtenus, et voir s'ils sont concordants avec les résultats souhaités, et s'ils satisfont les conditions de fonctionnement.

IV.2. Simulation du système éolien

Nous allons simuler la commande en puissance du système éolien, qu'on a réalisé dans le chapitre précédent.

IV.2.1. Schémas bloc de la simulation

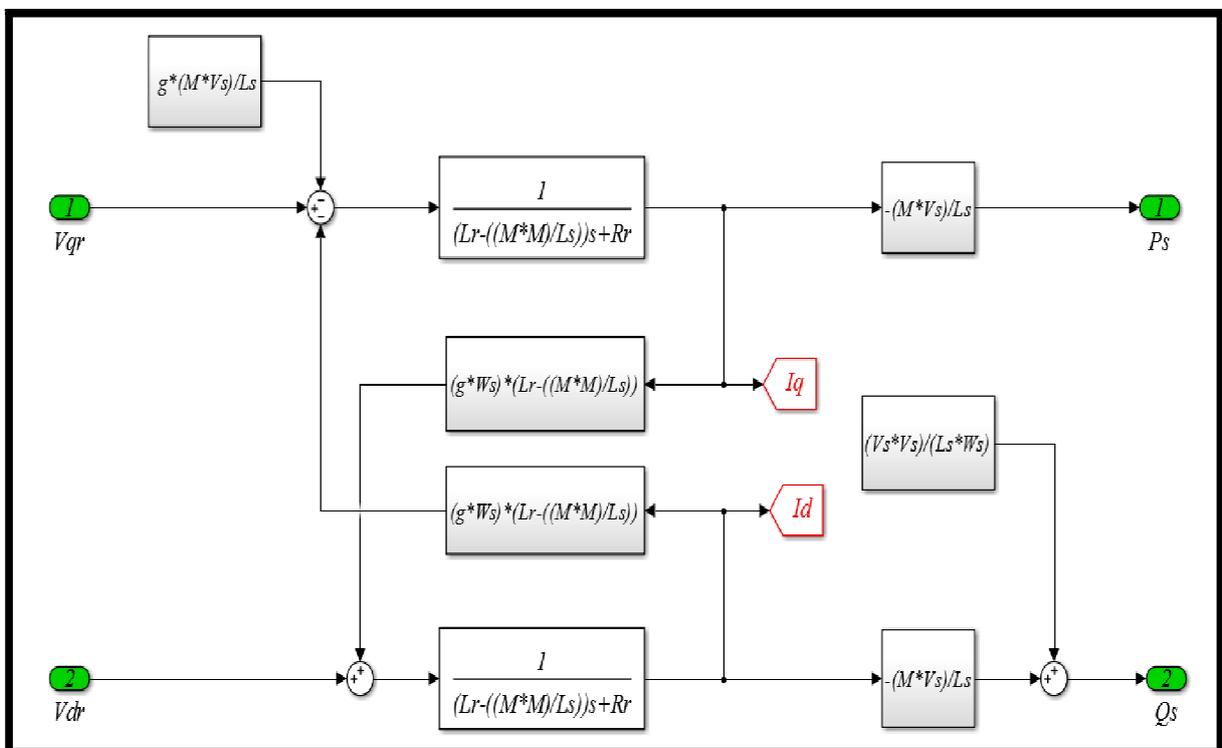


Figure IV.1: Schéma sous simulink de la MADA

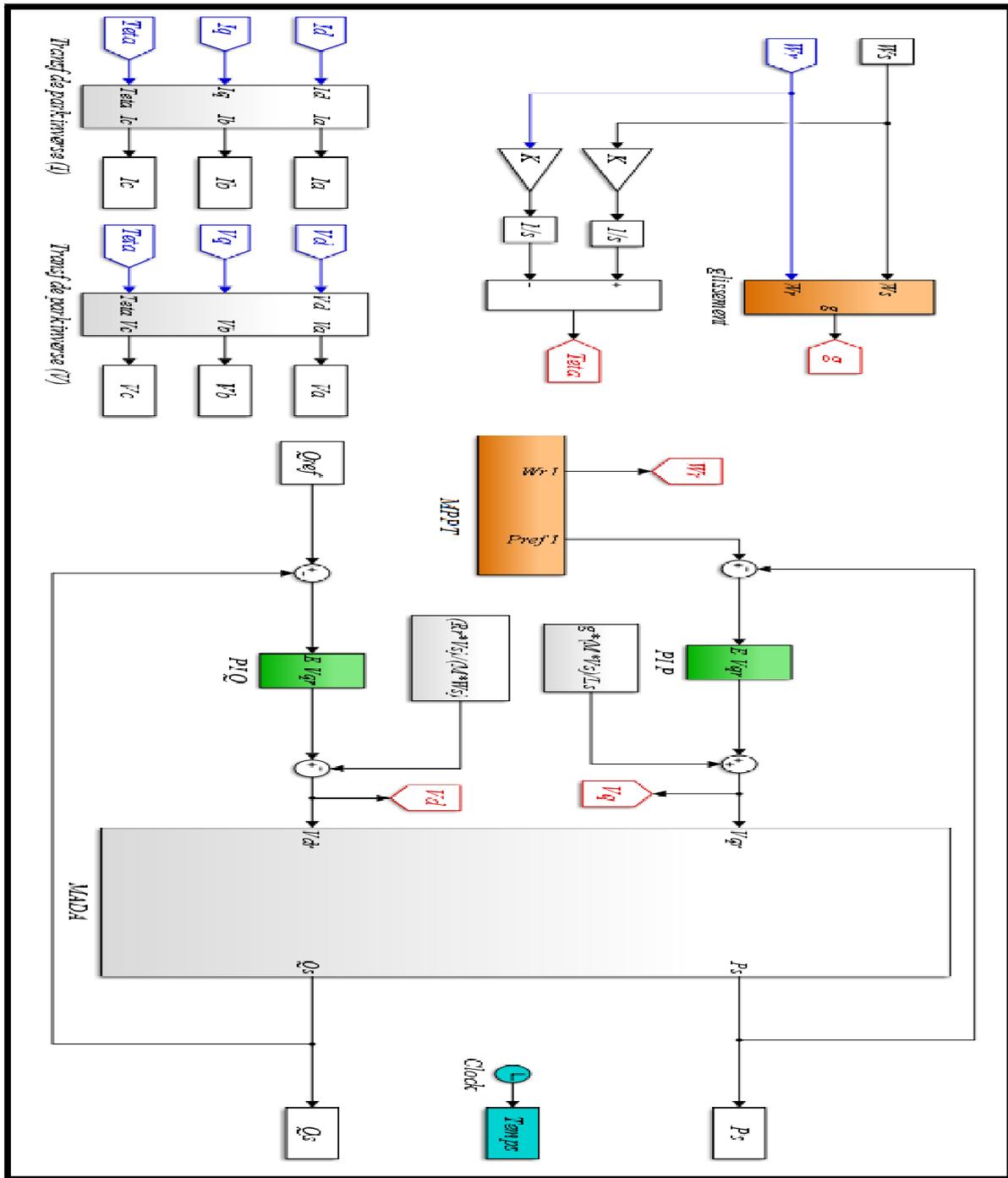


Figure IV.2: Schéma bloc sous simulink

La figure ci-dessus représente le schéma bloc de la commande en puissance de l'éolienne sous MATLAB/SIMULINK, on distingue le modèle de la MADA, la MPPT (Maximum power point tracker), les régulateurs PI sur les axes (d et q) et les blocs de calcul de la transformée inverse de PARK.

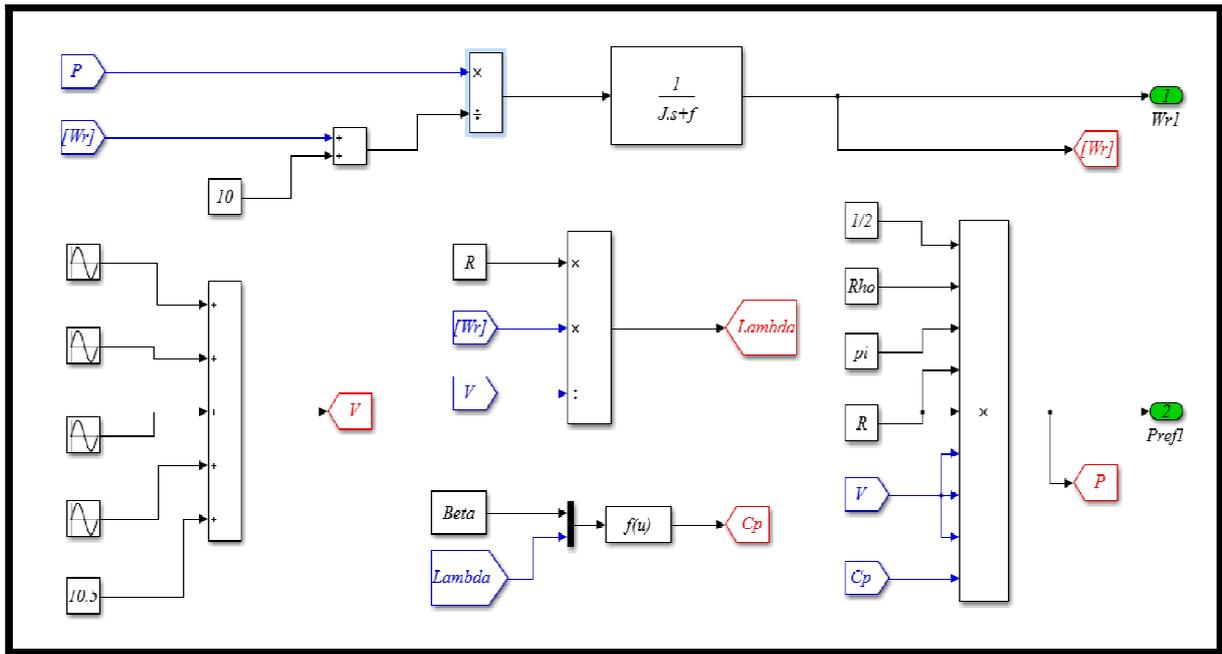


Figure IV.3: Schéma sous simulink de la MPPT

IV.2.2. Résultats de la simulation

➤ Modèle du vent

La vitesse du vent peut être modélisée par une somme de plusieurs sinusoïdes : [18]

$$v_{vent} = 0.2 \sin(36.645t) + \sin(12.93t) + 2 \sin(2.665t) + 0.2 \sin(1.047) + 10.5 \quad (IV-1)$$

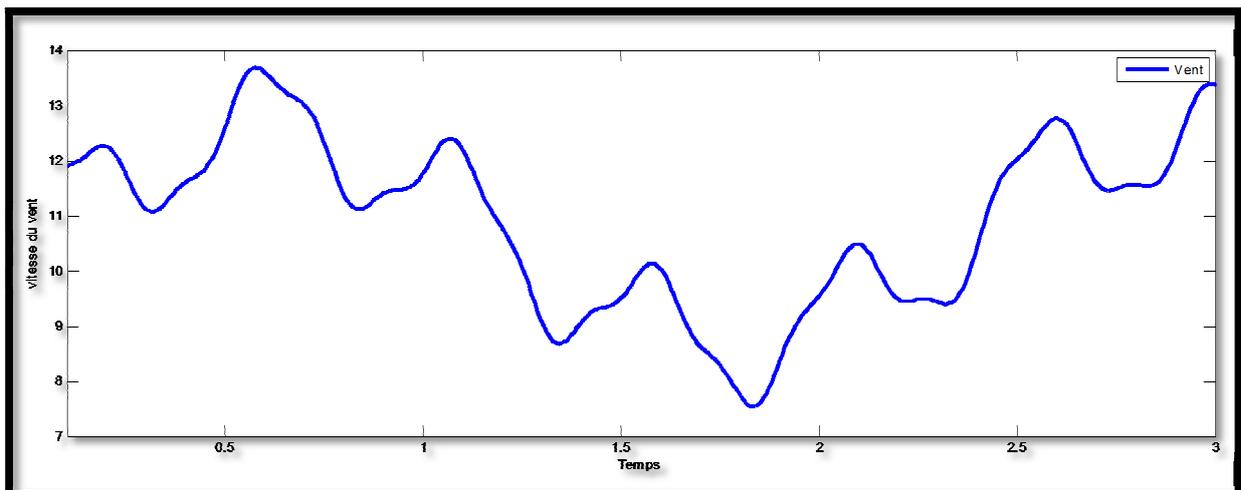


Figure IV.4: Modèle de la vitesse du vent (m/s)

Le modèle de vent représenté sur la figure ci-dessous englobe les deux modes de fonctionnement de la MADA, hypo synchrone et hyper synchrone.

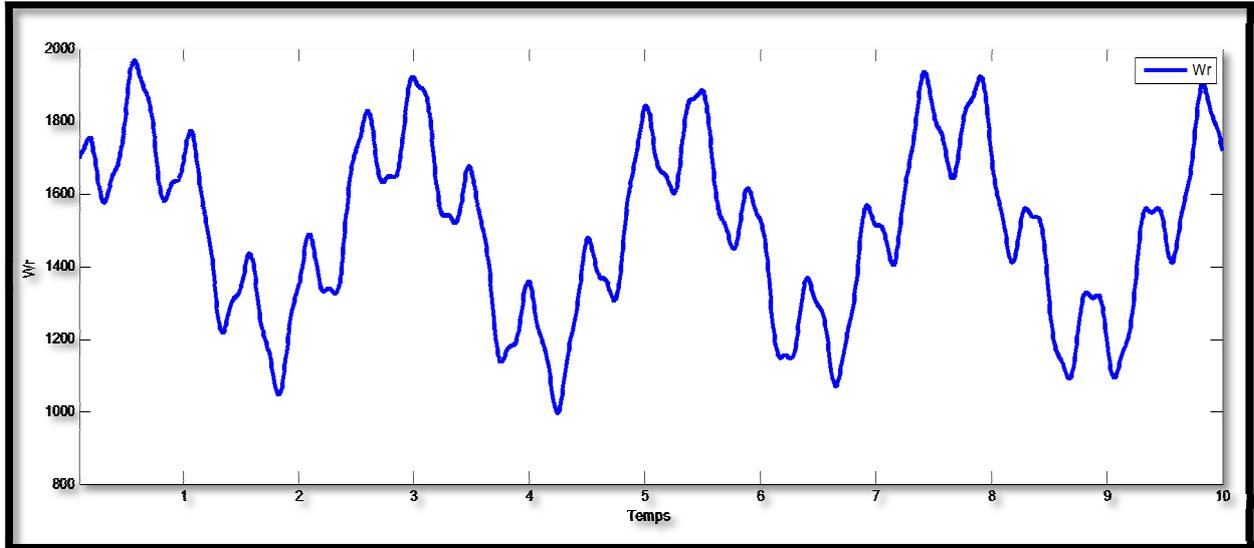


Figure IV.5: vitesse de rotation de la MADA (tr/min)

La figure ci-dessus montre la variation de la vitesse de rotation de la MADA, suite à la variation du vent. On remarque que la vitesse de rotation de la MADA varie entre 1050 et 1950 tr/min ce qui représente une variation de $\pm 30\%$ par rapport à la vitesse de synchronisme.

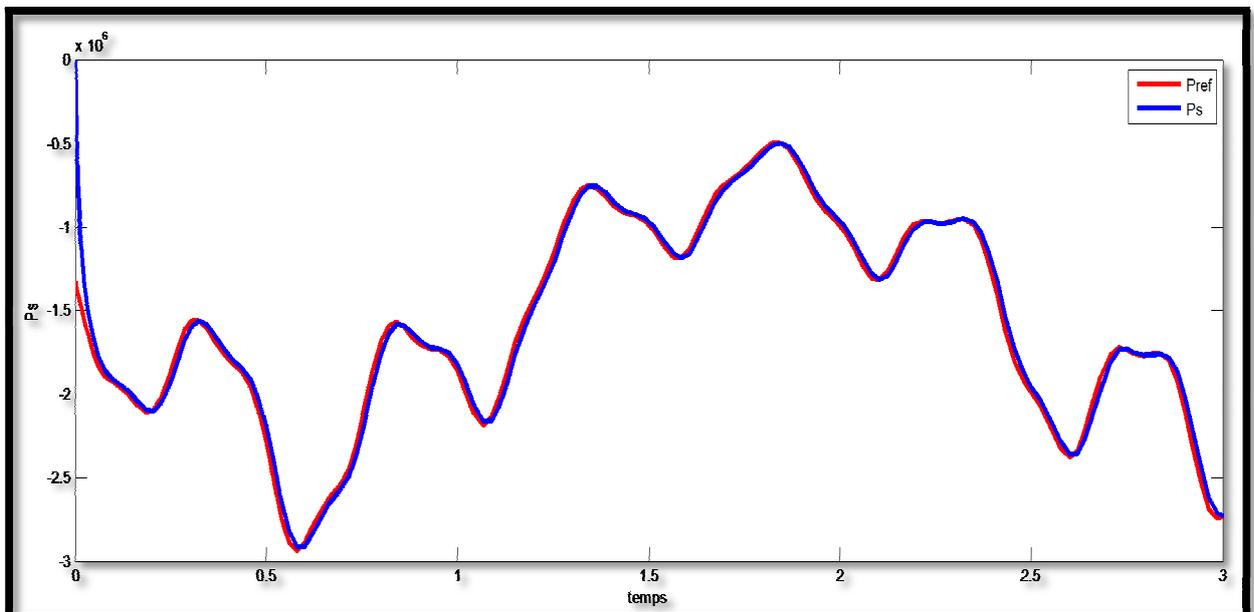


Figure IV.6: Puissance active statorique (W)

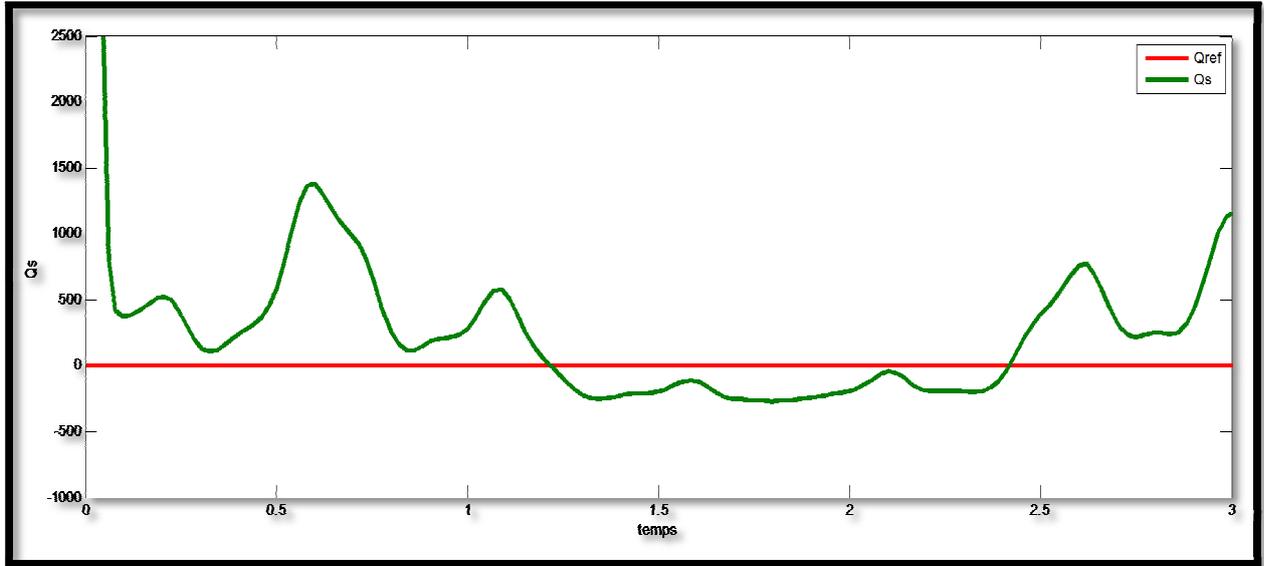


Figure IV.7: Puissance réactive statorique (VAR)

Les figures (IV.6) et (IV.7) représentent les graphes de l'évolution de la puissance active et réactive statorique en fonction du temps, ainsi que leurs valeurs de référence calculé par la MPPT pour la puissance active et une valeur nulle pour la puissance réactive.

Nous remarquons que les grandeurs de référence ont été bien suivies par la MADA pour les deux puissances active et réactive, ce qui indique un bon contrôle de la machine.

Nous remarquons que la puissance active statorique dépend de la vitesse du vent, plus la vitesse du vent augmente plus la puissance délivrée par la MADA augmente.

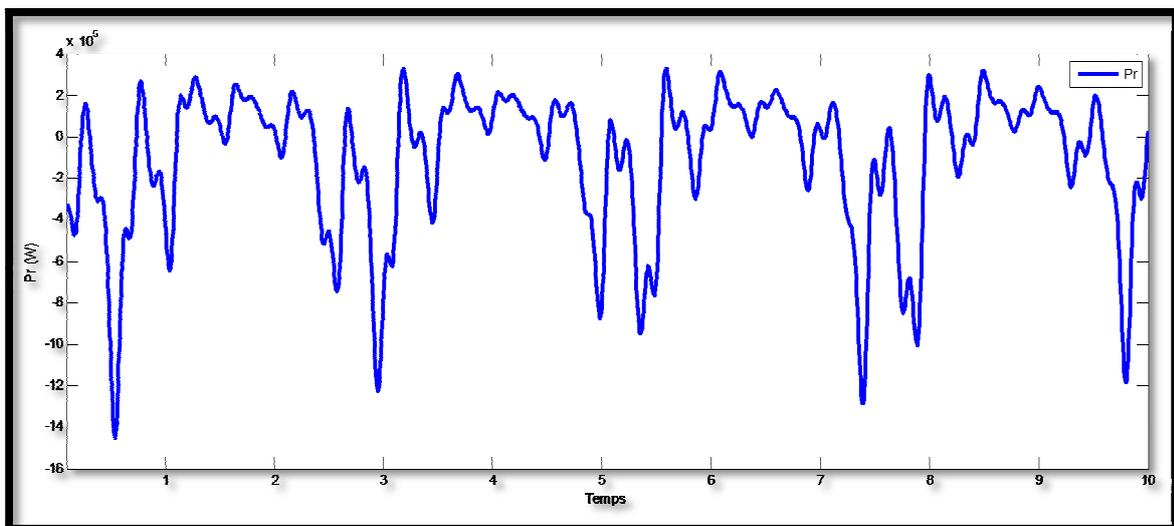


Figure IV.8: puissance active rotorique(W)

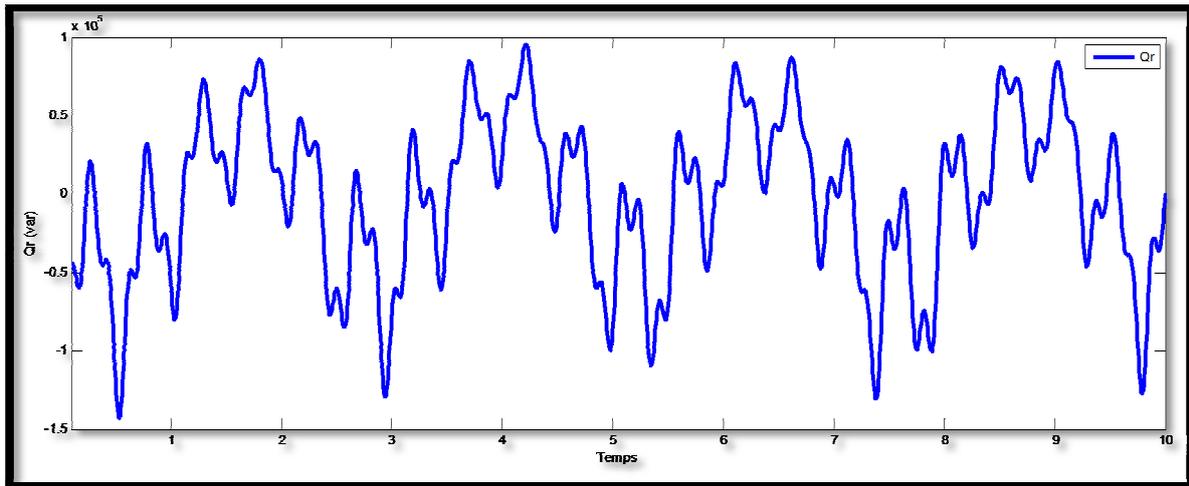


Figure IV.9: puissance réactive rotorique(VAR)

Les figures (IV.8) et (IV.9) représentent l'évolution des puissances active et réactive rotorique en fonction du temps. On remarque que ces puissances dépendent de la vitesse du vent. Lorsque celle-ci est comprise entre 1050 et 1500 tr/min le rotor de la MADA absorbe de la puissance à partir du réseau, c'est le fonctionnement hypo synchrone ($\Omega_r < \Omega_s$).

Pour une vitesse de vent comprise entre 1500 et 1950 tr/min le rotor de la MADA fournit de la puissance au réseau, c'est le fonctionnement hyper synchrone.

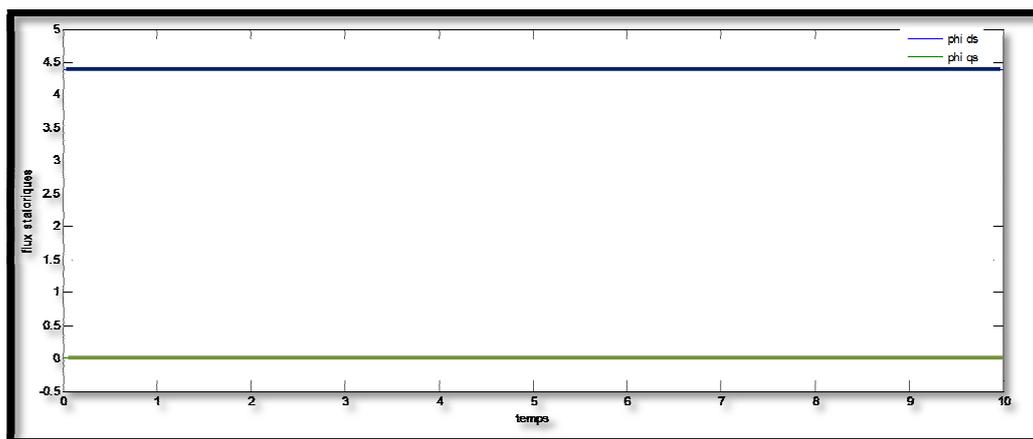


Figure IV.10: Flux statorique(Weber)

Nous remarquons qu'effectivement les flux statoriques d'axe (d;q) sont conformes à nos attentes. Le flux selon l'axe (q) est nul alors que le flux selon l'axe (d) est constant.

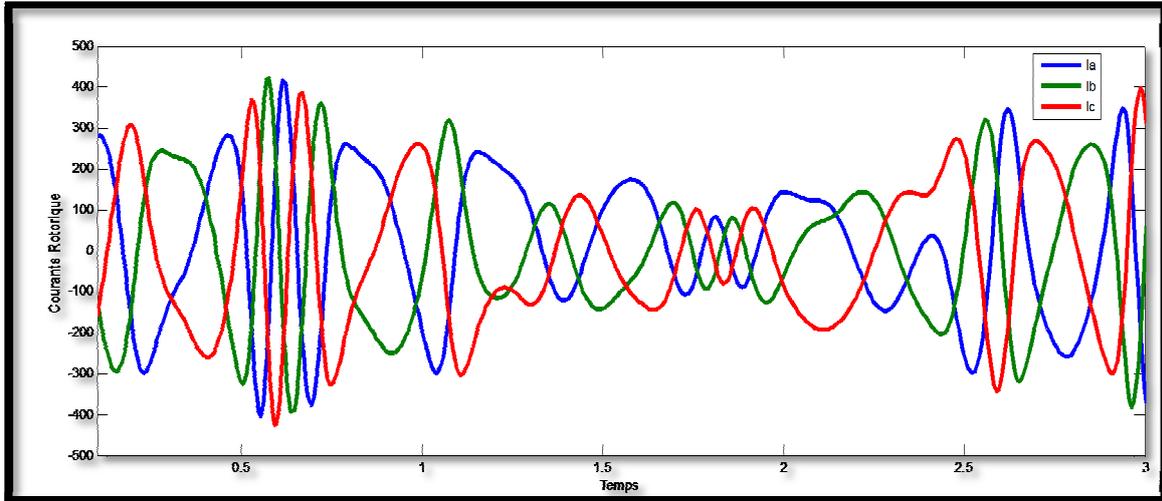


Figure IV.11: Courant rotorique de ligne (A)

La figure (IV.11) représente le graphe d'évolution des courants rotoriques de phase dans les axes (a;b;c).

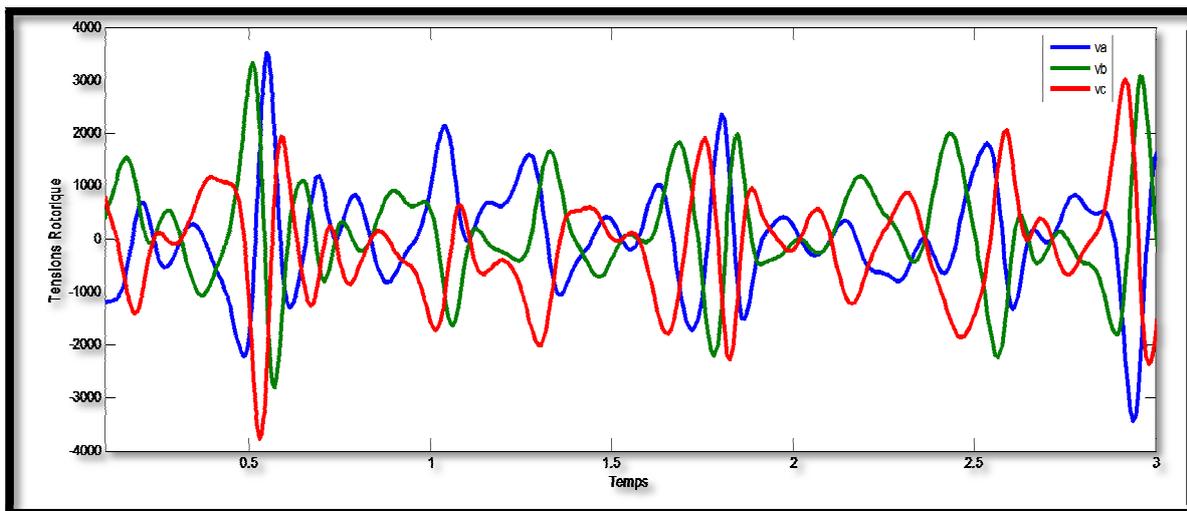


Figure IV.12: Tensions rotorique de ligne (V)

La figure (IV.12) représente le graphe d'évolution des tensions rotoriques de phase dans les axes (a;b;c).

Ces tensions et courants ont atteint respectivement des pic de 3800 V et 400 A. Elles sont déphasés l'une par rapport à l'autre d'un angle de $2\pi/3$.

Aussi sinusoïdales de pulsation et d'amplitude variables selon la vitesse de rotation de la génératrice.

IV.3. Simulation de l'onduleur triphasé

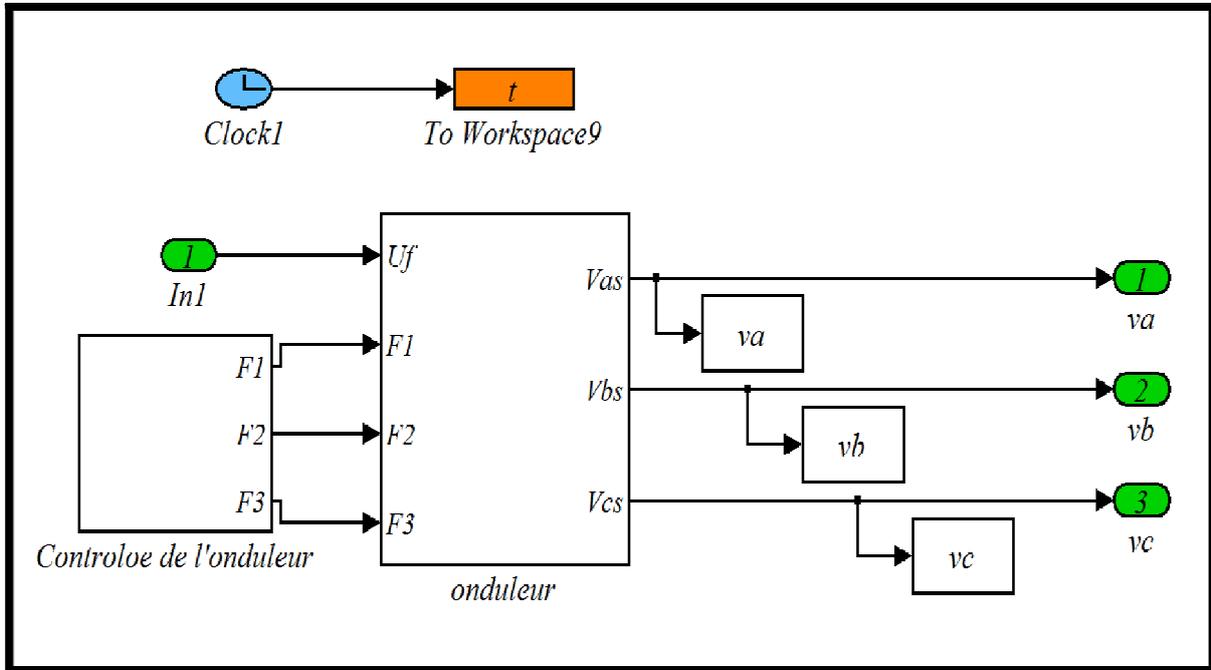


Figure IV.13: Schéma sous simulink de l'onduleur

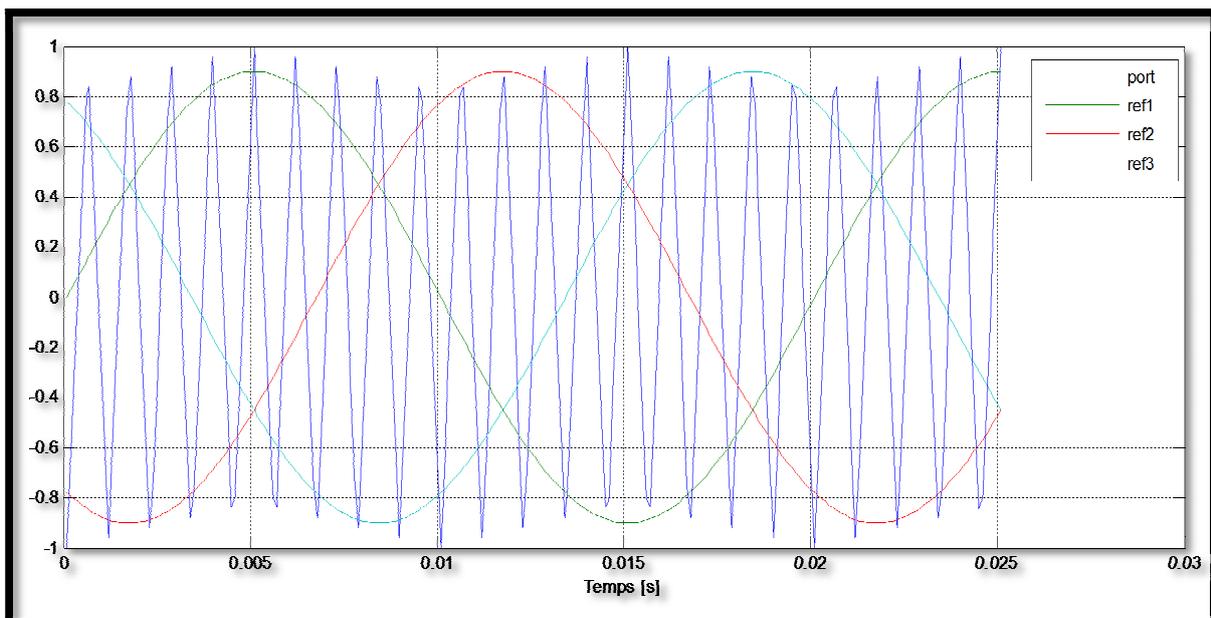


Figure IV.14: Signaux de commandes de l'onduleur

Chapitre IV :
Simulation et résultats

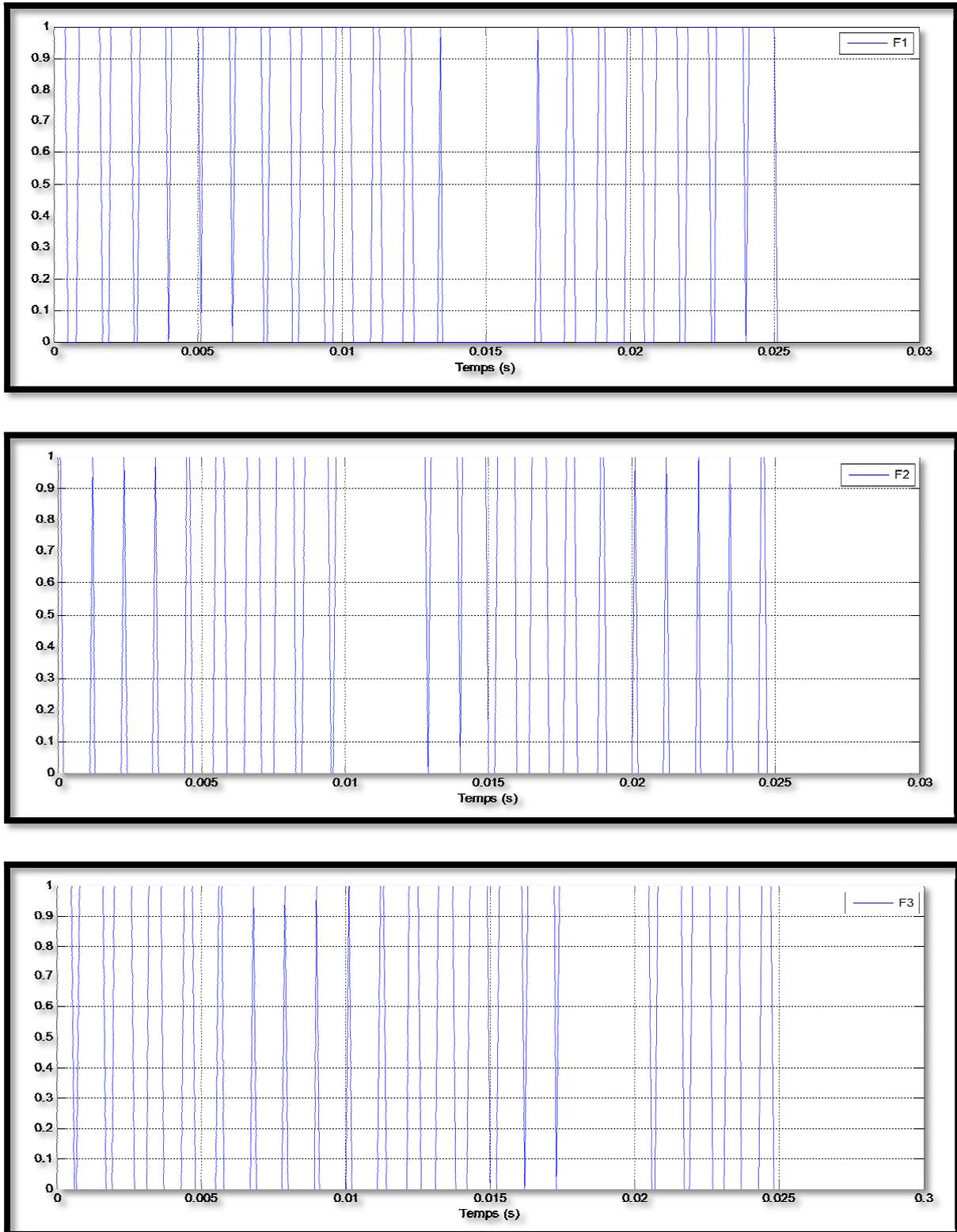


Figure IV.15: tracés des signaux de commandes des interrupteurs constituant l'onduleur

Chapitre IV :
Simulation et résultats

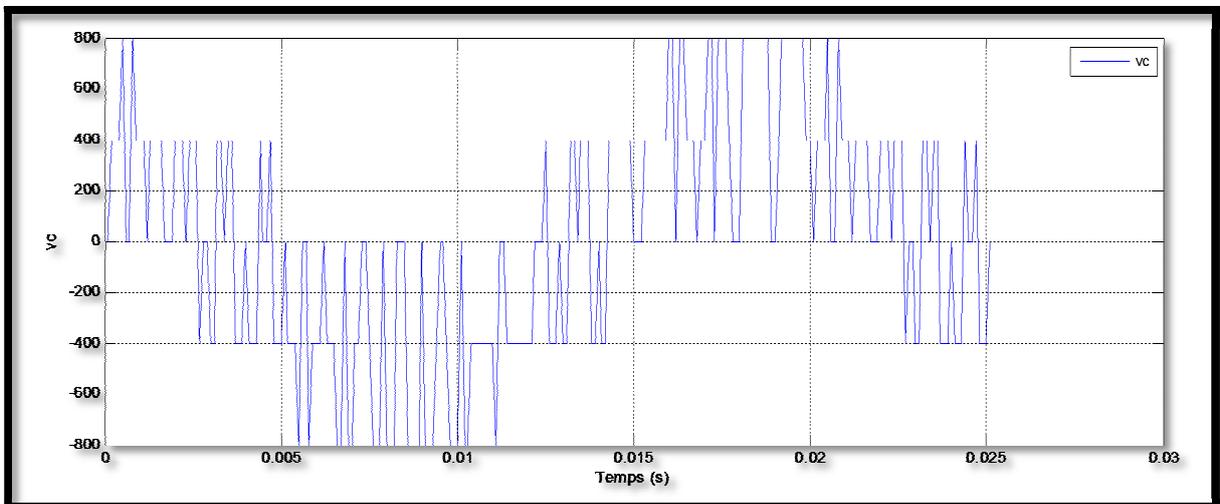
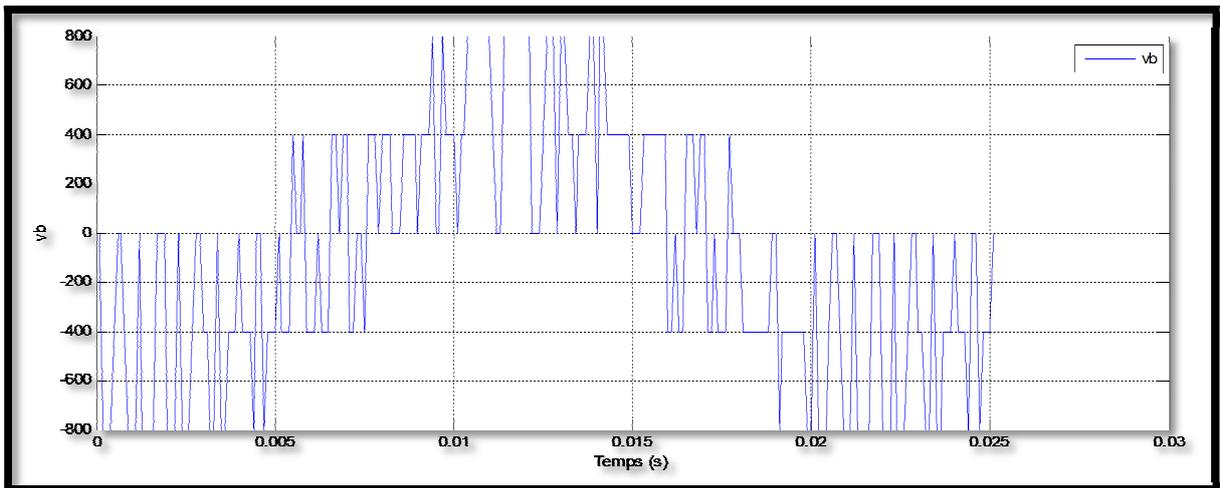
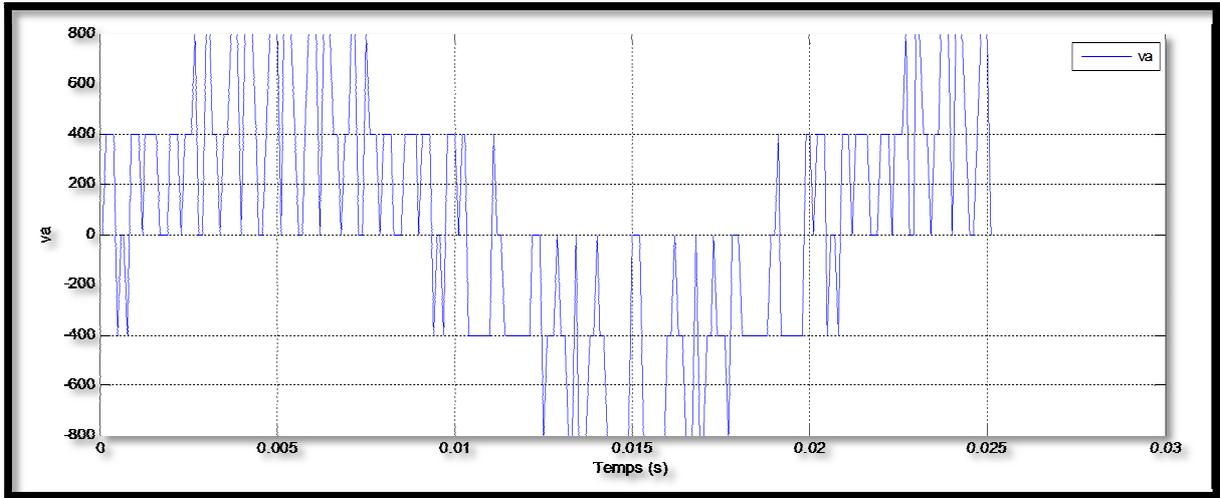


Figure IV.16: Tensions à la sortie de l'onduleur(V)

Les figures ci-dessus représentent les résultats de simulation obtenus par la commande PWM, on voit sur la figure (IV.15) les signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur de tension, et sur la figure (IV.16) les tensions à la sortie de l'onduleur qui sont déphasées de $2\pi/3$ l'une par rapport à l'autre.

Ces tensions ont pour valeurs efficace 690 V et pour fréquence 50 Hz.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a visualisé les résultats des simulations effectuées sur notre système. Ces résultats montrent l'avantage de la commande en puissance de la machine d'un système éolien à base de MADA.

La puissance délivrée par le générateur éolien type MADA dépend de la vitesse du vent au niveau de la surface balayée par les pales de l'éolienne, ainsi, que de la densité volumique de l'air.

Les résultats de la simulation correspondent aux résultats espérés, et montrent qu'il y a concordance avec ceux rencontrés dans de la littérature [19], [20], [21].

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, notre travail s'est porté essentiellement à étudier, modéliser et commander la machine asynchrone à double alimentation, qui est la plus utilisée dans un système éolien.

Nous avons abordé dans un premier chapitre l'étude et la conception de la turbine éolienne car elle constitue un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Bien que beaucoup de gens croient qu'une éolienne, c'est de la mécanique, elles sont aussi et surtout des machines électriques, et les défis techniques ou les coûts de réalisation d'une éolienne résident surtout désormais dans ce domaine de l'électricité et de l'électronique de puissance. D'ailleurs, il vaudrait mieux parler de "centrale éolienne", c'est à dire de l'ensemble des composants qui vous permettent de produire de l'électricité, la "turbine" n'étant qu'une partie de cet ensemble.

Le deuxième chapitre a été consacré à la construction du modèle de la machine asynchrone à double alimentation, d'abord dans un repère triphasé, puis dans le repère déphasé de PARK. Nous nous sommes intéressés à modéliser la turbine éolienne, car bien que cela relève de la mécanique, elle constitue néanmoins un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau et fonctionnant à vitesse variable. Une commande vectorielle en puissance est utilisée afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et testé et comparé ses performances en suivi de consigne. Face aux variations de paramètres, le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle direct. On a aussi construit un modèle de l'onduleur de tension triphasé à commande MLI associé au rotor de la MADA.

Conclusion Générale

Dans le quatrième chapitre on a construit un modèle de simulation sous MATLAB /SIMULINK de tous le système éolien, partie électrique, partie mécanique et partie commande.

On a présenté et commenté des résultats de simulations pour un profil de vent passant par les deux modes de fonctionnements (hypo et hyper synchrone) .

Il est à signaler que les résultats obtenus correspondaient à ceux attendus et des interprétations ont été proposées dans le chapitre IV.

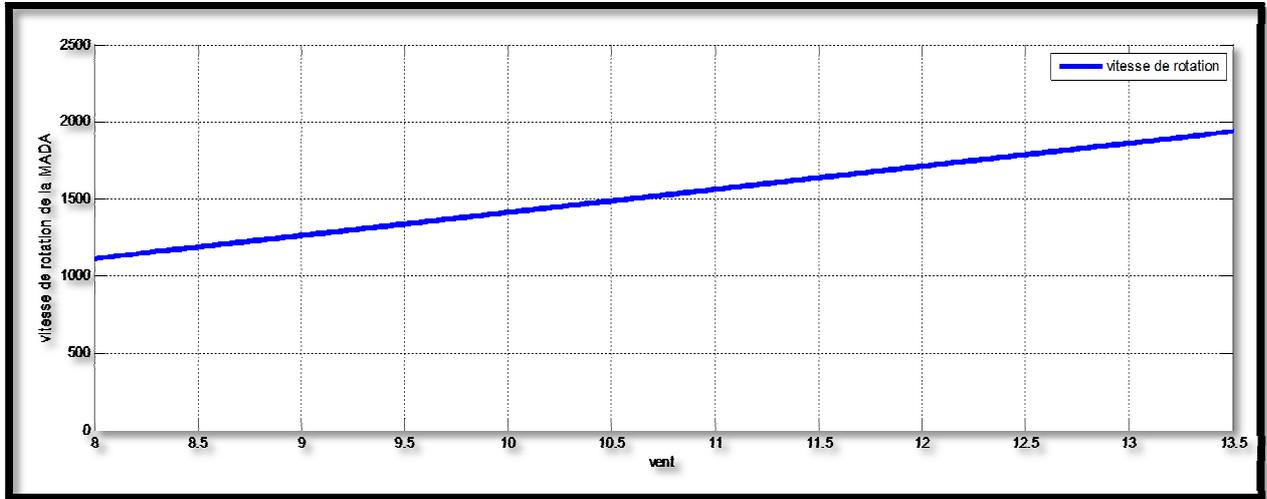
Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimale de la puissance au réseau.



Annexe

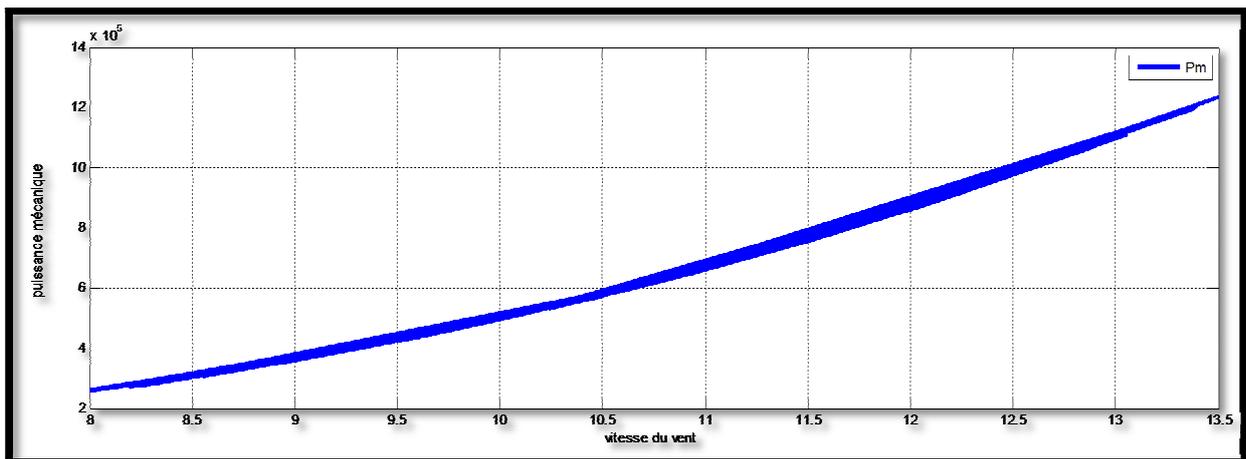
Dimensionnement de l'éolienne :

1-Limite de fonctionnement :



Dans la figure ci-dessus, la vitesse du générateur correspondant à +30% de la vitesse de synchronisme est : $1500+(0,3*1500)=1950$ tr/min, elle est atteinte lorsque la vitesse du vent est de 13.58 m/s (limite de fonctionnement hyper synchrone). Pour la limite du fonctionnement hypo synchrone la vitesse du générateur est de -30% du synchronisme, soit : $1500-(0.3*1500)=1050$ tr/min à laquelle correspond une vitesse de vent de 7,57 m/s.

2-Puissance mécanique délivrée par turbine :



Dans la figure ci-dessus nous déduisons les deux puissances délivrées correspondant aux deux limites de fonctionnement (hypo et hypersynchrone).

Limite hypo synchrone (0.4667 MW, à 7.57 m/s)

Limite hyper synchrone (3 MW, à 13.58 m/s)

I. Paramètres de la turbine éolienne :

- ✓ Nombre de pales =3 ;
- ✓ Diamètre d'une pale =45m ;
- ✓ Gain du multiplicateur : $G=100$;
- ✓ Inertie de la turbine : $J=1.4 \text{ Kg.m}^2$

II. Paramètres de la MADA :

- ✓ $P_n = 3 \text{ MW}$;
- ✓ $U_s = U_r = 690 \text{ V}$;
- ✓ $p = 2$;
- ✓ $f = 50 \text{ Hz}$;
- ✓ Résistance statorique : $R_s = 2.97 \text{ m}\Omega$;
- ✓ Inductance statorique : $L_s = 12.2 \text{ mH}$;
- ✓ Résistance rotorique : $R_r = 3.82 \text{ m}\Omega$;
- ✓ Inductance rotorique : $L_r = 12.2 \text{ mH}$;
- ✓ Inductance Mutuelle : $M = 12.12 \text{ H}$;
- ✓ Inertie de la MADA : $J = 114 \text{ Kg.m}^2$;
- ✓ Coefficient des frottements : $f = 10 \text{ Nm.s/rd}$;

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Bennour Cherif** : « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie, 2012.
- [2] **Khojet El Khil. S** : « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) », Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [3] **Naouel Hamdi** : « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire de magister Université MENTOURI de CONSTANTINE, Algérie, 2008.
- [4] **S. Drid** : « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation : théorie et expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [5] **G. Salloum** : « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [6] **F. Poitiers** : « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [7] **P-E. Vidal** : « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [8] **AKEL Fethi** : « Etude et Réalisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, École militaire polytechnique, Alger, 2009.
- [9] **S.Mekhtoub** : « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [10] **LOPEZ Miguel** : « Contribution a L'optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée », présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur, Université de PARIS-SUD 11, 2010.
- [11] **ATOUI Issam** : « Contribution au Diagnostic de Défaut dans une Chaîne de Production D'énergie », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar ANNABA, 2009.
- 

Bibliographie

- [12] **N. Laverdure** : « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat de l'Université Grenoble, 2012.
- [13] **F. Poitier** : « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [14] **ZIOUI Nadjjet** : « Conception, modélisation et commande d'une éolienne à axe vertical ». Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister En Automatique, École Nationale supérieur polytechnique, 2008.
- [15] **ROBYNS Benoît** : « Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [16] **Bouaraki Mouloud** : « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF » mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2012.
- [17] **MIRECKI Adam** : « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », présentée en vue d'obtenir le grade de Docteur, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, 2005.
- [18] **AKEL Fethi** : « Etude et Réalisation d'un Emulateur de Turbine Eolienne », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, École militaire polytechnique, Alger, 2009.
- [19] **HAMDI Naouel** : « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Constantine, Alger, 2008.
- [20] **BOUARAKI Mouloud** : « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Alger, 2012.
- [21] **DJAFER Mohamed** : « Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITE DE M'SILA, Alger, 2014.
- [22] <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-energie-eolienne.pdf>
- [23] <http://www.iscience.ca/energieeo/ateliers/energieeolienneprincipes.php>
- [24] <http://www.eolien.be/node/41>
- 