

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF
UFAS (ALGERIE)

Mémoire

Présenté à la Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

Magister en Electrotechnique

Option : commande électrique

Présenté par

Mr. BENARIOUA Sofiane

Thème

Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable

Soutenu publiquement le 24/10/2012 devant le jury composé de :

| | | |
|-------------------------|-------------------------|------------|
| Dr. SAIT BELKACEM | M.C Université de Sétif | Président |
| Dr. HEMSAS KAMEL EDDINE | M.C Université de Sétif | Rapporteur |
| Dr. HACHEMI MABROUK | M.C Université de Sétif | Examineur |
| Dr. HARMAS MED NAGUIB | M.C Université de Sétif | Examineur |

Remerciements

*Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués sous la direction de Monsieur **HEMSAS Kamel Eddine**, Maître de conférences à l'UFAS, à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués pendant toute la durée de ce travail.*

*Je tiens à remercier également Monsieur **SAIT Belkacem**, Maître de conférences à l'UFAS, d'avoir accepté de présider mon Jury de mémoire. Je suis très reconnaissant pour le grand honneur qu'il m'a accordé en acceptant cette tâche.*

J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs

*- **HACHEMI Mabrouk**, Maître de conférences à l'UFAS.*

*- **HARMAS Med Naguib**, Maître de conférences à l'UFAS.*

Pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à toute l'équipe des enseignants, chercheurs et post gradués de L'UFAS.

Ces dernières lignes sont pour ceux qui je ne les remercie jamais assez, mes chers parents ainsi que mes frères et sœurs, pour leurs soutiens et encouragements financiers et moraux non seulement pendant le présent travail, mais aussi pendant tout mon cursus universitaires.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce modeste travail.

DEDICACE

*A mes chers parents,
A toute ma famille,
A tous mes amis ...*

BENARIOUA Sofiane

SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I

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

| | |
|--|----|
| I.1.Introduction..... | 1 |
| I.2.Historique de l'éolien..... | 1 |
| I.3.Quelques notions sur le vent..... | 2 |
| I.3.1.Direction et vitesse du vent..... | 2 |
| I.4.Situation de l'éolien dans le monde..... | 3 |
| I.4.1. Systèmes De Conversion Eoliens (SCE)..... | 3 |
| I.4.2.Intérêt des SCE à vitesse variable par rapport au SCE a vitesse fixe..... | 3 |
| I.4.3.Energie éolienne en quelques chiffres..... | 5 |
| I.5.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne..... | 9 |
| I.5.1.Avantages..... | 9 |
| I.5.2.Inconvénients..... | 11 |
| I.6.Description des systèmes éoliens..... | 11 |
| I.6.1.Constitution d'une éolienne..... | 11 |
| I.6.2.Différentes types d'aérogénérateurs..... | 13 |
| I.6.3. Taille des aérogénérateurs..... | 14 |
| I.6.4.Limite de Betz..... | 15 |
| I.6.5.Caractéristiques de la turbine éolienne..... | 16 |
| I.6.6.Efforts sur une pale..... | 17 |
| I.6.7.Modes de régulation..... | 19 |
| I.7.La boîte de vitesse..... | 20 |
| I.8.Les générateurs utilisés dans le SCE..... | 21 |
| I.8.1.Systèmes utilisant la machine asynchrone..... | 21 |
| I.8.2.Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"..... | 25 |
| I.8.3.Systèmes utilisant la machine synchrone..... | 31 |
| I.8.4Autres Architectures..... | 32 |
| I.9.Conclusion..... | 33 |

CHAPITRE II

modélisation du système éolien

| | |
|--|----|
| II.1.Introduction..... | 34 |
| II.2.Source primaire : le vent..... | 34 |
| II.2.1.Expression du vent en un point fixe..... | 34 |
| II.2.2.Conversion aérodynamique..... | 36 |
| II.2.3.Coefficient de puissance $\frac{P}{P_{max}}$ (A, B)..... | 37 |
| II.3.Modélisation de la partie mécanique..... | 38 |
| II.3.1.Extraction du maximum de la puissance du vent..... | 40 |
| II.3.2.Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation..... | 41 |
| II.3.3.Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation..... | 43 |
| II.3.4.Résultats de simulation..... | 45 |

| | |
|--|----|
| II.4.Modélisation de la partie électrique..... | 46 |
| II.4.1.Description de la MADA..... | 46 |
| II.4.2.Modes de fonctionnement de la MADA..... | 47 |
| II.4.3.Modélisation de la MADA en grandeurs de phases..... | 48 |
| II.4.4.Modélisation de la MADA dans un repaire orthogonal..... | 52 |
| II.4.5.Equation de la MADA dans le repère arbitraire..... | 54 |
| II.4.6.Choix du référentiel..... | 57 |
| II.4.7.Simulation du model de la MADA..... | 59 |
| II.5.Conclusion..... | 61 |

CHAPITRE III

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction..... | 62 |
| III.2. Principe de la commande vectorielle..... | 62 |
| III.3. Modèle de la MADA a flux statorique oriente..... | 63 |
| III.3.1. Expressions des puissances (active et réactive) statoriques..... | 65 |
| III.3.2. Expressions des tensions rotoriques..... | 66 |
| III.4. Contrôle indépendant des puissances active et réactive..... | 67 |
| III.5. Réglage direct des puissances active et réactive..... | 67 |
| III.5.1. Schéma bloc de la régulation..... | 67 |
| III.5.2. Calcul des paramètres du régulateur PI..... | 68 |
| III.5.3. Schéma synoptique du contrôle de la MADA..... | 69 |
| III.5.4. Résultat de simulation pour le réglage direct des puissances..... | 70 |
| III.6. Réglage indirect des puissances active et réactive..... | 72 |
| III.6.1. Réglage sans boucle de puissance..... | 73 |
| III.6.2.Réglage avec boucle de puissance..... | 77 |
| III.7. Introduction des convertisseurs pour la commande du rotor de la MADA..... | 81 |
| III.7.1. Convertisseur coté réseau..... | 81 |
| III.7.2. Commande du convertisseur coté réseaux..... | 84 |
| III.7.3. Modélisation du convertisseur coté du rotor..... | 85 |
| III.8. Résultats de simulation du système onduleur-MADA..... | 86 |
| III.9. Résultat de simulation de la chaine éolienne..... | 88 |
| III. 10. Conclusion..... | 91 |
| Conclusion générale | |
| Annexes | |
| Bibliographie | |

Liste des symboles

r : Grandeurs rotoriques.

s : Grandeurs statoriques.

d, q : Grandeurs transformées dans référentiel tournant.

α, β : Grandeurs transformées dans référentiel lié au stator.

t : Temps

R : Rayon de la turbine.

C_{popt} : Coefficient de puissance optimale.

$C_p(\lambda)$: Coefficient de puissance.

J_T : Moment d'inertie de la turbine.

C_D : Coefficient de traînée.

C_L : Coefficient de portance.

g : Glissement.

S : Surface balayée par les pales.

v : Vitesse de vent relatif.

V : Vitesse de vent incident.

C_p : Coefficient de puissance.

λ_{opt} : Valeur optimale de λ .

ρ : Densité volumique de l'air.

β : Angle de calage des pales de la turbine.

λ : Rapport de vitesse de la turbine.

C_T : Couple de la turbine.

Ω_T : Vitesse de rotation de la turbine.

f_T : Fréquence de rotation de la turbine.

P_T : Puissance captée par la turbine.

G : Rapport de multiplication.

J_T : Inertie axe lent.

J_G : Inertie axe rapide.

C_G : Couple axe rapide.

Ω_G : Vitesse de rotation de la génératrice.

f_r : Fréquence rotoriques.

m : Rapport de transformation.

M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

p : Nombre de paires de pôles de la MADA

R_s : Résistances statoriques de la MADA.

R_r : Résistances rotoriques de la MADA.

J_m : Moment d'inertie de la machine.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants réels dans les phases rotoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants réels dans les phases statoriques.

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Tensions simples réelles du stator alimentation de la machine.

Liste des symboles

v_{an}, v_{bn}, v_{cn} : Tensions simples délivrées par l'onduleur connecté au rotor.

\bar{v}_S : Vecteurs tensions statoriques

\bar{v}_R : Vecteurs tensions rotoriques

$\psi_{Sa}, \psi_{Sb}, \psi_{Sc}$: Flux statoriques réels.

C_{em} : Couple électromagnétique.

P_S : Puissance active au stator.

Q_S : Puissance réactive au stator.

P_R : Puissance active au rotor.

Q_R : Puissance réactive au rotor.

P_m : Puissance mécanique.

ω : Pulsation mécanique.

ω_R : Pulsation rotorique.

Ω : vitesse de rotation mécanique de l'arbre

f_R : Fréquence rotorique.

g : Glissement.

Ω_G : Vitesse de rotation de la génératrice.

k_p : Gain proportionnel du contrôleur PI.

k_i : Gain intégral du contrôleur PI.

τ : Constante de temps du système.

AC: Alternative Current

FEM: Force électromotrice

MS: Machine synchrone

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsions

SCE: Systèmes De Conversion Eoliens

GVC: Génération à Vitesse Constante

GVV: Génération à Vitesse Variable

CDER: Centre de Développement d'Energie Renouvelable

MAS: Machine Asynchrone à cage

MADA: Machine Asynchrone à Double Alimentation

MSAP: Machine Synchrone à Aimant Permanent

MSRB: Machine Synchrone à Rotor Bobiné

MRV: Machine à reluctance variable

MADAB: Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais

MADAC: Machine Asynchrone à Double Alimentation en Cascade

SCEVV: Système de conversion éolien a vitesse variable

SCEVF: Système de conversion éolien a vitesse Fixe

K_v : Gain statique du filtre.

T_v : Constante de temps du filtre.

L_v : L'échelle de longueur de la turbulence obtenue expérimentalement et il dépend de la nature du terrain.

φ_s, φ_r : Les flux statorique et rotorique respectivement.

L_s, L_r : Les inductances propres statorique et rotorique.

Liste des symboles

M_s, M_r : Les mutuelles entre les bobines statoriques respectivement rotoriques.

$V_{ds}, V_{qs}, \bar{V}_{dr}, \bar{V}_{qr}$: Les tensions direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$: Les courants direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\{_{ds}, \{_{qs}, \{_{dr}, \{_{qr}$: Les flux direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\check{S}_s, \check{S}_r, \check{S}$: La pulsation statorique, rotorique et mécanique respectivement.

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Fig. (I. 1) : Principaux organes du système de conversion éolien | 3 |
| Fig. (I. 2) : Systèmes de conversion éoliens à partir de sources d'énergie variable | 4 |
| Fig. (I. 3) : Capacité mondiale installée en MW | 5 |
| Fig. (I. 4) : Taux de croissance du marché mondial | 6 |
| Fig. (I. 5) : Les 10 pays ayant les plus fortes croissances | 6 |
| Fig. (I. 6) : Répartition continentale de la capacité totale 2008 | 6 |
| Fig. (I. 7) : Total des installations – Afrique (MW) | 7 |
| Fig. (I. 8) : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie | 8 |
| Fig. (I. 9) : Exemple de système éolien | 12 |
| Fig. (I. 10) : éoliennes à axe verticale | 13 |
| Fig. (I. 11) : éoliennes à axe horizontale | 14 |
| Fig. (I. 1) : Taille des hélices en m et puissance en kW | 15 |
| Fig. (I. 2) : Tube de courant d'air autour d'une éolienne | 15 |
| Fig. (I. 3) : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné | 17 |
| Fig. (I. 15) : Courbe caractéristiques des aérogénérateurs | 17 |
| Fig. (I. 4) : Efforts sur un élément d'une pale | 18 |
| Fig. (I. 17) : Flux d'air sur un profil de pale « stall » | 19 |
| Fig. (I. 18) : Système d'orientation des pales « Pitch » | 20 |
| Fig. (I. 195) : Boite de vitesse de deux arbres parallèles pour une éolienne de 200 à 500 kW | 21 |
| Fig. (I. 20) : Boite de vitesse standard pour les grandes turbines éoliennes | 21 |
| Fig. (I. 21) : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles | 22 |
| Fig. (I. 22) : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau | 23 |
| Fig. (I. 23) : Générateur asynchrone à double stator | 24 |
| Fig. (I. 24) : Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau | 24 |
| Fig. (I. 25) : Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs | 25 |
| Fig. (I. 26) : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor | 26 |
| Fig. (I. 27) : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée | 27 |
| Fig. (I. 28) : Effet de variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique | 28 |
| Fig. (I. 29) : MADA, structure Kramer | 29 |
| Fig. (I. 30) : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur | 30 |
| Fig. (I. 31) : structure de Scherbius avec convertisseurs | 31 |
| Fig. (I. 32) : système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable | 32 |
| Fig. (II. 1) : Construction de la vitesse de vent en un point | 36 |
| Fig. (II. 2) : Profile du vent | 36 |
| Fig. (II. 3) : Coefficient de puissance C_p de vent en fonction de λ pour différents β | 38 |
| Fig. (II. 4) : Modèle mécanique de la turbine éolienne | 39 |

| | |
|--|----|
| Fig. (II. 5) : Schéma bloc du modèle de la turbine | 39 |
| Fig. (II. 6) : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable | 40 |
| Fig. (II. 7) : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation | 41 |
| Fig. (II. 8) : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour β donnée | 42 |
| Fig. (II. 9) : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation | 43 |
| Fig. (II. 10) : Vitesse de rotation de la turbine | 45 |
| Fig. (II. 11) : Vitesse spécifique (λ) de la turbine | 45 |
| Fig. (II. 12) : Coefficient de puissance de la turbine | 46 |
| Fig. (II. 13) : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation | 46 |
| Fig. (II. 14) : Cascade d'une machine asynchrone à double alimentation | 47 |
| Fig. (II. 15) : Quadrants de fonctionnement de la MADA | 48 |
| Fig. (II. 16) : Représentation schématique de la machine asynchrone | 49 |
| Fig. (II. 17) : Transformation des variables statoriques | 53 |
| Fig. (II. 18) : Transformation des variables rotoriques | 54 |
| Fig. (II. 19) : La MADA dans le référentiel arbitraire | 54 |
| Fig. (II. 20) : Schéma bloc du modèle de la MADA | 59 |
| Fig. (II. 21) : Tensions d'alimentations au stator | 60 |
| Fig. (II. 22) : Courants statoriques | 60 |
| Fig. (II. 23) : Tensions et courants rotoriques | 60 |
| Fig. (II. 24) : Puissances active et réactive | 61 |
| Fig. (II. 25) : Couple électromagnétique et vitesse de rotation | 61 |
| Fig. (III. 1) : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances | 66 |
| Fig. (III. 2) : Schéma bloc du réglage direct des puissances active et réactive | 67 |
| Fig. (III. 3) : Schéma bloc du système de régulation | 68 |
| Fig. (III. 4) : Schéma synoptique du contrôle direct des puissances active et réactive de la MAD | 70 |
| Fig. (III. 5) : Puissance active statorique | 71 |
| Fig. (III. 6) : Puissance réactive statorique | 71 |
| Fig. (III. 7) : Composantes direct et quadratique du courant statorique | 71 |
| Fig. (III. 8) : Composantes direct et quadratique du courant rotorique | 71 |
| Fig. (III. 9) : Courant d'une phase statorique | 72 |
| Fig. (III. 10) : Courant d'une phase statorique(Zoom) | 72 |
| Fig. (III. 11) : Courant d'une phase rotorique | 72 |
| Fig. (III. 12) : Courant d'une phase rotorique(Zoom) | 72 |
| Fig. (III. 13) : Schéma bloc du réglage indirect sans boucle de puissance | 73 |
| Fig. (III. 14) : Schéma bloc du système de régulation | 73 |
| Fig. (III. 15) : Schéma synoptique du contrôle indirect sans boucle de puissance | 75 |
| Fig. (III. 16) : Puissance active statorique | 76 |
| Fig. (III. 17) : Puissance réactive statorique | 76 |
| Fig. (III. 18) : Composantes direct et quadratique du courant statorique | 76 |
| Fig. (III. 19) : Composantes direct et quadratique du courant rotorique | 76 |
| Fig. (III. 20) : Courant d'une phase statorique | 77 |
| Fig. (III. 21) : Courant d'une phase statorique(Zoom) | 77 |

| | |
|---|----|
| Fig. (III. 22) : Courant d'une phase rotorique | 77 |
| Fig. (III. 23) : Courant d'une phase rotorique(Zoom) | 77 |
| Fig. (III. 24) : Schéma bloc du réglage indirect avec boucle de puissance | 78 |
| Fig. (III. 25) : Schéma synoptique du contrôle indirect avec boucle de puissance | 79 |
| Fig. (III. 26) : Puissance active statorique | 80 |
| Fig. (III. 27) : Puissance réactive statorique | 80 |
| Fig. (III. 28) : Composantes direct et quadratique du courant statorique | 80 |
| Fig. (III. 29) : Composantes direct et quadratique du courant rotorique | 80 |
| Fig. (III. 30) : Courant d'une phase statorique | 81 |
| Fig. (III. 31) : Courant d'une phase statorique(Zoom) | 81 |
| Fig. (III. 32) : Courant d'une phase rotorique | 81 |
| Fig. (III. 33) : Courant d'une phase rotorique(Zoom) | 81 |
| Fig. (III. 34) : Convertisseur AC-DC triphasé à commutation forcée | 82 |
| Fig. (III. 35) : Schéma bloc du convertisseur coté réseau commandé par MLI à hystérésis | 84 |
| Fig. (III. 36) : Schéma de principe de l'onduleur triphasé | 85 |
| Fig. (III. 37) : Puissance Active statorique | 86 |
| Fig. (III. 38) : Puissance réactive statorique | 87 |
| Fig. (III. 39) : Courant d'une phase statorique | 87 |
| Fig. (III. 40) : Courant d'une phase rotorique | 87 |
| Fig. (III. 41) : vitesse de rotation de la MADA | 88 |
| Fig. (III. 42) : Puissance active statorique | 88 |
| Fig. (III. 43) : Puissance réactive statorique | 89 |
| Fig. (III. 44) : Courant statorique | 89 |
| Fig. (III. 45) : Courant statorique (Zoom 01) | 89 |
| Fig. (III. 46) : Courant statorique (Zoom 02) | 89 |
| Fig. (III. 47) : Courant rotorique | 90 |
| Fig. (III. 48) : Courant rotorique (Zoom 01) | 90 |
| Fig. (III. 49) : Courant rotorique (Zoom 01) | 90 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau (I. 6) : échelle Beaufort | 2 |
| Tableau (II. 1) : Coefficients définissant l'évolution de Cp | 37 |

Introduction
générale

INTRODUCTION GENERALE

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires considérables en énergie électrique. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Pour faire face à ces différents problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. En effet, ces pays se sont engagés, à moyen terme, à augmenter dans leur production d'énergie électrique la part d'énergies d'origine renouvelable (Eolien, solaire, maritime, biosphère)

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans, les systèmes éoliens ne peuvent plus se comporter comme uniquement des générateurs de puissance active dans les réseaux de distribution ou de transport, selon la puissance installée. En effet, ils seront certainement amenés, à court terme, à fournir des services (compensation de la puissance réactive par exemple) comme les alternateurs de centrales classiques.

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 l'unique, 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 (machine synchrone à aimants permanents par exemple). En effet, la MADA permet un fonctionnement sur une plage de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques car ceux-ci sont connectés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique.

Dans la chaîne de conversion électromécanique d'un système éolien, les convertisseurs statiques triphasés sont des éléments essentiels car ils permettent de contrôler les puissances active et réactive injectées sur le réseau électrique en fonction de la vitesse du vent appliqué sur les pales de l'éolienne. La sécurité, la fiabilité, les performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service des systèmes éoliens constituent aujourd'hui des préoccupations majeures pour l'insertion de ces sources d'énergie dans le réseau électrique

Les objectif principal de ce mémoire sont de montrer qu'un système éolien basé sur une MADA peut contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique en compensant la puissance réactive.

La présentation de ce travail est organisée en trois chapitres détaillés comme suit.

Le premier chapitre donne une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure pour en terminer par choisir la structure qui sera étudiées.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et l'optimisation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Pour cela, on va mettre en œuvre la commande MPPT. Puis nous abordons la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle par la simulation sous l'environnement Simulink du logiciel MATLAB.

Dans le dernier chapitre le modèle de la MADA sera soumis aux lois de commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques. Le stator de la MADA sera alimenté par une source de tension triphasée parfaite et le rotor par un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion avec un réglage de courant en hystérésis

Ce mémoire s'achèvera par une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus ainsi que des perspectives à court et à moyen terme pour des futures recherches.

Chapitre I

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

I.1 Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des capteurs éoliens (aéromoteurs) a connu une évolution considérable surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, et leurs structures sont de plus en plus performantes. Nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde et dans l'Algérie, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2 Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moudre le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

En 1890 Paul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant le 20ème siècle et jusqu'au début du 21ème. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes du monde sont de fabrication Hollandaise) [1].

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [27].

I.3 Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

I.3.1 Direction et vitesse du vent

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau. (I.1), [17].

| Degrés Beaufort | Vitesse du vent (m/s) | Vitesse du vent (km/h) | Description générale | Pression sur surface plane (daN/m ²) |
|-----------------|-----------------------|------------------------|----------------------|--|
| 0 | 0 à 0.4 | < 1 | Calme | |
| 3 | 3.5 à 5.5 | 12 à 19 | Petite brise | 3.2 (5 m/s) |
| 4 | 5.5 à 8 | 20 à 28 | Jolie brise | 6.4 (7 m/s) |
| 6 | 11.4 à 13.9 | 39 à 49 | Vent frais | 22 (13 m/s) |
| 8 | 17.4 à 20.4 | 62 à 74 | Coup de vent | 52 (20 m/s) |
| 11 | 28.4 à 32.5 | 103 à 117 | Violente tempête | 117 (30 m/s) |
| 17 | 54.1 à 60 | 202 à 220 | Cyclone | 470 (60 m/s) |

Tableaux. (I. 1) : échelle Beaufort, [17].

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s, [2].

I.4 Situation de l'éolien dans le monde

I.4.1 Systèmes De Conversion Eoliens (SCE)

Le SCE est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur électromécanique. Selon la *figure (I.1)*, il est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin l'injection dans un réseau électrique.

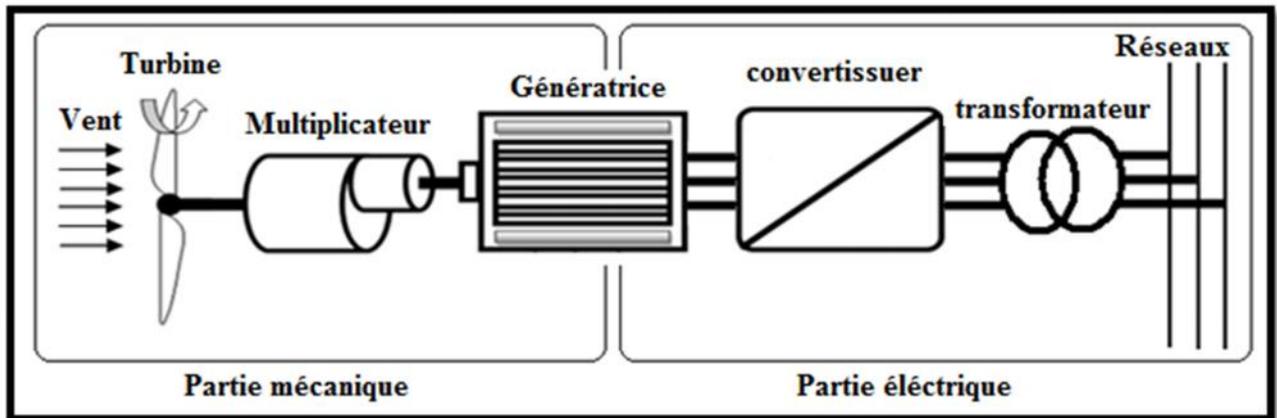


Fig. (I. 1) : Principaux organes du système de conversion éolien

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif, elle est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, [2], [9].

I.4.2 Intérêt des SCEVV par rapport au SCEVF

Face aux problèmes de la source d'énergie aléatoire, deux approches sont possibles (*Figure I.2*) : la génération à vitesse constante (GVC), et la Génération à Vitesse Variable (GVV). Dans le premier cas (GVC) une machine génératrice classique est directement connectée au réseau, et donc la plage de vitesse possible reste limitée aux alentours de la vitesse synchrone, qui est constante et imposée par le réseau, [3].

Pour pouvoir profiter de toute la source d'énergie variable dans le cas de la GVC on doit utiliser un compensateur mécanique qui adapte le rapport de vitesse entre le système physique et l'axe du

générateur en fonction de la disponibilité énergétique du moment. Cette compensation ou adaptation est faite « à la base », en éliminant une partie de l'énergie disponible au prix de la diminution du rendement global du système.

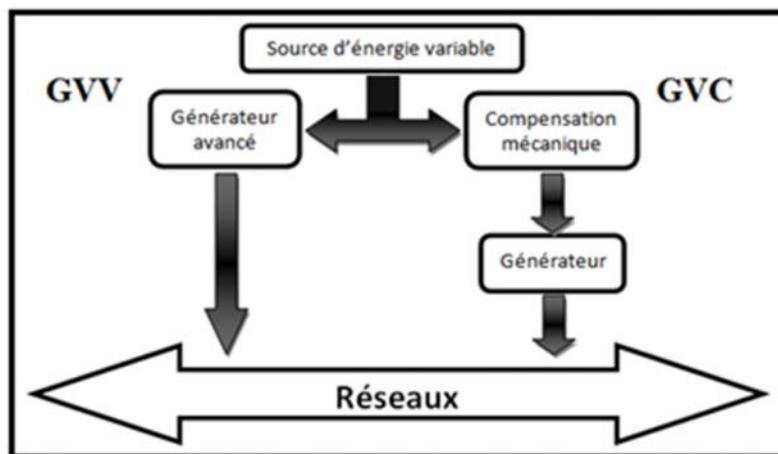


Fig. (I. 2) : Systèmes de conversion éoliens à partir de sources d'énergie variable, [03].

On peut citer deux types de compensation:

- Compensation active: par exemple, la relation de transformation [vitesse rotor, vitesse des pales] [couple axe des pales] dépend de l'angle de confrontation des pales avec le vent, en pouvant obtenir une relation optimale en contrôlant le dit angle.
- Compensation passive : grâce à une conception aérodynamique spécifique des profils des pales on peut changer la partie effective de la pale qui travaille en fonction de la vitesse du vent. La zone utile transmet énergie dans un régime proche de l'optimal.

Mis à part le rendement énergétique, un système de GVC lié à une source d'énergie variable présente d'autres problèmes importants :

- Dégradation de la qualité d'énergie électrique : la réponse temporelle du compensateur mécanique n'est pas assez rapide face aux variations brusques de la source de l'énergie (rafales de vent par exemple), ce qui éloigne momentanément le système de la vitesse du rotor optimale. Ces variations de vitesse non souhaitées induisent des perturbations dans la tension générée, en affectant la qualité de l'énergie électrique du nœud de connexion du parc générateur, [03].
- Stress mécanique : à cause de la lenteur de la réponse du compensateur mécanique, le système générateur peut arriver à supporter des efforts mécaniques au-dessus de ses valeurs maximales, avec un risque de dommage du générateur plus grand.

Le développement de l'électronique de puissance (moins coûteuse et plus performante) a permis l'implantation de systèmes de GVV en proposant des solutions qui éliminent ou réduisent les problèmes de la GVC. Grâce à l'électronique de puissance, la qualité de l'énergie électrique générée est nettement supérieure et les normes de connexion sont aisément respectées, [03].

I.4.3 Energie éolienne en quelques chiffres

I.4.3.1 Capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

En 2010, la capacité mondiale installée a atteint 196 630 MW, après 159 766 MW en 2009, 120 903 MW en 2008 et 93 92 MW en 2007.

Les investissements dans les nouveaux équipements ont diminué dans de nombreux pays du monde. Pour la première fois depuis plus de 20 ans, le marché est inférieur à celui de l'année précédente et a atteint un volume global de 38 642 MW, après 38 312 MW en 2009.

La Chine représente plus de la moitié du marché de 2010. En omettant la Chine, le marché mondial réduit d'un tiers et passe de 24 512 MW en 2010 à 18 714 MW en 2009.

En 2010, un total de 83 pays, un de plus qu'en 2009, utilisent l'énergie éolienne comme moyen de production d'électricité. 52 pays ont accru leur capacité totale installée, pour 49 l'année précédente.

Le chiffre d'affaire mondial du secteur éolien a atteint 40 milliards d'euros (55 milliards de dollars) en 2010, après 50 milliards d'euros (70 milliards de dollars) en 2009. La baisse est due aux prix décroissant des machines et à un déplacement du marché vers la Chine. [10].

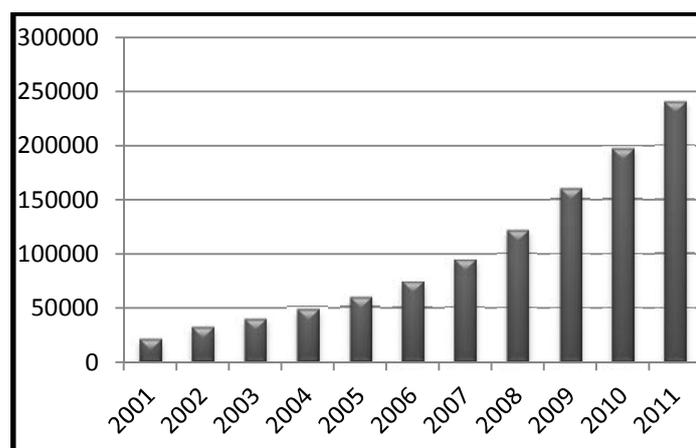


Fig. (I. 3) : Capacité mondiale installée en MW, [10].

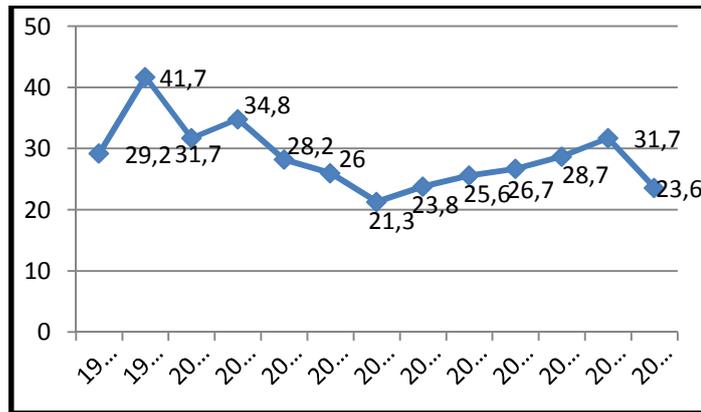


Fig. (I. 4) : Taux de croissance du marché mondial, [10].

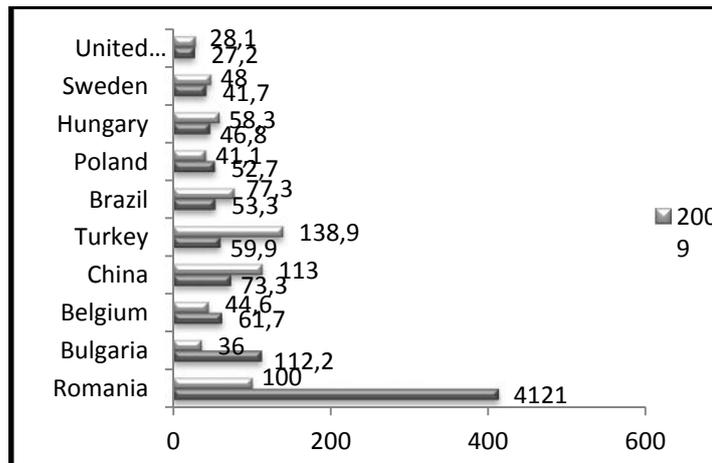


Fig. (I. 5) : Les 10 pays ayant les plus fortes croissances, [10].

I.4.3.2. Répartition au niveau continental

En termes de répartition continentale, l'extension peut être vue ainsi : de manière générale, le foyer du secteur éolien se déplace de l'Europe vers l'Asie et l'Amérique du Nord., [10].

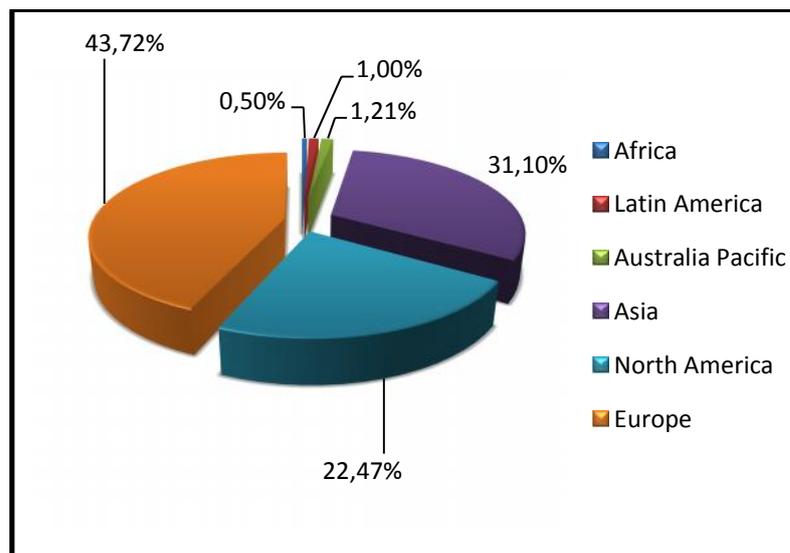


Fig. (I. 6) : Répartition continentale de la capacité totale 2010, [10].

Il y a cinq ans, l'Europe dominait le marché mondial avec 70.7% de la capacité ajoutée et elle est passée en troisième position en 2009. En 2010, l'Europe est repassée en deuxième position et représente 27% des nouvelles installations (27.3% en 2009 et 32.8% en 2008, devant l'Amérique du Nord, passée de 28.4% en 2009 à 16.7% en 2010.

L'Europe représente maintenant nettement moins de la moitié de la capacité totale. Dans les années passées, la part de l'Europe est progressivement passée de 65.5% en 2006 à 43.7% en 2010.

L'Amérique Latine (1.0%, après 1.5% en 2009 et 0.6% en 2008) et l'Afrique (constamment à 0.5% depuis 2008) ne représentent toujours que des parts mineures.

L'Amérique Latine a une part de 1.2% dans les nouvelles installations (1.5% en 2009 et 0.4% en 2008) alors que l'Afrique demeure à 0.4% (0.4% en 2009 et 0.3% en 2008), [10].

I.4.3.3 Capacité de l'énergie éolienne installée en Afrique

L'ensemble des machines installées en Afrique fin 2010 représente un total de 906 MW (0.5 % du total mondial), dont 155 MW ajoutés en 2010 (169 MW en 2009) dans trois pays : Egypte, Maroc et Afrique du Sud.

Bien que l'Afrique soit déjà peu équipée, le taux de croissance de 2010 (20%) reste en dessous de la moyenne mondiale (23.6%).

Avec l'Egypte (550 MW installés) et le Maroc (286 MW), les leaders africains se trouvent en Afrique du Nord. Avec la Tunisie (54 MW), cette région se taille la part du lion du total africain (890 MW pour ces trois pays sur un total de 906 MW), [10].

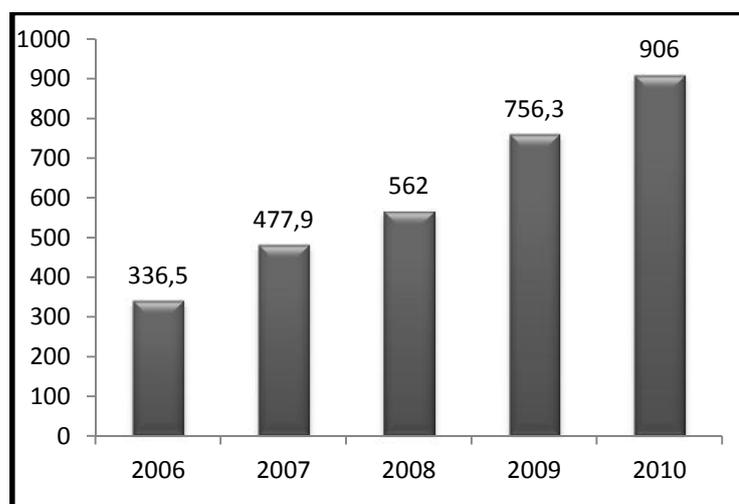


Fig. (I. 7) : Total des installations – Afrique (MW), [10].

I.4.3.4 Energie éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar, [11].

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes:

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- quatre zones en sites sahariens.

Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007, [12].

Les trois régions situées au sud ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an, [12].

La *figure (I.8)* présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne, [13].

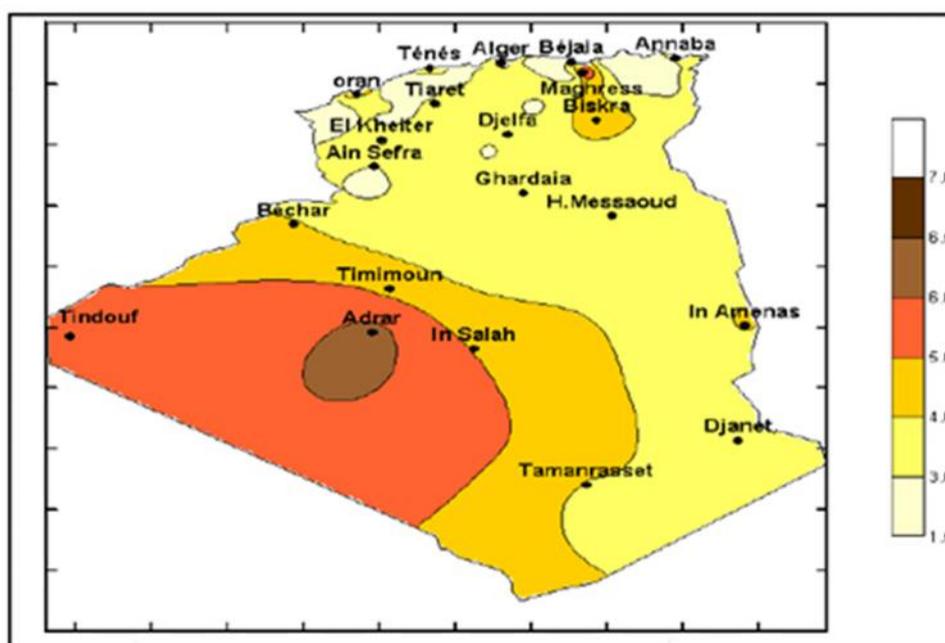


Fig. (I. 8) : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie, [13].

I.4.3.5 Perspectives mondiales

Six faits majeurs auront un impact décisif sur les perspectives à moyen et long termes : [10].

- Le débat en cours sur le changement climatique et les solutions non émissives à identifier.
- La raréfaction des ressources tant fossiles que nucléaires, mise en évidence en particulier par la hausse de prix du pétrole qui représente une charge énorme pour les pays en développement.
- Les dommages causés par l'utilisation des ressources fossiles, mis en évidence par la désastreuse fuite de pétrole du Golfe du Mexique et son impact sur l'économie des Etats-Unis.
- La prise de conscience croissante du danger de l'utilisation de l'énergie nucléaire, récemment accélérée par l'énorme désastre nucléaire de Fukushima, au Japon.
- La prise de conscience croissante du potentiel et des contributions actuelles de l'éolien et des autres énergies renouvelables, comme sources économiquement, socialement et écologiquement durables.
- Les évolutions à venir dans l'éolien et les technologies connexes, comme les énergies de substitution et les technologies de stockage.

Afin d'utiliser le plein potentiel de l'éolien et des autres énergies renouvelables, il sera d'une importance cruciale de renforcer les schémas associés, les institutions et les politiques.

La communauté mondiale autant que les gouvernements nationaux devront mettre en place de nouvelles politiques en faveur de l'éolien. Un effort particulier doit être accordé au déploiement des énergies renouvelables dans les pays dits en voie de développement.

Des incitations pour des productions intégrées et décentralisées d'énergies renouvelables doivent être créées, en particulier encore mais pas uniquement dans les pays en développement, [10].

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages.

Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.5.1 Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [5].
- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace, [5].

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, [3].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se

développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle, [5].

I.5.2 Inconvénients

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

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés, [5].

I.6 Description des systèmes éoliens

I.6.1 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présents sur la *Figure (I.9)*.

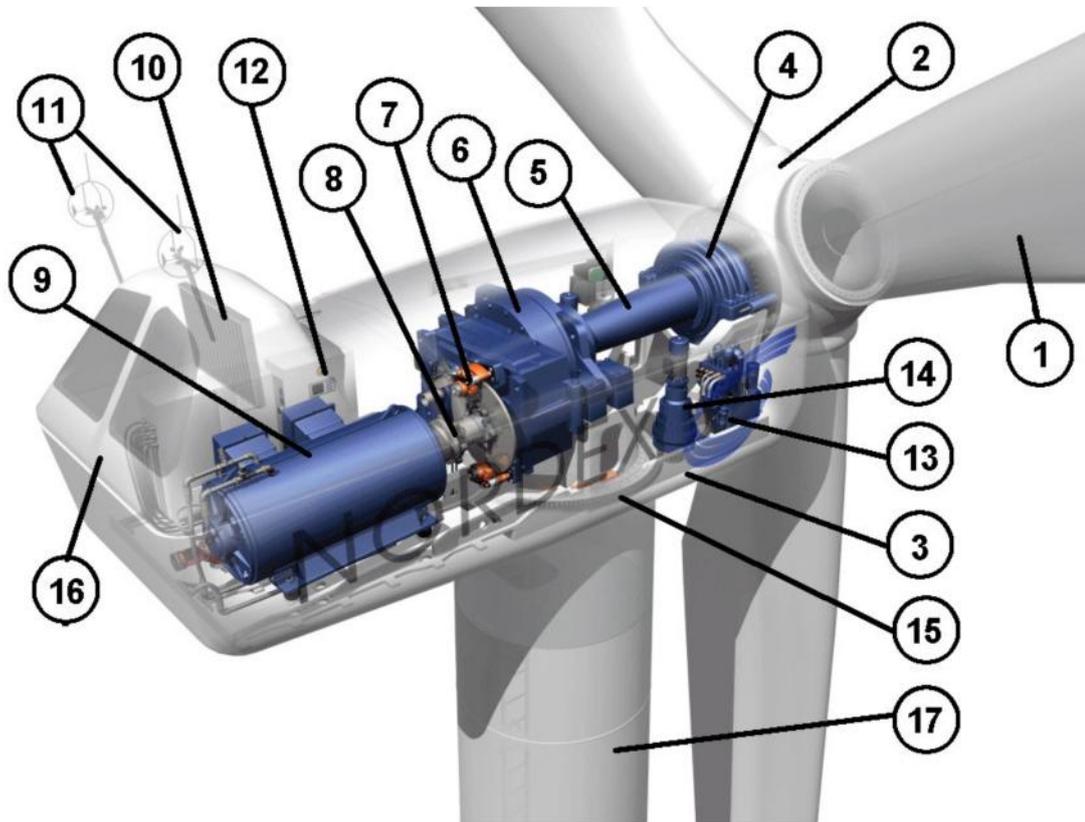


Fig. (I. 9) : Exemple de système éolien, [6].

| N° | Description | N° | Description |
|----|---|----|---|
| 1 | Pales en composite fibre de verre, d'extrémité pivotante | 2 | Moyeu du rotor en fonte |
| 3 | Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud | 4 | Paliers du rotor à double rangée de billes |
| 5 | Arbre lent du rotor en acier haute résistance | 6 | Multiplicateur de vitesse |
| 7 | Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure | 8 | Accouplement avec la génératrice de type flexible |
| 9 | Génératrice asynchrone refroidie à l'eau | 10 | Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur-génératrice |
| 11 | Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmet les signaux au système de contrôle de la turbine | 12 | Système de contrôle surveillance et pilote la turbine |
| 13 | Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation | 14 | Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable |
| 15 | Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque | 16 | Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre |
| 17 | Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles) | | |

I.6.2 Différentes types d'aérogénérateurs

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice:

I.6.2.1 Les turbines éoliennes à axe vertical.

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit, [26].



Fig. (I. 10) : éoliennes à axe verticale, [6].

a) Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelque soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

b) Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.6.2.2 Les turbines éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent, [26].



Fig. (I. 11) : éoliennes à axe horizontale, [6].

a) Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

b) Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales.

I.6.3 Taille des aérogénérateurs

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la *figure (1.12)*. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent, [4]

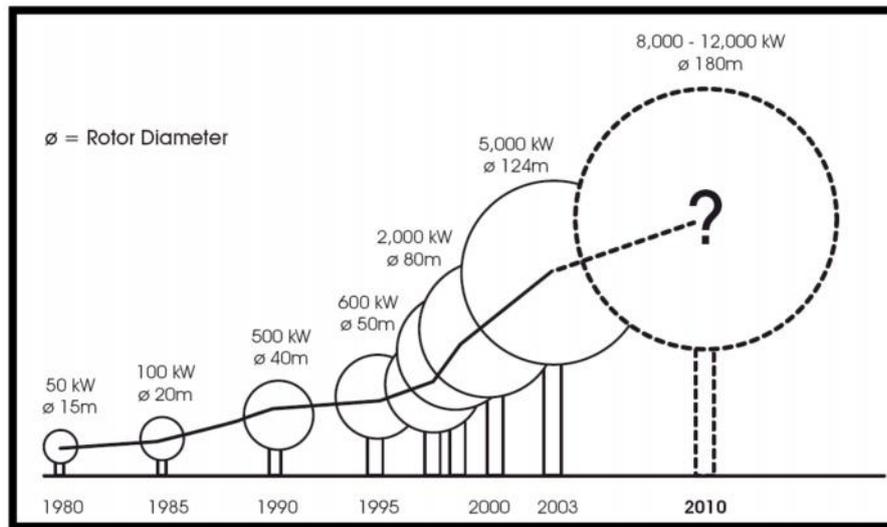


Fig. (I. 2) Taille des hélices en m et puissance en kW, [8].

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5MW, [4].

I.6.4 Limite de Betz

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 ».

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la *Figure (I.13)* sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. Désignant par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit, [20], [4].

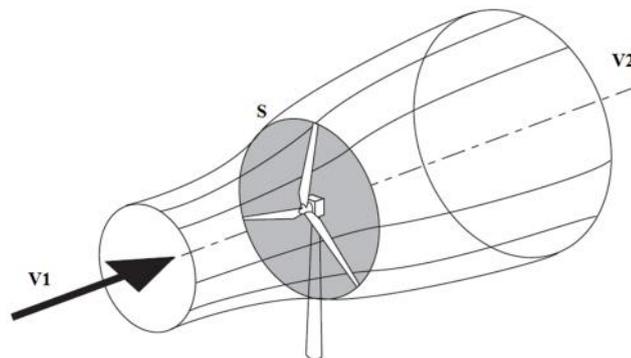


Fig. (I. 3): Tube de courant d'air autour d'une éolienne, [22].

$$S_1.V_1 = S.V = S_2.V_2 \quad (I.1)$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \dots S_1.V.(V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'ou la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F.V = \dots S_1.V^2.(V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \dots S_1.V.(V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \dots S_1.V^2.(V_1 - V_2) \quad (I.4)$$

On en déduit:
$$V = (V_1 + V_2) / 2 \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations 1.2 et 1.3 on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \dots S.(V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \dots S.(V_1^2 - V_2^2).(V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \dots S.V_1^3 \quad (I.8)$$

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

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2}).(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} = C_p \quad (I.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.9), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{aero}}{P_{mt}}$ appelé coefficient de puissance C_p présente un maximum pour $\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{27}$ qui égale à 0,59.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

I.6.5 Caractéristiques de la turbine éolienne

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la *Figure (I.14)* les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de

puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple, [2].

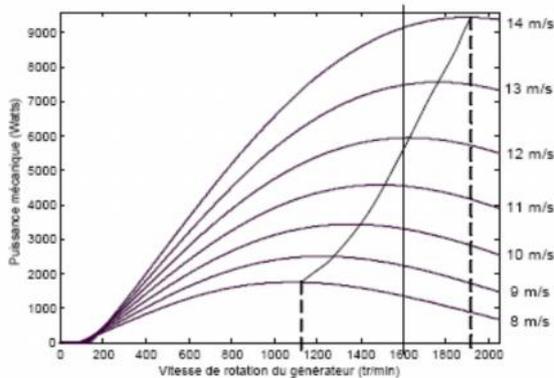


Fig. (I. 14) : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné, [2].

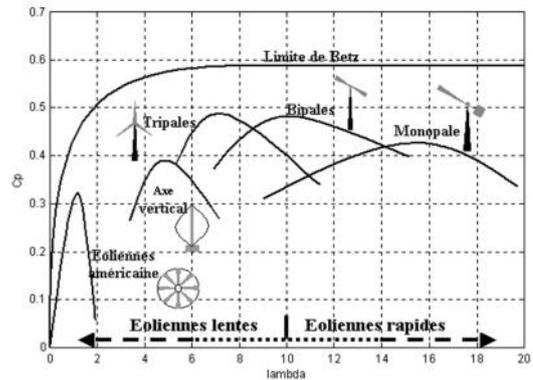


Fig. (I. 15) : Courbe caractéristiques des aérogénérateurs, [2].

Le graphique de la Figure (I.15) donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance Figure (I.15) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance Figure (I.15) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s, [2].

I.6.6 Efforts sur une pale

La figure (I.16) illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse V . Du fait de la rotation, la pale est soumise en plus du vent incident de vitesse V , à un vent relatif U dirigé dans le sens contraire de rotation de la turbine. La vitesse de ce vent relatif est donnée par :

$$U = r \cdot \Omega_T \tag{I.10}$$

r est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en m .

Ω_T est la vitesse de rotation de la turbine en rd/s .

La composition de vitesses de ces deux vents, incident V et relatif U donne la vitesse du vent réel V_{rel} au quel est soumise la pale.

$$\vec{V}_{rel} = \vec{V} + \vec{U} \quad (I.11)$$

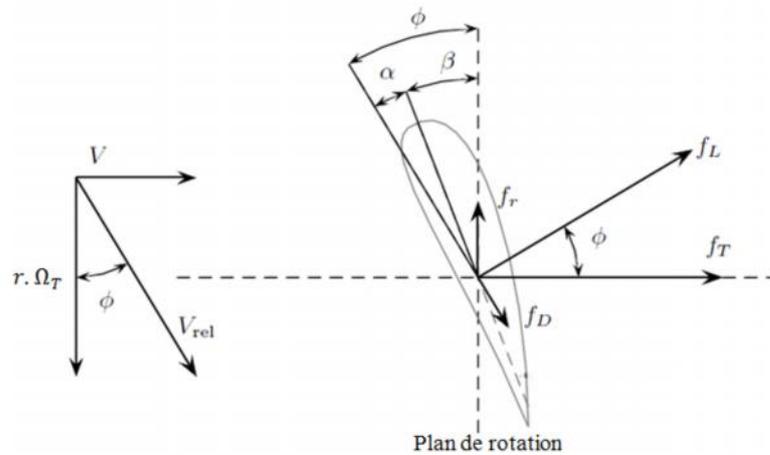


Fig. (I. 5) : Efforts sur un élément d'une pale, [26].

L'écoulement d'air crée une différence de pression en dessus et en dessous de la pale qui aura comme conséquence deux forces, l'une perpendiculaire à la direction du vent réel appelée la portance f_L et l'autre dans le même sens que V_{rel} appelée la trainée. Ces deux forces sont généralement exprimées en fonction du coefficient de portance C_L et du coefficient de trainée C_D , [20].

$$f_l = \frac{\rho \cdot dA}{2} V_{rel}^2 \cdot C_L(r) \quad (I. 12)$$

$$f_t = \frac{\rho \cdot dA}{2} V_{rel}^2 \cdot C_D(r) \quad (I. 13)$$

ρ : Densité de l'air.

A : Surface balié par le rotor de la turbine.

C_D , C_L : Coefficient de trainée et coefficient de portance respectivement.

La résultante de ces deux forces peut être décomposée en une composante axiale et une autre tangentielle. La composante axiale par unité de longueur est donnée par :

$$f_T = \frac{\rho \cdot dA}{2} V_{rel}^2 \cdot [C_L(r) \cos(w) + C_D(r) \sin(w)] \quad (I.14)$$

Cette force doit être supportée par le rotor, la tour et les fondations. D'une autre part, la force tangentielle développe un couple de rotation qui produit le travail utile. Ce couple par unité de longueur est donné par :

$$f_T = \frac{\rho \cdot dA}{2} V_{rel}^2 \cdot r \cdot [C_L(r) \sin(w) + C_D(r) \cos(w)] \quad (I.15)$$

Seule la portance contribue à la génération du couple utile, la trainée crée plutôt un couple dans le sens inverse. Par conséquent, un rapport élevé entre la portance et la trainée C_L/C_D est fortement conseillé pour avoir un bon rendement de la turbine, [20].

I.6.7 Modes de régulation

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse. Les méthodes précédemment citées sont expliquées dans ce qui suit :

I.6.7.1 Système à décrochage aérodynamique « stall »

C'est le système le plus simple et le moins coûteux car il se base sur le principe de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est-à-dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (*Figure I.17*) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation, [22].

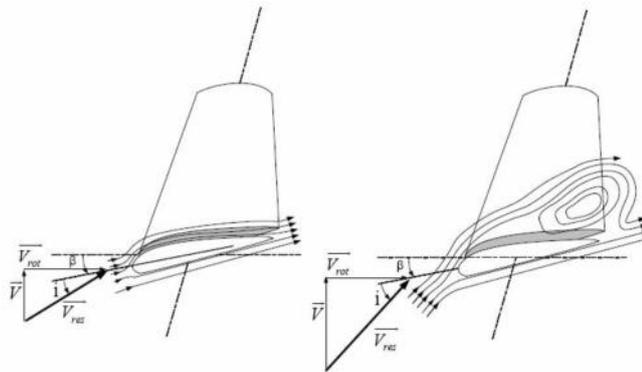


Fig. (I.17) : Flux d'air sur un profil de pale « stall », [YB 08].

I.6.7.2 Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage *Figure (I.18)* ce qui diminue la valeur du coefficient de puissance d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur. , [22].

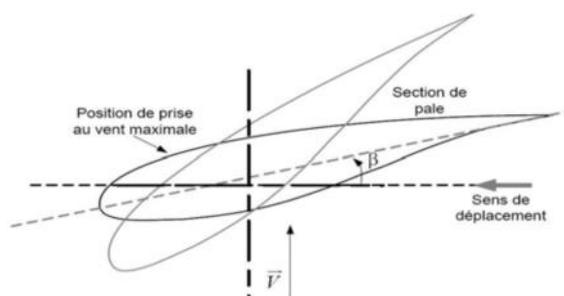


Fig. (I.18) : Système d'orientation des pales « Pitch », [22].

I.7 Multiplicateur de vitesse

Suivant la nature du convertisseur électromécanique et la taille de la turbine éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse dont le rôle principale est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de convertisseur électromécanique. Des problèmes de vibrations, de bruit et de couts de maintenance sont liés à la présence de ces boîtes des vitesses, [14].

La boîte de vitesses est un composant important dans la chaîne de puissance d'une turbine éolienne. La vitesse de rotation d'une turbine éolienne typique est de l'ordre de quelques tours/mn à quelques centaines de tours/mn selon ses dimensions alors que la vitesse optimale d'un générateur conventionnel se situe entre 800 et 3600 tours/mn. En conséquence, une boîte de vitesses élévatrice est habituellement nécessaire pour adapter les deux vitesses de rotation.

La boîte de vitesses d'une turbine éolienne doit être extrêmement robuste. L'idéal serait que le générateur électrique puisse aussi fonctionner à vitesse variable comme celle du vent. Cette approche implique toutefois un convertisseur électronique pour adapter la fréquence de fonctionnement du générateur à celle du réseau. Le surcoût n'est pas négligeable.

Dans les turbines de taille moyenne et grande, la relation de vitesses désirée est obtenue par l'introduction d'un système d'engrenage à 2 ou 3 étages. Si un rapport plus élevé est nécessaire, un ensemble d'engrenages dans un autre arbre intermédiaire peut s'introduire dans le système. Néanmoins, le rapport entre un ensemble d'engrenages est contraint normalement à 1:6. De plus, les engrenages épicycloïdaux peuvent transmettre de manière fiable des grandes charges. De nos jours, des boîtes à haute performance avec des rapports de 1:100 et plus sont utilisées sur les grands générateurs, [15].

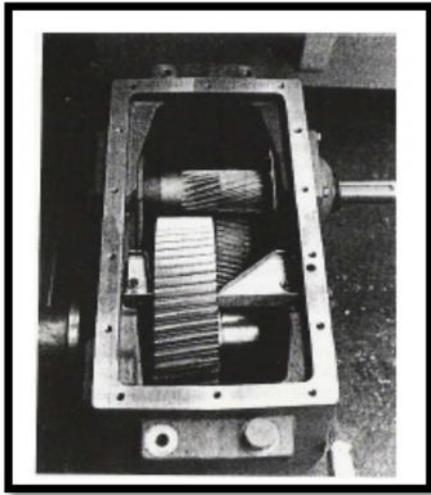


Fig. (I. 19) : Boîte de vitesse de deux arbres parallèles pour une éolienne de 200 à 500 kW, [15].

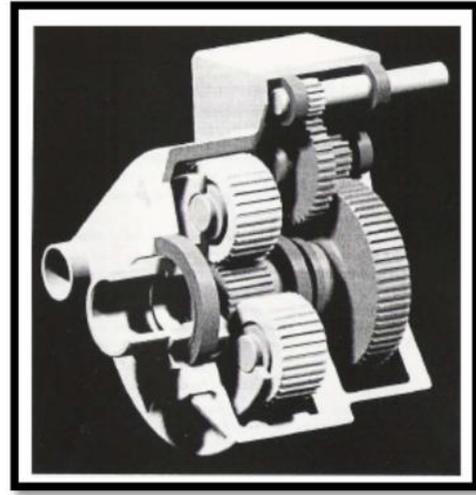


Fig. (I. 20) : Boîte de vitesse standard pour les grandes turbines éoliennes, [15].

La suppression de la boîte de vitesses améliore la fiabilité et la continuité du service, les inconvénients de cette solution ne doivent pas être négligés. Pour le cas des grandes éoliennes, le générateur est de conception complexe spécialement dédiée à cette application et ses poids et diamètre élevés impliquent un poids total supérieur aux conceptions conventionnelles, [15].

I.8 Générateurs utilisés dans le SCE

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'énergie électrique. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique, [15], [5], [2].

I.8.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.8.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE)

La machine asynchrone à cage d'écureuil en fonctionnement génératrice équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité).

Les machines asynchrones à cage sont connues par leur construction extrêmement simple, leurs robustesse, leurs sécurité de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant

sur des bagues ainsi leur coût très compétitif. Elles ont aussi l'avantage d'être fabriquées en grande quantité et dans une très grande quantité d'échelle des puissances, moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la *Figure (I.21)*, [2].

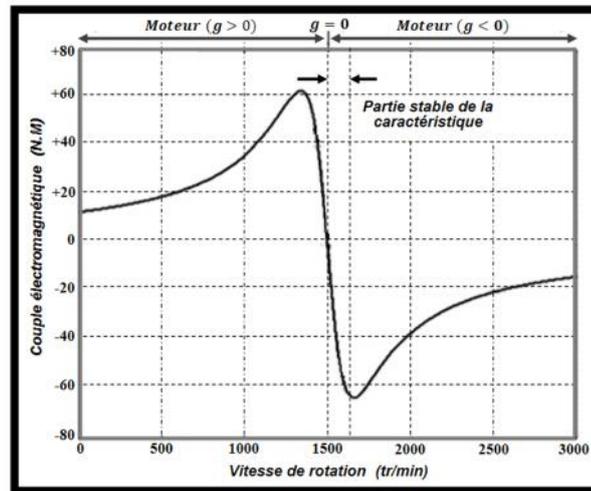


Fig. (I. 21): Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles, [2].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min.

La *Figure (I.22)* représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage. La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Nous remarquons l'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, qui ont pour objectif de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie, [2].

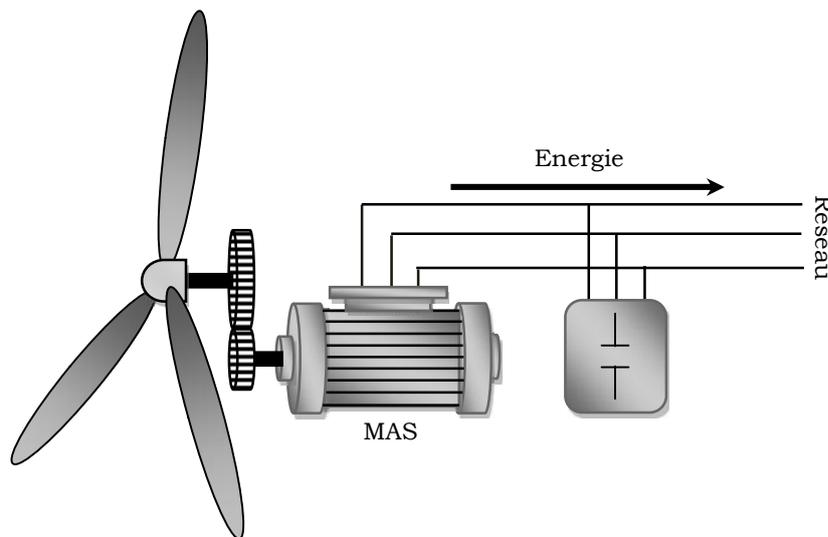


Fig. (I. 22) : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau, [11].

Par contre, dans cette configuration :

- il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor.
- elle ne permet pas une vitesse variable.
- le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du Couple.
- elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs.

I.8.1.2 Générateur asynchrone à double stator

Pour exploiter plus d'énergie de vent par le dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator *Figure (I.23)* :

Cette machine présente deux enroulements au stator, l'un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l'autre de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents.

Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [2].

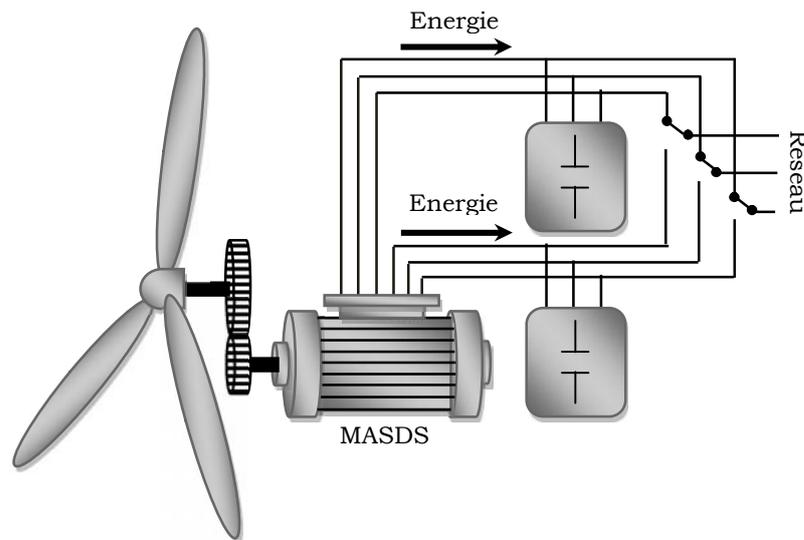


Fig. (I. 23) : Générateur asynchrone à double stator, [11].

I.8.1.3 MACE connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance

Cette configuration est présentée dans la figure suivante *Figure (I.24)*. Elle est composée d'une machine asynchrone à cage avec un seul stator, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine. Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator, [16].

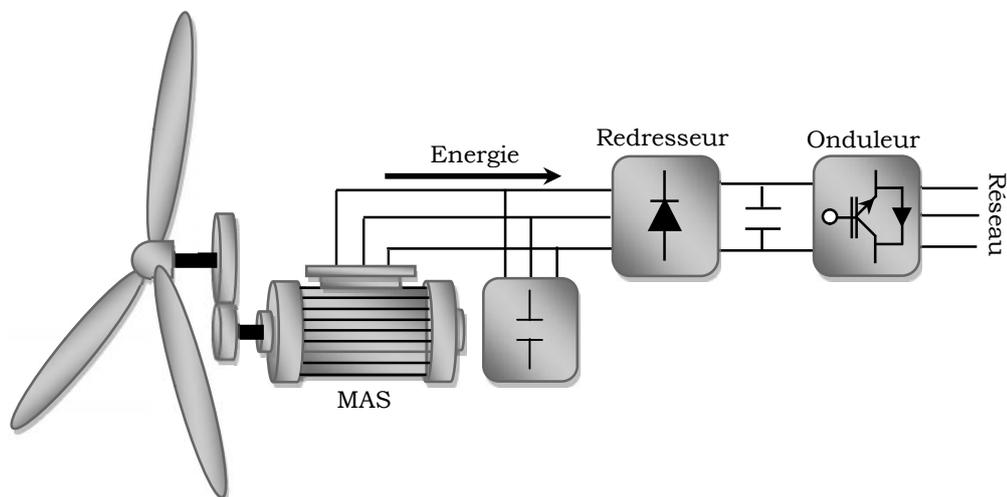


Fig. (I. 24) : Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau, [11].

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent, et la commande MLI vectorielle de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor.

Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne.

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (*Figure I.25*) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent (*Figure I.22*).

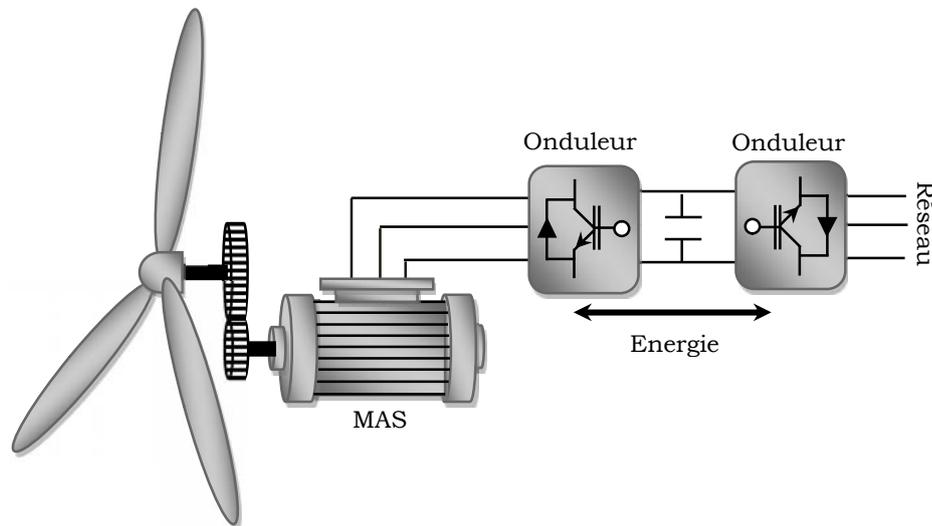


Fig. (I. 25) : Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs, [11].

Néanmoins, ces deux solutions présentent plusieurs inconvénients : l'augmentation considérable du coût et la complexité de mise en œuvre [2].

Ces deux configurations ne sont pas beaucoup appliquées en pratique, pour les inconvénients cités ci-dessus. En plus, la puissance réelle extraite est beaucoup plus faible à cause de l'association du multiplicateur, la génératrice et les convertisseurs.

I.8.2 Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (*Figure I.26*). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor, [2], [3], [15], [4].

Si, par exemple, on a prévu une plage de variation de vitesse de $\pm 30\%$ autour du synchronisme, il faudra choisir un convertisseur d'une puissance quatre fois inférieure à la puissance nominale de

génération (la plage de vitesses utiles de la MADA se situe dans une plage de 25% à 50% de la vitesse nominale), [3], [2].

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage), [POZ 03].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines, [1].

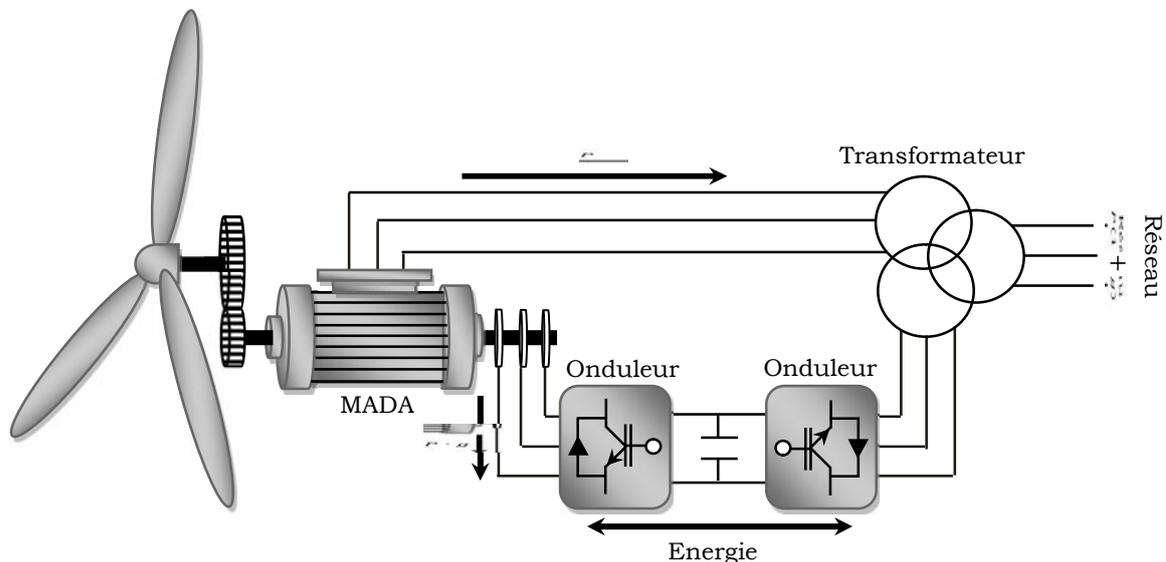


Fig.(I. 26) : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor, [11].

Le résumé des points forts de la MADA sont, [15]. :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur

augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

I.8.2.1 Différentes structures d'alimentation de la MADA

a) Machine asynchrone à double alimentation à dissipation d'énergie rotorique

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la *Figure (I.27)*, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone (*figure I.21*). Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur, [2].

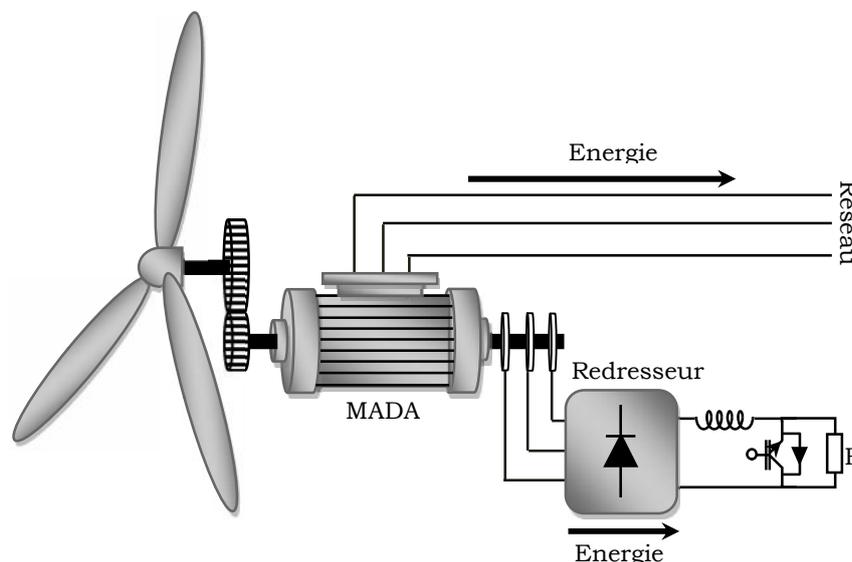


Fig. (I. 27) : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée, [11].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%, [2].

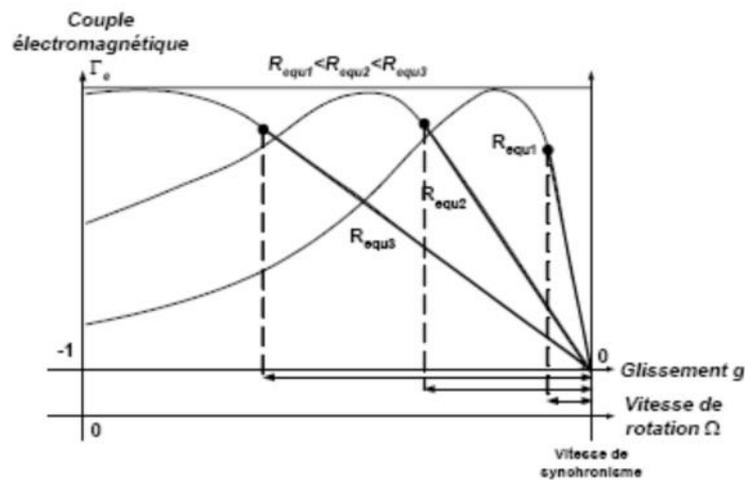


Fig. (I. 28) : Effet de variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique, [2].

Pour améliorer le rendement de ce système, on récupère la puissance perdue par effet joule au niveau de la résistance en utilisant un convertisseur qui va permettre renvoyer la puissance récupérée vers le réseau électrique. Alors que le convertisseur est dimensionné selon la puissance que nous avons récupérée, (soit environ 25% de la puissance nominal) pour obtenir un glissement maximal et donc la puissance statorique nominal. C'est un compromis qui mène à une meilleure capture de l'énergie éolienne et à une faible fluctuation de la puissance du côté du réseau. Puisque le convertisseur statique doit seulement traiter la puissance de glissement à faible communication, dans ce cas, les enroulements du stator sont directement connectés au réseau. Deux options de convertisseur au rotor sont alors utilisées. Dans la première un convertisseur ou la méthode Scherbius réalisant les régimes hypo/hyper synchrones. Ce cas favorise le fonctionnement à couple constant. Dans la seconde option, un convertisseur à deux étages unidirectionnel est utilisé ou qui est appelé méthode Kramer ou régime hyper synchrone [7].

b) Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but d'augmenter le rendement de la structure du système précédent, on remplacera le hacheur et la résistance par un onduleur qui va permettre de renvoyer l'énergie de glissement vers le réseau. (Structure de Kramer, Figure (I.29)).

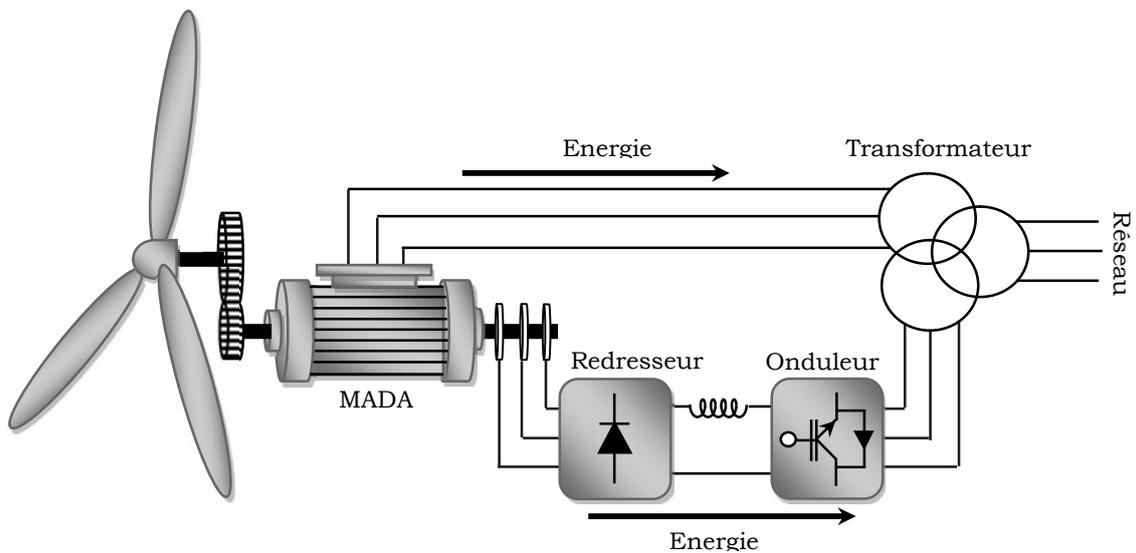


Fig. (I. 29): MADA, structure Kramer, [11].

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. Le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT, [2].

c) Machine asynchrone à double alimentation avec cycloconvertisseur.

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, (Figure I.30), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius.

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Kramer. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

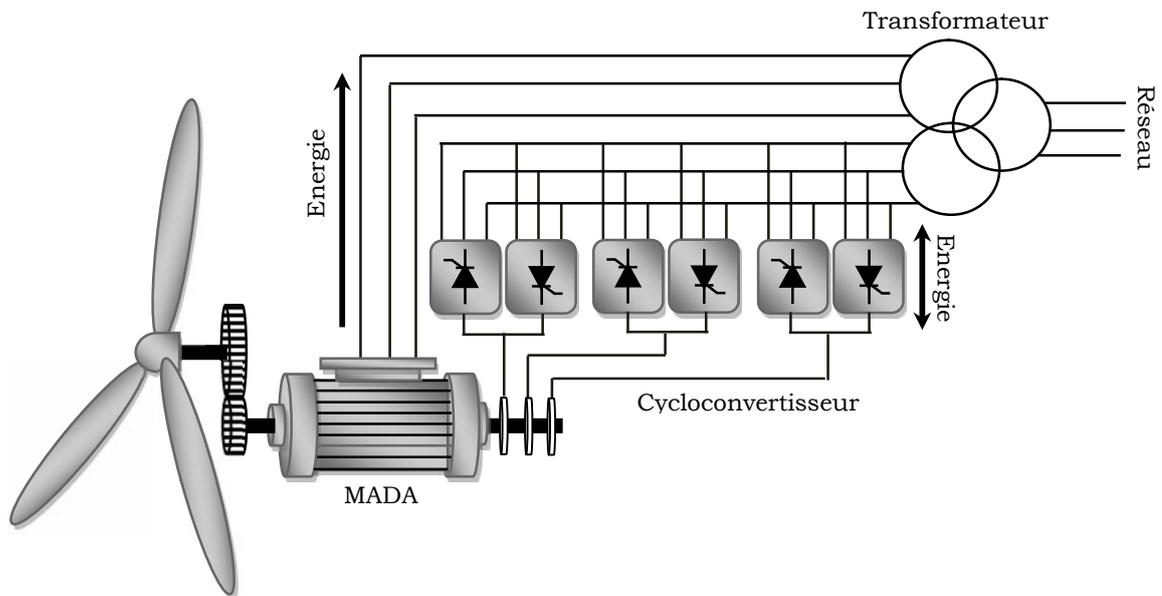


Fig. (I. 30) : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur, [11].

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (*Figure I.30*). Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI, [2].

d) Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius

Une autre structure (*figure I.31*) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées), [16], [2].

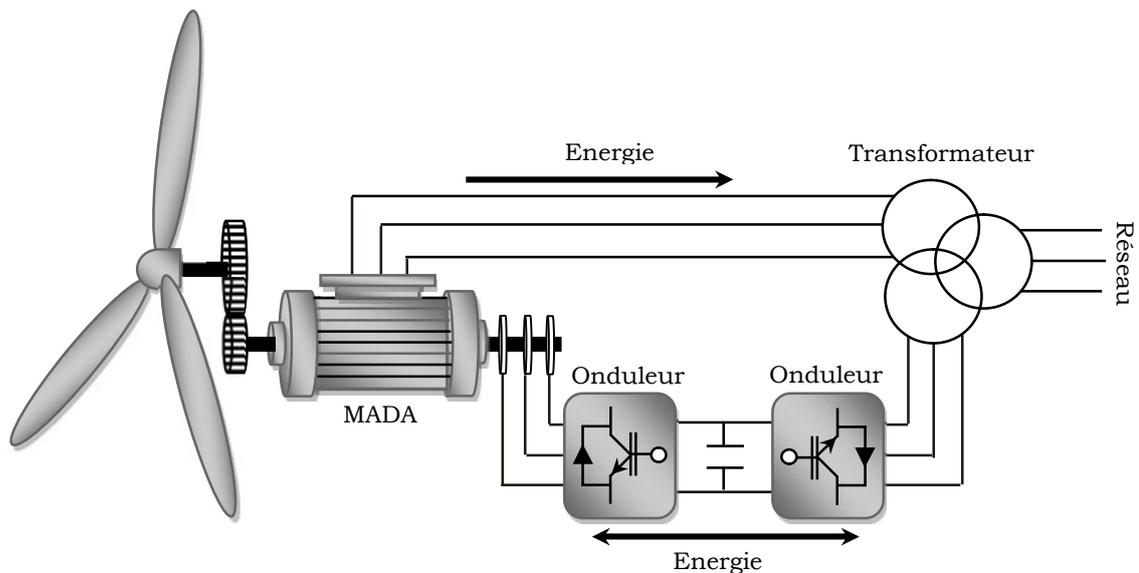


Fig. (I.31) : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI, [11].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau.

Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle, la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité, [16], [2].

I.8.3 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (*Figure I.32*), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [15], [5].

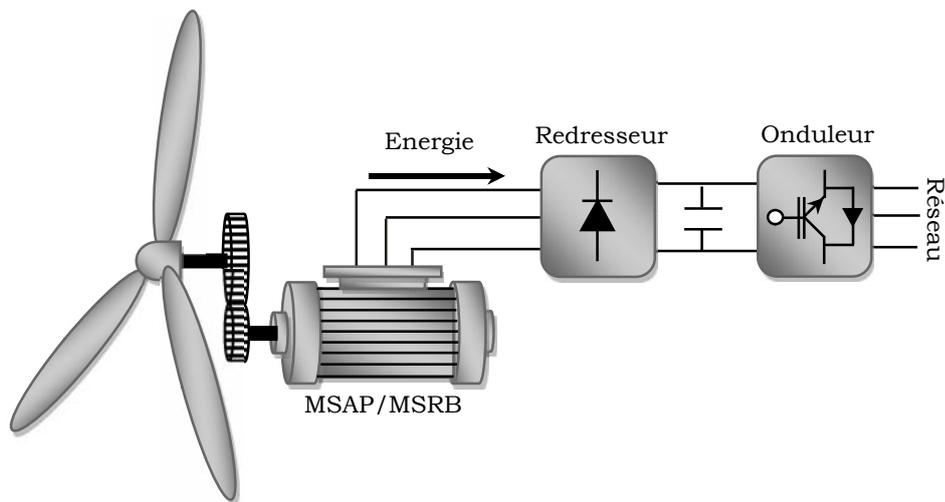


Fig. (I. 32): système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable, [11].

a) Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le MSRB tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système. [15].

b) Générateur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif, [15].

I.8.4 Autres Architectures

On observe actuellement l'émergence d'architectures particulières qui dérivent des génératrices classiques (synchrone ou asynchrone). Parmi ces nouvelles architectures, on pourra citer la génératrice asynchrone à double alimentation en cascade, la génératrice asynchrone à cage à double alimentation statorique, génératrice asynchrone à double alimentation en cascade avec l'un de deux machines à double étoile, la génératrice synchrone à aimants permanents discoïdes et la génératrice à réluctance variable.

I.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de jeter un coup d'œil sur les solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Plusieurs types de machines ont été présentés : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale.

Le dispositif de la *Figure (I.31)* basé sur la machine asynchrone à double alimentation présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Cette structure sera étudiée dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Modélisation du système éolien

II.1.Introduction

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était l'exploit de la puissance et de la vitesse de rotation pour générer de l'énergie électrique. De nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de taille et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués. De plus, on s'est attendu à ce que les systèmes de commande pas simplement gardent la turbine dans sa zone de fonctionnement sûre, mais également améliorer l'efficacité et la qualité de conversion d'énergie ce qui demande une modélisation plus précise et plus exigeante.

Dans ce chapitre, nous commençons par la modélisation de la source primaire, le vent, en essayant d'être le plus proche de la réalité, puis les différentes parties mécaniques de l'éolienne seront aussi modélisées sous certaines hypothèses simplificatrices. Ensuite, la modélisation de la machine concernée ainsi que la simulation seront illustrées dans le reste de ce document.

II.2.Source primaire : le vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs (obstacles).

Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes, ...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesses [21].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, [21], [28], [23], [24]. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent.

II.2.1.Expression du vent en un point fixe

La vitesse du vent en un point $v_0(t)$ peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne V (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations $v_l(t)$:

$$v_0(t) = V + v_t(t) \quad (\text{II.1})$$

V : Vitesse moyenne du vent.

$v_t(t)$: Composante représentant la turbulence du vent.

La composante représentant la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par l'échelle de longueur L_v et l'écart type g_v de cette turbulence. La définition de la composante turbulente se fait en 2 étapes :

1ère étape : Reconstitution du spectre de la turbulence à partir d'un bruit blanc filtré

Deux filtres largement utilisés sont le filtre de Von Karman et celui de Kaimal, [21], [23], le filtre de Von Karman peut être approché sous la forme suivante, [25]:

$$W_v(s) = \frac{K_v \cdot (m_1 \cdot T_v \cdot s + 1)}{(1 + T_v \cdot s) \cdot (1 + m_2 \cdot T_v \cdot s)} \quad (\text{II.2})$$

Avec : $m_1 = 0.4$ et $m_2 = 0.25$.

$$K_v = \sqrt{2 \cdot T_v \cdot (1 - m_2) \cdot \left(\frac{m_1^2}{m_2} - m_2 + 1 - m_1^2\right)^{-1}} \quad (\text{II.3})$$

$$T_v = L_v / V \quad (\text{II.4})$$

2ème étape : Définition de l'écart type de la turbulence g_v

L'écart type dépend de la vitesse moyenne V et d'un coefficient Kg , qui dépend de la nature du terrain, et qui représente l'intensité de la turbulence.

$$g_v = Kg * V \quad (\text{II.5})$$

Kg : Le coefficient l'intensité de la turbulence.

A partir d'un bruit blanc en entrée, il est possible de déterminer la composante de la turbulence et donc de générer une série temporelle de la vitesse du vent en un point $v_0(t)$ comme présenté sur la figure (II.1).

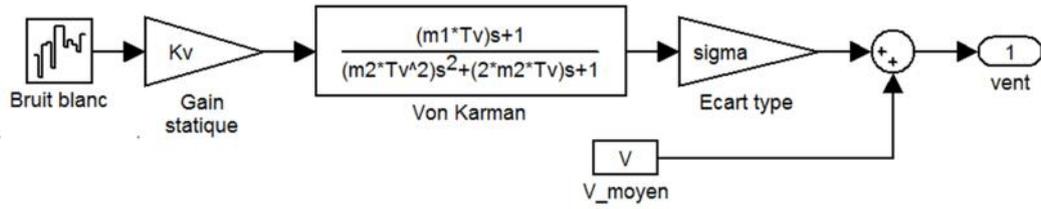


Fig. (II. 1) : Construction de la vitesse de vent en un point

La figure II.2 montre l'évolution de la vitesse du vent dans le temps.

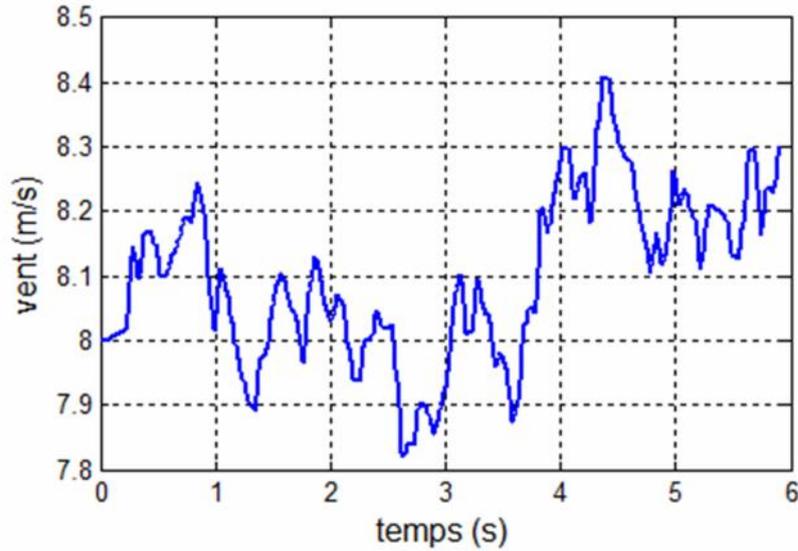


Fig. (II. 2) : Profile du vent ($K_v=5$, $L_v=125$, $K_g=0.13$).

II.2.2. Conversion aérodynamique

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent, elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_T :

$$P_t = C_p \cdot P_{amont} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p \tag{II.6}$$

C_p : Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.

R_T : Le rayon des pales de la turbine.

C_p coefficient, dont la limite théorique égalé à $16/27=0.593$ (limite de Betz), dépend de deux paramètres :

- La vitesse spécifique λ

$$\lambda = \frac{R_T \cdot \Omega_T}{V} \tag{II.7}$$

- L'angle de calage des pales β

On en déduit aisément l'expression du couple éolien à partir de l'équation (II.6)

$$T_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot f \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \tag{II.8}$$

D'où on définit le coefficient du couple par l'expression suivante :

$$C_T = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \tag{II.9}$$

II.2.3. Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient $C_p(\lambda, \beta)$, puisqu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine. Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature [19], [9], [22], ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [29] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \cdot \frac{1}{\lambda} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda}} + C_6 \cdot \beta \tag{II.10}$$

Avec :
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\beta + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

| Coefficient | Valeur |
|-------------|--------|
| C_1 | 0.5176 |
| C_2 | 116 |
| C_3 | 0.4 |
| C_4 | 5 |
| C_5 | 21 |
| C_6 | 0.0068 |

Tableau (II. 1) : Coefficients définissant l'évolution de C_p , [9]

On a implanté l'équation (II.10) sous Matlab/simulink pour plusieurs valeurs de β et on a trouvé les courbes de la figure suivante :

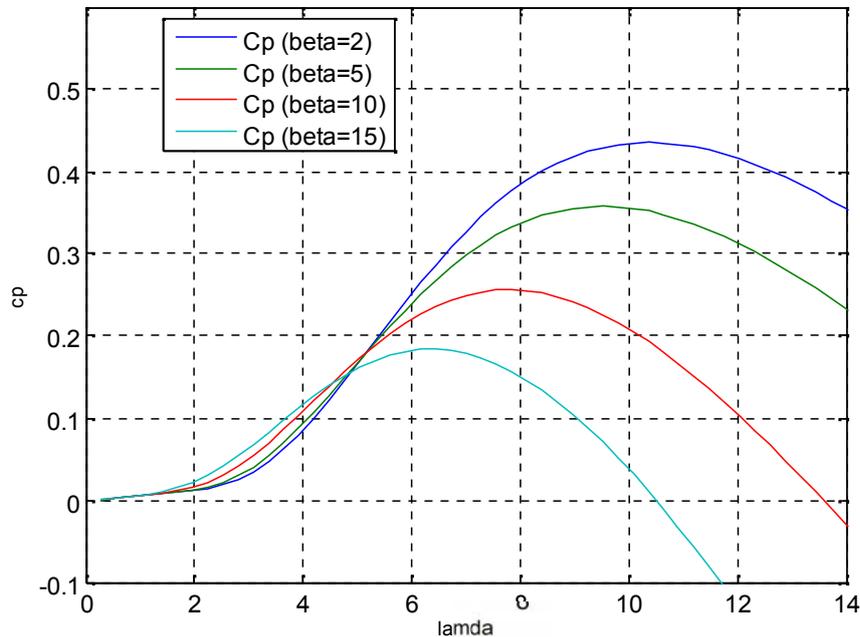


Fig. (II. 3) : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β .

II.3.Modélisation de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation ω_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure II.4 dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée, [18].

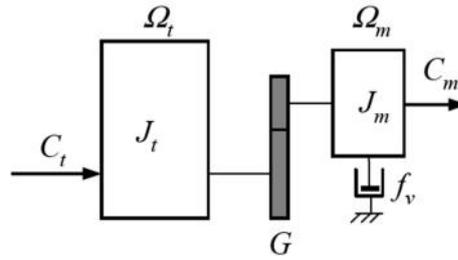


Fig. (II.4): Modèle mécanique de la turbine éolienne, [18].

Avec :

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes : [18].

$$C_m = \frac{C_t}{G} \tag{II.11}$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \tag{II.12}$$

D'après la Figure (II.4), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} - J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \tag{II.13}$$

Le schéma bloc de la Figure (II.5) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation ω_m de la MADA, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la MADA. La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

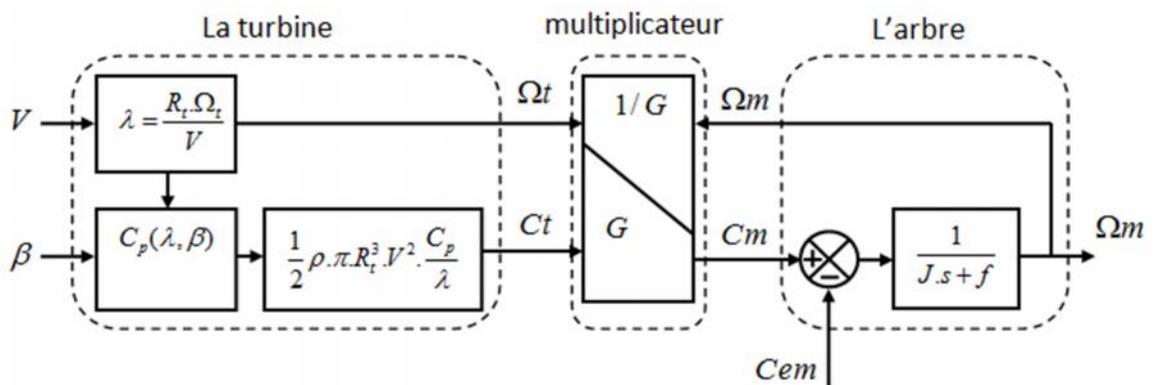


Fig. (II.5): Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3.1.Extraction du maximum de la puissance du vent

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la Figure (II.6), [2], [18].

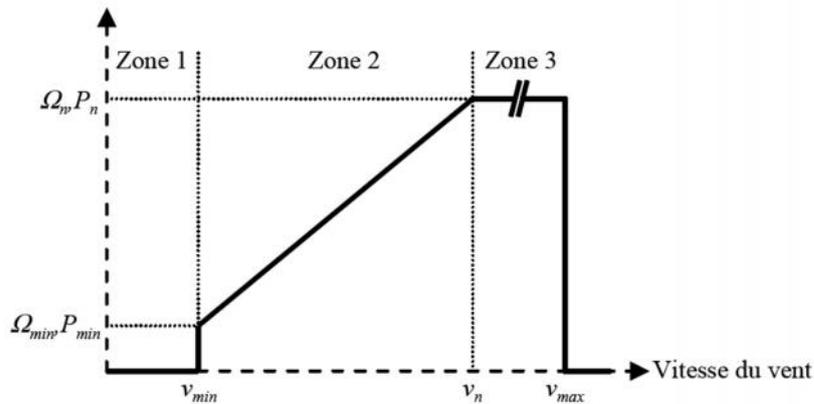


Fig. (II.6): Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

- Zone 1 : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro,
- Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale V_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale V_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation ω_n .
- Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale V_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales est constant.

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la

puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). On peut distinguer deux modes de contrôle [18] :

- Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation,
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la MADA et sa commande sont idéales : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la MADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

II.3.2. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

La première méthode de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la MADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence.

Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué, comme le montre la Figure (II.7).

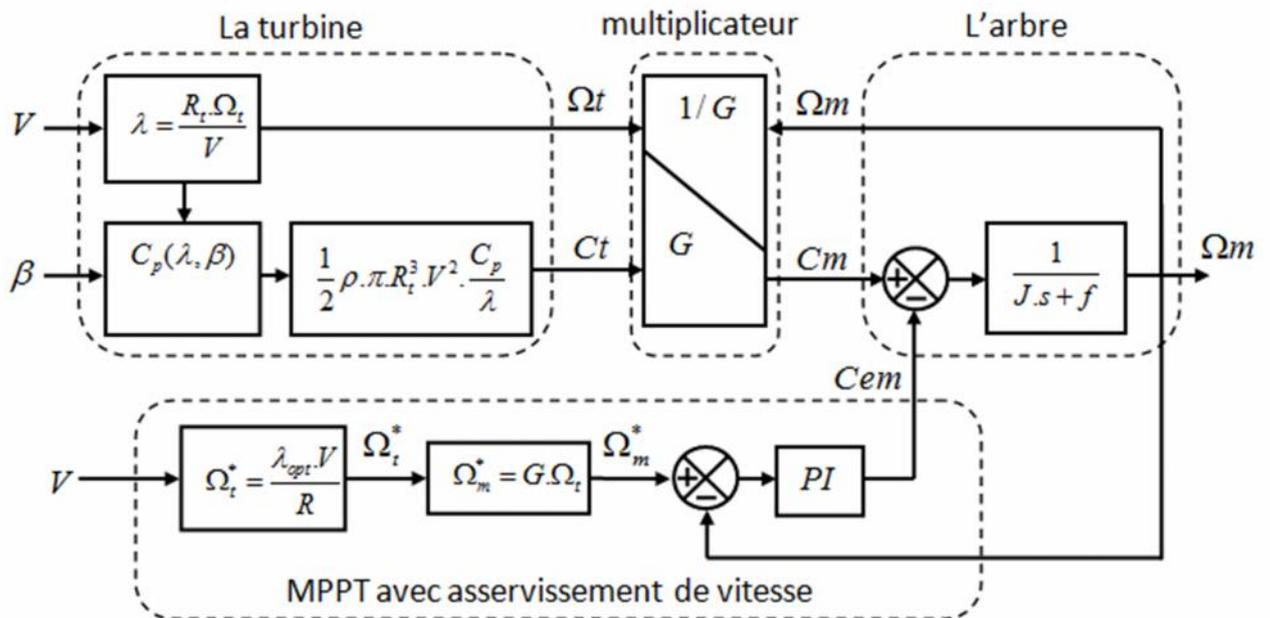


Fig. (II.7): Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Le couple électromagnétique de référence C_{em} permettant d'obtenir une vitesse de rotation Ω_m égale à sa valeur de référence Ω_m^* est obtenu en sortie du régulateur de vitesse ("Reg" sur la

Figure (II.7)). Ce régulateur, de type Proportionnel Intégral (PI), permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple mécanique C_m considéré comme une perturbation.

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient C_p . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} (pour β constant), comme le montre la Figure (II.8).

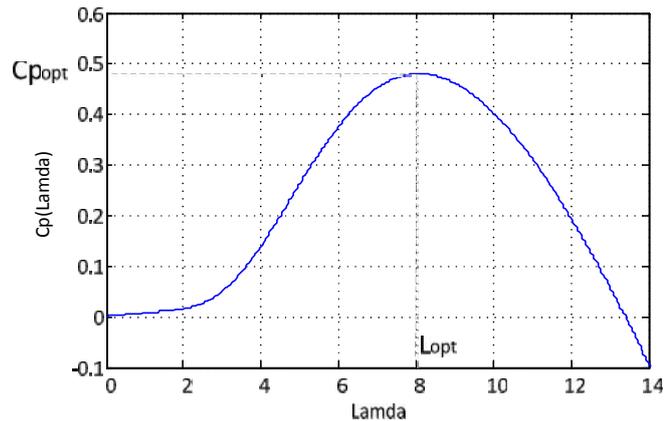


Fig. (II.8): Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$

La vitesse de rotation de référence de la turbine Ω_t^* est obtenue définie par :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (II.14)$$

Nous en déduisons la référence de vitesse de rotation de la MADA en prenant en compte le gain du multiplicateur par :

$$\Omega_m^* = G \cdot \Omega_t^* \quad (II.15)$$

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation. Ce mode de contrôle est représenté à la section suivante. Il sera retenu dans la suite de nos travaux.

II.3.3. Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

Ce mode de contrôle repose sur l’hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d’accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l’équation (II.13), nous pouvons écrire :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} - J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} = 0 \tag{II.16}$$

De plus, si l’on néglige l’effet du couple dû aux frottements visqueux ($f_v \cdot \Omega_m = 0$) par rapport au couple mécanique C_m , on peut alors écrire :

$$C_m = C_{em} \tag{II.17}$$

La Figure (II.9) présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

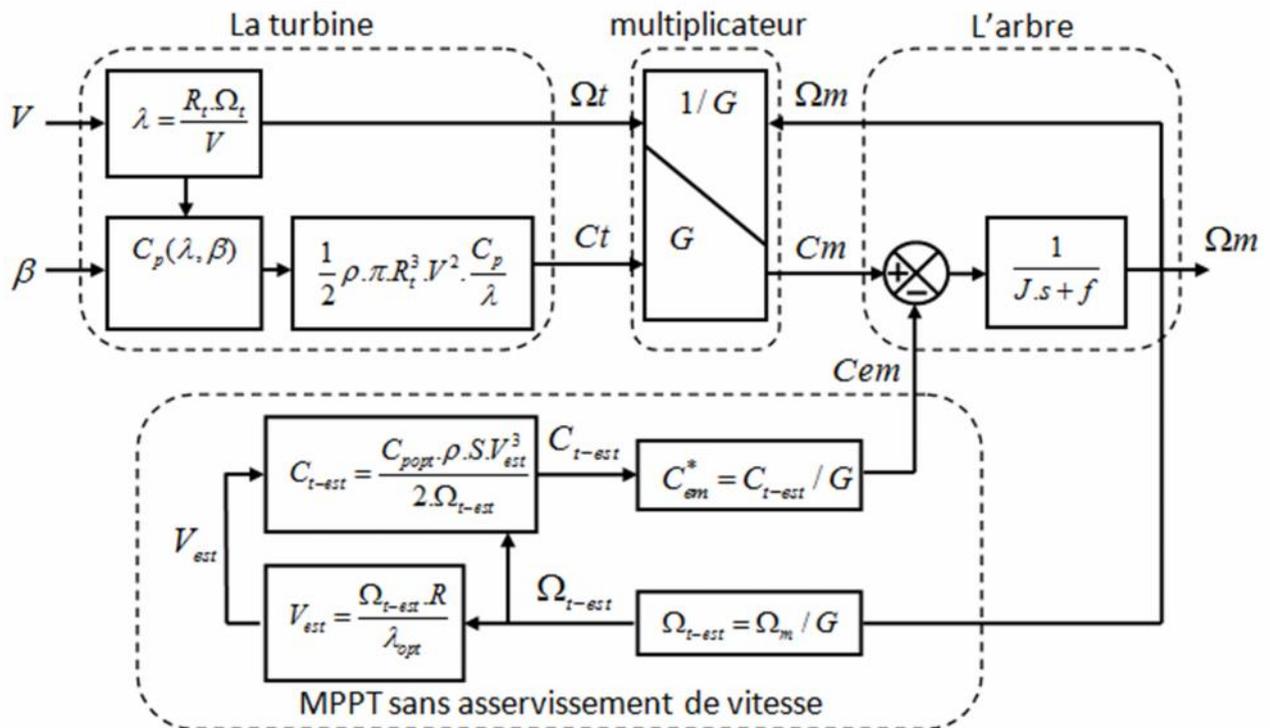


Fig. (II.9): Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée Ω_{t-est} , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.18})$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée V_{est} , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$V_{est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R}{\quad} \quad (\text{II.19})$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$C_{t-est} = C_p \cdot \frac{S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{t-est}} \cdot V_{est}^3 \quad (\text{II.20})$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$C_{em}^* = \frac{C_{est}}{G} \quad (\text{II.21})$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum C_{pmax} . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par:

$$C_{em}^* = K \cdot \Omega_m^2 \quad (\text{II.22})$$

Où K est une constante définie par :

$$K = \frac{C_{pmax} \cdot f \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (\text{II.23})$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (Zone 2) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la MADA.

II.3.4. Résultats de simulation

Le modèle de la turbine ainsi que la technique MPPT de la figure (II.9) sont faits sous Matlab/Simulink. Le générateur étant supposé parfait, Les résultats de simulation que nous allons présenter ont été faits pour une turbine de 1.5 MW, leur paramètres sont donnés dans l'annexe A.

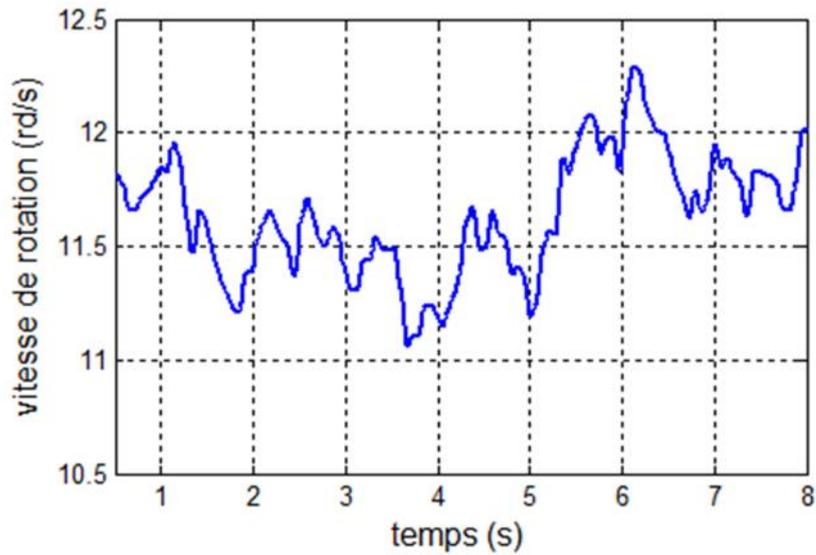


Fig. (II.10): Vitesse de rotation de la turbine

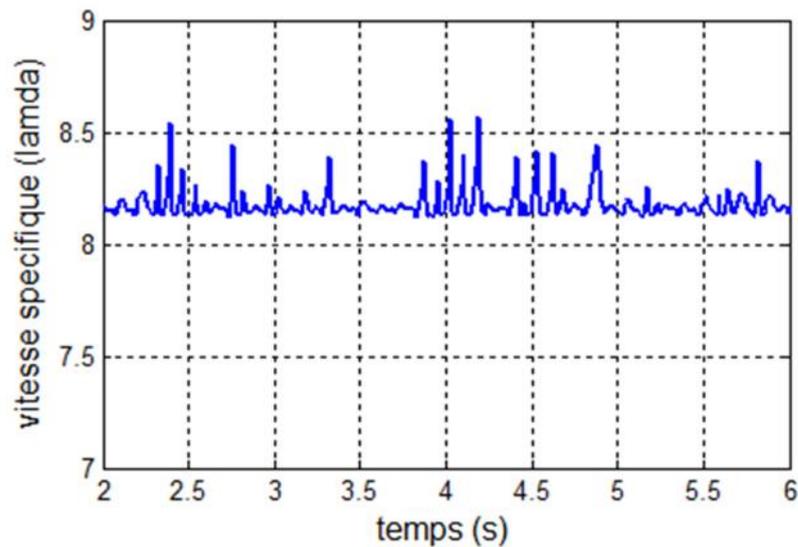


Fig. (II.11): Vitesse spécifique (Lambda) de la turbine

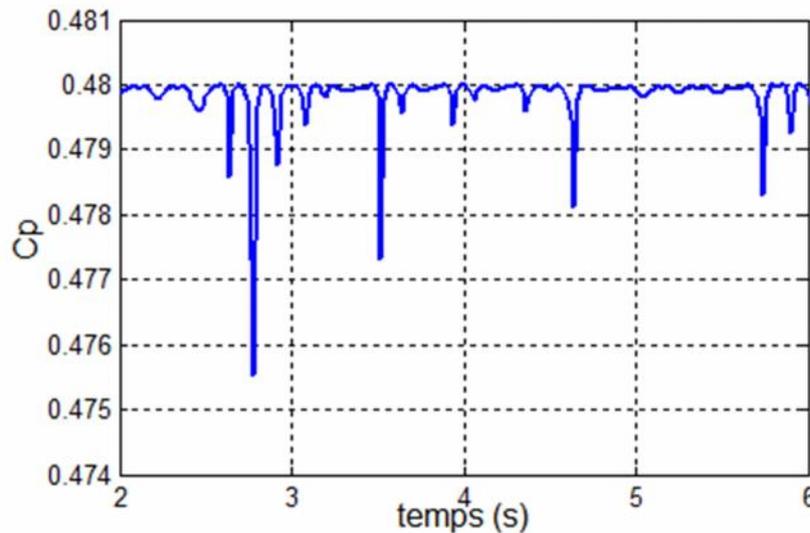


Fig. (II.12): Coefficient de puissance de la turbine

La technique MPPT nous a permis de garder le coefficient de puissance C_p et la vitesse spécifique λ dans leurs valeurs optimales afin d'obtenir le maximum de la puissance du vent avec certaines creux qui sont dues à la valeur de l'inertie du système mécanique.

II.4. Modélisation de la partie électrique

II.4.1. Description de la MADA

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi de trois enroulements identiques et symétrique couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois bagues.

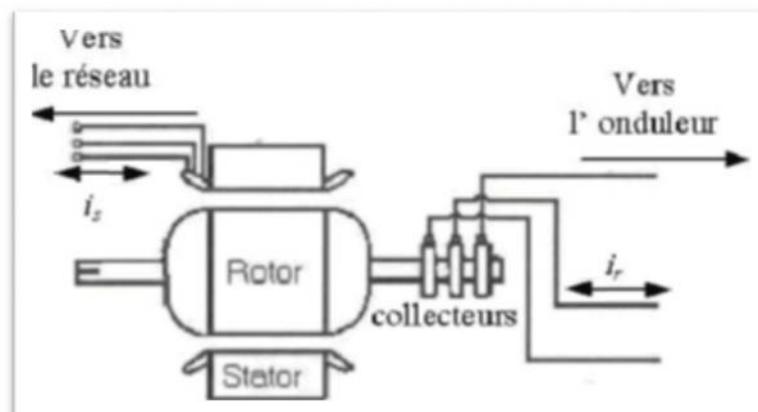


Fig. (II.13): Structure d'une machine asynchrone à double alimentation

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur est appelé cascade hypo ou hyper synchrone.

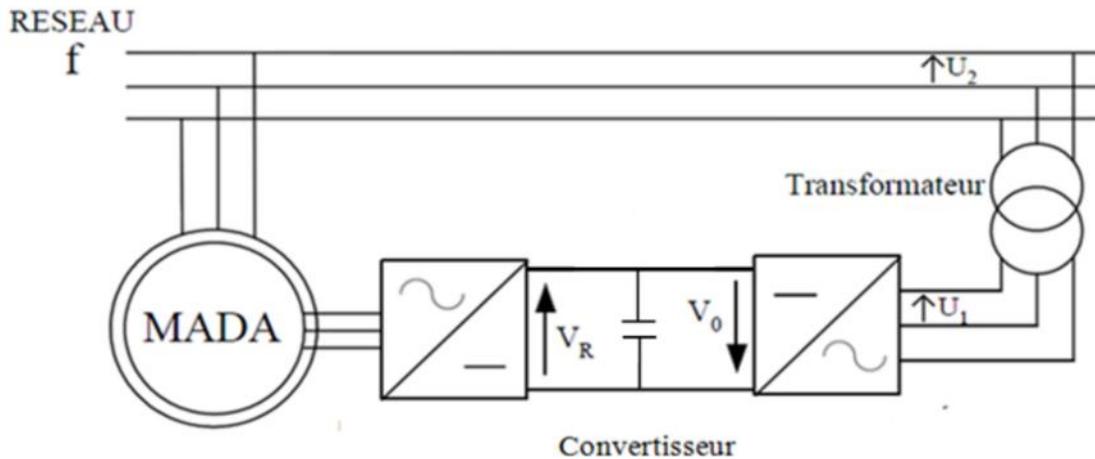


Fig. (II.14): Cascade d'une machine asynchrone à double alimentation

II.4.2. Modes de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [4] [2]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable.

La figure (II.15) montre les différents modes de fonctionnement de la MADA, en moteur hyposynchrone ou hypersynchrone dans les quadrants 1 et 2 respectivement et en générateur hyposynchrone ou hypersynchrone dans les quadrants 3 et 4 respectivement. Seuls les quadrants 3 et 4 sont exploitables pour la production de l'énergie électrique, donc nous nous intéressons dans notre étude à ces deux quadrants pour la production d'énergie éolienne.

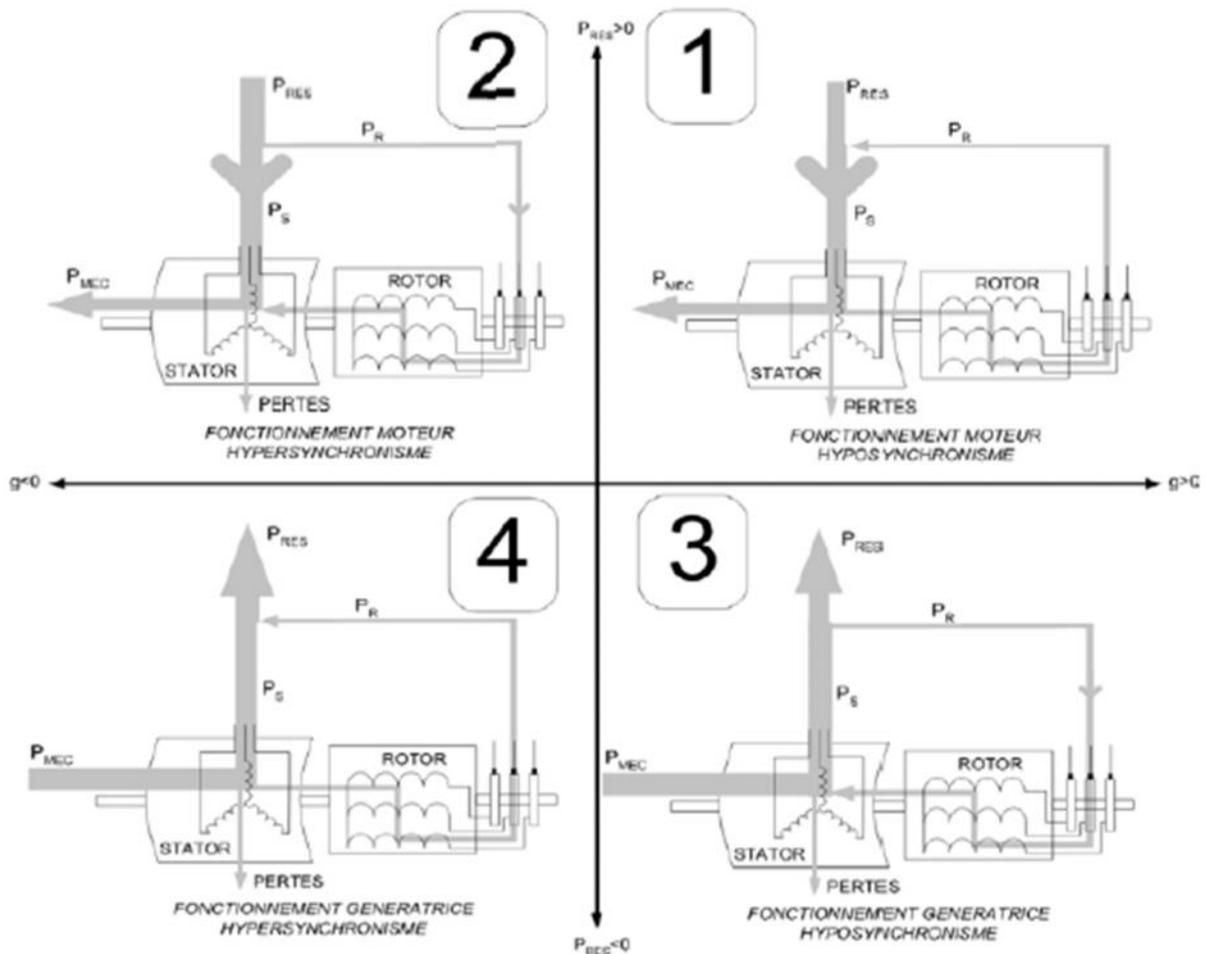


Fig. (II.15): Quadrants de fonctionnement de la MADA

En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant jusqu'à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux et moins coûteux que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage. De plus, le contrôle des tensions rotoriques nous donne la possibilité de maîtriser les puissances active et réactive, ce qui est très utile pour la poursuite du point de fonctionnement optimale dans la production d'énergie éolienne.

II.4.3. Modélisation de la MADA en grandeurs de phases

La machine asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

II.4.3.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [4] [30].

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches est négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.
- On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courant et des tensions est égale à zéro.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additivité des flux,
- La constance des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est fonction de la vitesse de rotation ω , tel que $\omega = d\theta/dt$ où θ est l'angle entre l'enroulement statorique (A) et l'enroulement rotor (a) en chaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous.

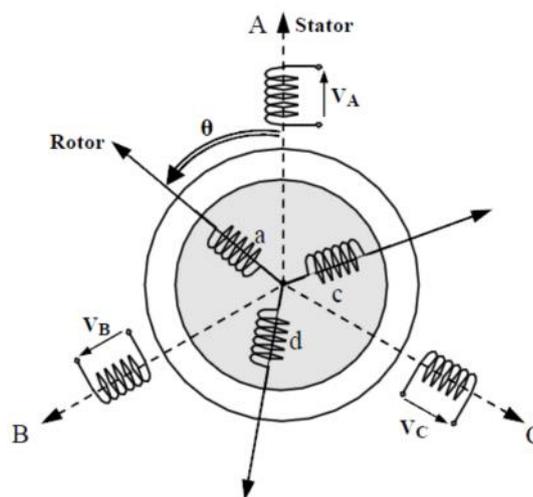


Fig. (II.16): Représentation schématique de la machine asynchrone

En utilisant l'approche des circuits couplés magnétiquement, la loi d'Ohm et la loi de Faraday et en tenant compte des hypothèses cités ci-dessus, le comportement dynamique de la MADA peut être décrit par le système d'équations différentielles suivant.

II.4.3.2. Equations des tensions

Les équations de tension de la MADA s'écrivent sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[w_s]}{dt} \\ [V_r] &= [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[w_r]}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

Les équations de tensions du stator sont écrites dans un repère lié au stator et les équations du rotor dans un repère lié au rotor, ce qui explique l'absence des tensions induites dues au mouvement [30].

II.4.3.3. Equations des flux

De la même manière on peut écrire les équations des flux sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} [\xi_s] &= [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\xi_r] &= [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}] \cdot [I_s] \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (II.25) dans (II.24), on obtient le système d'équations ci-dessous, qui représente le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] &= [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}] \cdot [I_s]) \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad [\xi_s] = \begin{bmatrix} \xi_{sa} \\ \xi_{sb} \\ \xi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad [\xi_r] = \begin{bmatrix} \xi_{ra} \\ \xi_{rb} \\ \xi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \text{diag}[R_s \quad R_s \quad R_s] \quad [R_r] = \text{diag}[R_r \quad R_r \quad R_r]$$

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2f/3) & \cos(\theta - 4f/3) \\ \cos(\theta - 4f/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2f/3) \\ \cos(\theta - 2f/3) & \cos(\theta - 4f/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

II.4.3.4. Equation mécanique

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$Cem = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} L(\theta) \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Sachant que les matrices inductances L_{ss} et L_{rr} sont à termes constante, l'expression du couple devient comme suit.

$$Cem = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot p \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}^t \cdot \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

D'autre part nous avons l'équation du mouvement qui est donnée par :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = Cem - Cr - f_g \cdot \Omega \quad (\text{II.29})$$

Les systèmes d'équations différentielles (II.27), (II.28) et (II.29) représente le modèle de la MADA dans le repère naturel. Les équations différentielles de ce système sont fortement couplées l'une à l'autre par la mutuelle inductance entre les bobines. Plus particulièrement, la mutuelle

inductance entre les bobines statoriques et rotoriques qui est fonction de la position du rotor θ . Ce couplage rend la résolution de ce système très complexe.

Les transformations mathématiques comme la transformation de Park (d, q) ou la transformation (,) peuvent faciliter la résolution d'un tel système en transformant ces équations différentielles à paramètres variable dans le temps en équations différentielles à paramètres constantes écrites dans un repère à axes orthogonaux. [30].

II.4.4. Modélisation de la MADA dans un repère orthogonal

II.4.4.1. Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique permettant la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère dqo), et donc d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution.

La matrice de transformation est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2f}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4f}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2f}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4f}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

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

$P(\theta)$: Est Orthonormée ce qui permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé, et inversement.

θ : L'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

II.4.4.2. Transformation des variables statoriques

La transformation des variables réelles statorique de la machine consiste à appliquer la matrice de Park $[P(\theta_s)]$ aux vecteurs des variables tensions $[V_s]$, courant $[I_s]$ et flux $[\varphi_s]$ pour obtenir leurs

composantes relatives correspondantes $[V_{dqos}]$, $[I_{dqos}]$ et $[\varphi_{dqos}]$ respectivement, suivant les équations :

$$[V_{dqo}]_s = [P(n_s)] \cdot [V_s] \Rightarrow [V_s] = [P(n_s)]^{-1} \cdot [V_{dqo}]_s \quad (II.30)$$

$$[I_{dqo}]_s = [P(n_s)] \cdot [I_s] \Rightarrow [I_s] = [P(n_s)]^{-1} \cdot [I_{dqo}]_s \quad (II.31)$$

$$[\xi_{dqo}]_s = [P(n_s)] \cdot [\xi_s] \Rightarrow [\xi_s] = [P(n_s)]^{-1} \cdot [\xi_{dqo}]_s \quad (II.32)$$

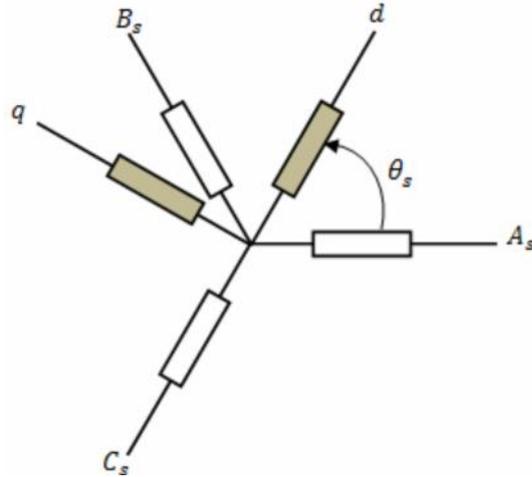


Fig. (II.17): Transformation des variables statoriques

$[P(\theta_s)]$ est la matrice de la transformation de Park appliquée au stator de la machine. θ_s étant l'abscisse angulaire du référentiel (d, q) tournant à la vitesse w_s par rapport à l'axe de la phase statorique (A). θ_s est donnée par la relation suivante [31].

$$n_s(t) = \int_0^t \tilde{\xi}_s(t) dt + n_s(0) \quad (II.33)$$

$\theta_s(0)$ Est l'abscisse initiale du référentiel arbitraire par rapport à la phase (a) du stator.

II.4.4.3. Transformation des variables rotoriques

De la même manière que pour le stator, les composantes relatives correspondantes aux variables rotoriques peuvent être calculées à partir des équations suivantes :

$$[V_{dqo}]_r = [P(n_r)] \cdot [V_r] \Rightarrow [V_r] = [P(n_r)]^{-1} \cdot [V_{dqo}]_r \quad (II.34)$$

$$[I_{dqo}]_r = [P(n_r)] \cdot [I_r] \Rightarrow [I_r] = [P(n_r)]^{-1} \cdot [I_{dqo}]_r \quad (II.35)$$

$$[\xi_{dqo}]_r = [P(n_r)] \cdot [\xi_r] \Rightarrow [\xi_r] = [P(n_r)]^{-1} \cdot [\xi_{dqo}]_r \quad (II.36)$$

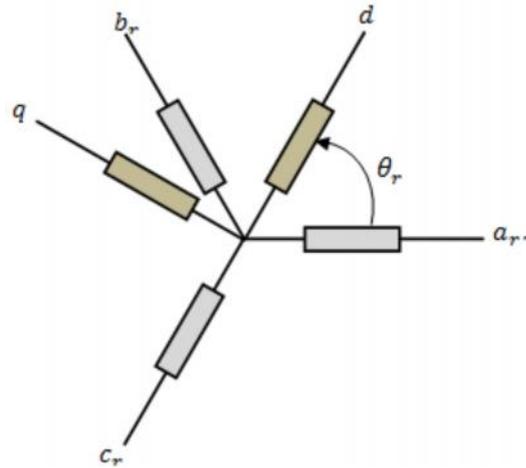


Fig. (II.18): Transformation des variables rotoriques

$[P(\theta_r)]$ Est la matrice de la transformation de Park appliquée au rotor de la machine.

θ_r Est l'abscisse du référentiel orthogonal par rapport à la phase rotorique tel que [31] [32]:

$${}_{n_r}(t) = \int_0^t \check{S}(t)dt + {}_{n_r}(0) \tag{II.37}$$

$\theta_r(0)$ Est la position initiale du référentiel par rapport à la phase rotorique (a).

II.4.5. Equation de la MADA dans le repère arbitraire

Il paraît clairement que le repère de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celui des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier les équations. Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \tag{II.38}$$

Cette relation est dite condition de simplification de Park.

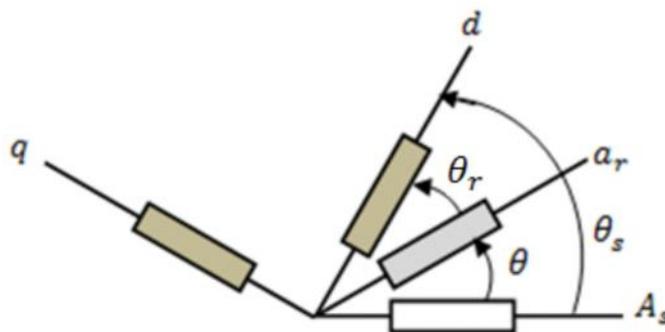


Fig. (II.19): La MADA dans le référentiel arbitraire

II.4.5.1. Equations des tensions

En introduisant les équations (II.30), (II.31), (II.34) et (II.35) dans les équations de la machine, on obtient :

$$\begin{aligned} [P(n_s)]^{-1} \cdot [V_{dqs}]_s &= [R_s] \cdot [P(n_s)]^{-1} \cdot [I_{dqs}]_s + \frac{d}{dt} \left([P(n_s)]^{-1} \cdot [\xi_{dqs}]_s \right) \\ [P(n_s - n_r)]^{-1} \cdot [V_{dqs}]_r &= [R_r] \cdot [P(n_s - n_r)]^{-1} \cdot [I_{dqs}]_r + \frac{d}{dt} \left([P(n_s - n_r)]^{-1} \cdot [\xi_{dqs}]_r \right) \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

D'où :

$$\begin{aligned} [V_{dqs}]_s &= [R_s] \cdot [I_{dqs}]_s + [P(n_s)] \cdot \frac{d}{dt} [P(n_s)]^{-1} \cdot [\xi_{dqs}]_s \\ [V_{dqs}]_r &= [R_r] \cdot [I_{dqs}]_r + [P(n_s - n_r)] \cdot \frac{d}{dt} [P(n_s - n_r)]^{-1} \cdot [\xi_{dqs}]_r \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} [P(n_s)] \cdot \frac{d}{dt} [P(n_s)]^{-1} &= \frac{dn_s}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ [P(n_s - n_r)] \cdot \frac{d}{dt} [P(n_s - n_r)]^{-1} &= \frac{d(n_s - n_r)}{dt} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

On peut écrire :

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \xi_{ds} - \check{S}_s \xi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \xi_{qs} - \check{S}_s \xi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \xi_{dr} - (\check{S}_s - \check{S}_r) \xi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \xi_{qr} - (\check{S}_s - \check{S}_r) \xi_{dr} \end{aligned} \quad (\text{II.41})$$

II.4.5.2. Equations des flux

De la même manière on peut trouver les équations de flux qui sont donner par :

$$\begin{aligned} \xi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \xi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \xi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \xi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{aligned} \quad (\text{II.42})$$

En substituant les flux dans le système d'équations (II.41) par leurs expressions, le système d'équations des tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\check{S}_s L_s & 0 & -\check{S}_s M \\ \check{S}_s L_s & R_s & \check{S}_s M & 0 \\ 0 & -(\check{S}_s - \check{S})M & R_r & -(\check{S}_s - \check{S})L_r \\ (\check{S}_s - \check{S})M & 0 & (\check{S}_s - \check{S})L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Ou encore :

$$V = G \cdot I + L \frac{d}{dt} I \quad (\text{II.44})$$

Qui devient sous forme d'équation d'état :

$$\dot{I} = L^{-1} [V - G I] \quad (\text{II.45})$$

Où :

$$V = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} R_s & -\check{S}_s L_s & 0 & -\check{S}_s M \\ \check{S}_s L_s & R_s & \check{S}_s M & 0 \\ 0 & -(\check{S}_s - \check{S})M & R_r & -(\check{S}_s - \check{S})L_r \\ (\check{S}_s - \check{S})M & 0 & (\check{S}_s - \check{S})L_r & R_r \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} ; \quad M = \frac{3}{2} M_{sr}$$

II.4.5.3. Equation du couple électromagnétique

Etant donné que la matrice de transformation que nous avons utilisée conserve la puissance instantanée, nous pouvons écrire alors :

$$\begin{aligned} P_e &= (V_{sa} I_{sa} + V_{sb} I_{sb} + V_{sc} I_{sc}) + (V_{ra} I_{ra} + V_{rb} I_{rb} + V_{rc} I_{rc}) \\ &= (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) + (V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \end{aligned} \quad (\text{II.46})$$

En remplaçant les tensions par leurs expressions, on trouve :

$$P_e = \check{S}_s (\{_{ds} I_{qs} + \{_{qs} I_{ds}) + (\check{S}_s - \check{S}) (\{_{dr} I_{qr} + \{_{qr} I_{dr})$$

En exprimant les flux par leur expression à partir du système (II.42), on constate que :

$$(\{_{ds} I_{qs} + \{_{qs} I_{ds}) = -(\{_{dr} I_{qr} + \{_{qr} I_{dr})$$

D'autre part on a : $C_{em} = \frac{P_e}{\check{S}}$

$$\begin{aligned} \text{D'où : } C_{em} &= p \cdot (\{_{ds} I_{qs} + \{_{qs} I_{ds}) & (II.47) \\ &= p \cdot M \cdot (I_{dr} I_{qs} + I_{qr} I_{ds}) \\ &= p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\{_{dr} I_{qs} + \{_{qr} I_{ds}) \end{aligned}$$

Tel que : p est le nombre de paires de pôles de la machine.

II.4.6.Choix du référentiel

Le système d'équation (II.45) représente le modèle linéaire de la machine asynchrone double alimentation dans un repère arbitraire tournant à une vitesse quelconque . Le choix d'un référentiel dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité avec les autres composantes du système étudié [32].

II.4.6.1.Référentiel lié au stator

Ce référentiel, appelé souvent stationnaire, est caractérisé par la relation suivante :

$$\frac{d_{n_s}}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d_{n_r}}{dt} = -\frac{d_n}{dt} = -\check{S}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \check{S}M & R_r & \check{S}L_r \\ -\check{S}M & 0 & -\check{S}L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

Les composantes relatives de la machine dans ce référentiel ont les mêmes caractéristiques que celles du réseau d'alimentation, ce qui convient pour l'étude de la machines dans un réseau

complexe. Il est aussi souvent utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation. [32].

II.4.6.2. Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il est caractérisé par la relation suivante :

$$\frac{d_{nr}}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d_{ns}}{dt} = \frac{d_n}{dt} = \check{S}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\check{S}_s L_s & 0 & -\check{S}_s M \\ \check{S}_s L_s & R_s & \check{S}_s M & 0 \\ 0 & -M & R_r & -L_r \\ M & 0 & L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

II.4.6.3. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel n'importe aucune simplification aux équations de la machine, il est caractérisé par la relation :

$$\frac{d_{nr}}{dt} = \check{S}_s, \frac{d_{nr}}{dt} = \check{S}_s - \check{S} = g\check{S}_s$$

Tel que : g est le glissement.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\check{S}_s L_s & 0 & -\check{S}_s M \\ \check{S}_s L_s & R_s & \check{S}_s M & 0 \\ 0 & -g\check{S}_s M & R_r & -g\check{S}_s L_r \\ g\check{S}_s M & 0 & g\check{S}_s L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

Les composantes relatives de la machine dans ce référentiel sont constantes ce qui justifie son large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones [32]. Vu l'avantage que importe ce dernier référentiel, nous allons l'utiliser dans la suite de notre étude.

II.4.7.Simulation du model de la MADA

L'utilisation du logiciel MATLAB/Simulink pour la simulation de la MADA nous permet d'utiliser le modèle décrit par l'équation (II.45) sous sa forme matricielle. L'implémentation du modèle de la MADA sous SIMULINK est donnée par le schéma bloc de la figure (II.30).

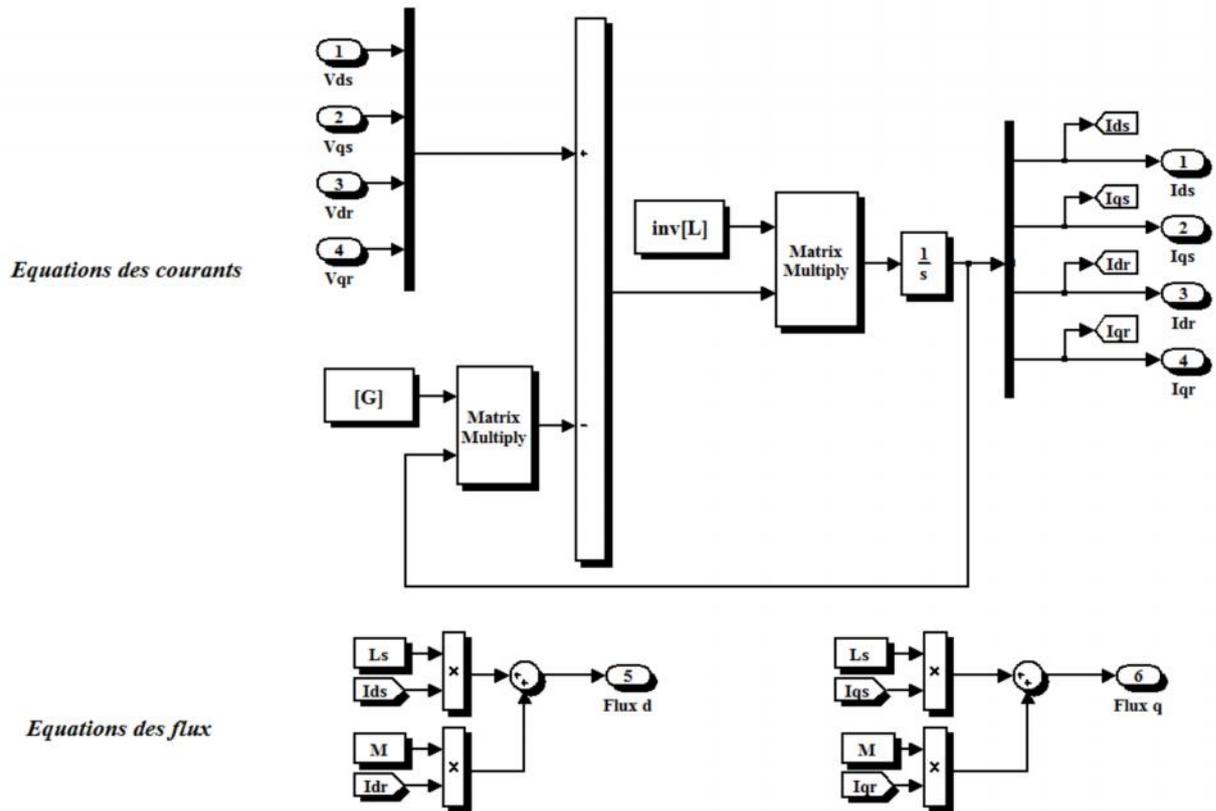
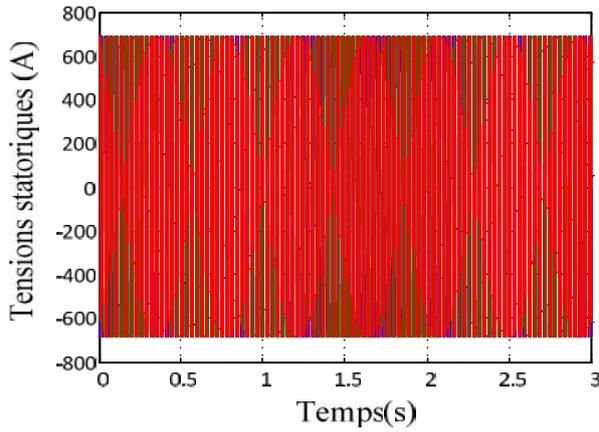
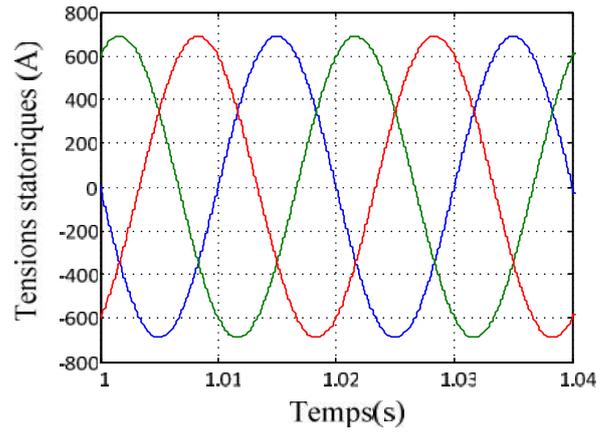


Fig. (II.20): Schéma bloc du modèle de la MADA

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation d'une MADA de 1.5MW dont les paramètres sont données dans l'annexe B. La machine est entraînée à une vitesse de 1420tr/min et connectée directement a deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une amplitude de 690V et une fréquence de 50Hz l'autre de 20V au niveau du rotor avec une fréquence de glissement.

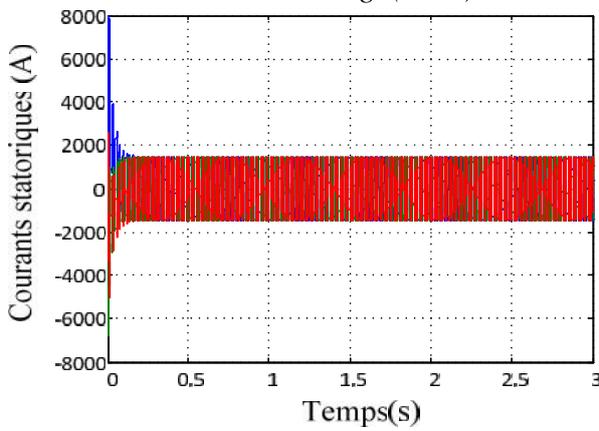


Tensions statoriques

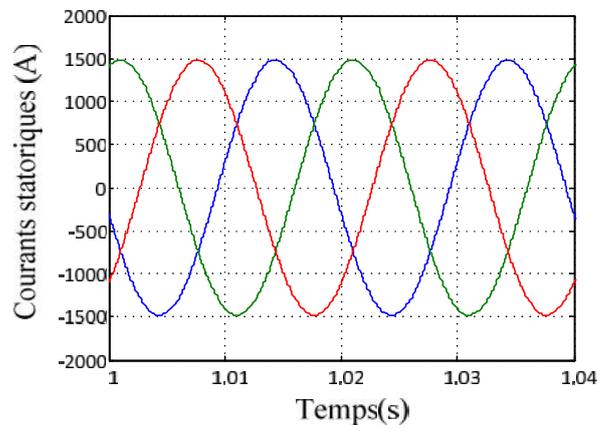


Zoom sur tensions statoriques

Fig. (II.21): Tensions d'alimentations au stator

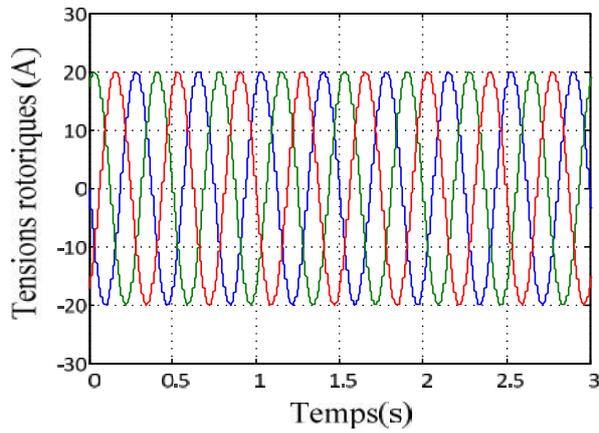


Courants statoriques

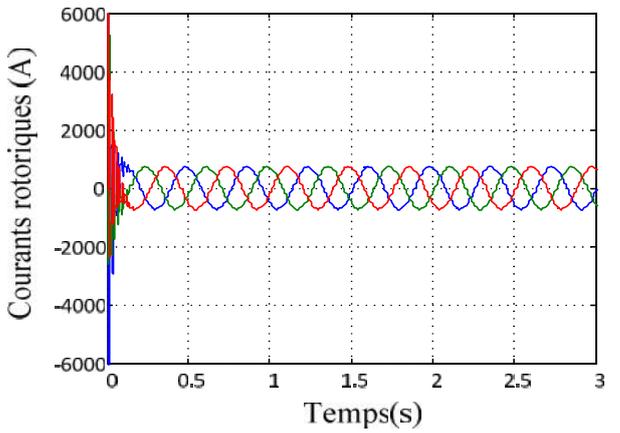


Zoom sur courants statoriques

Fig. (II.22): Courants statoriques



tensions rotoriques



Courants rotoriques

Fig. (II.23): Tensions et courants rotoriques

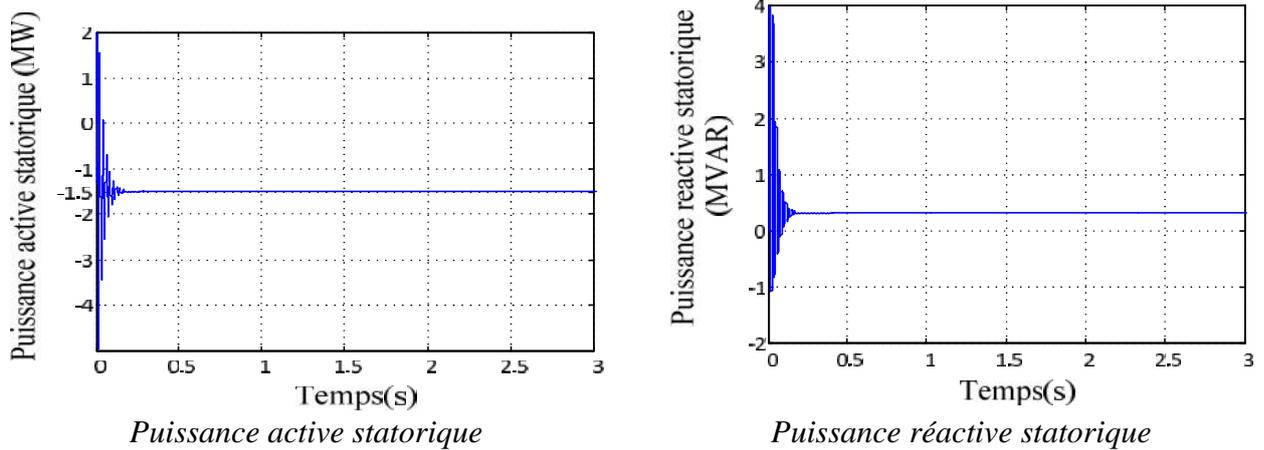


Fig. (II.24): Puissances active et réactive

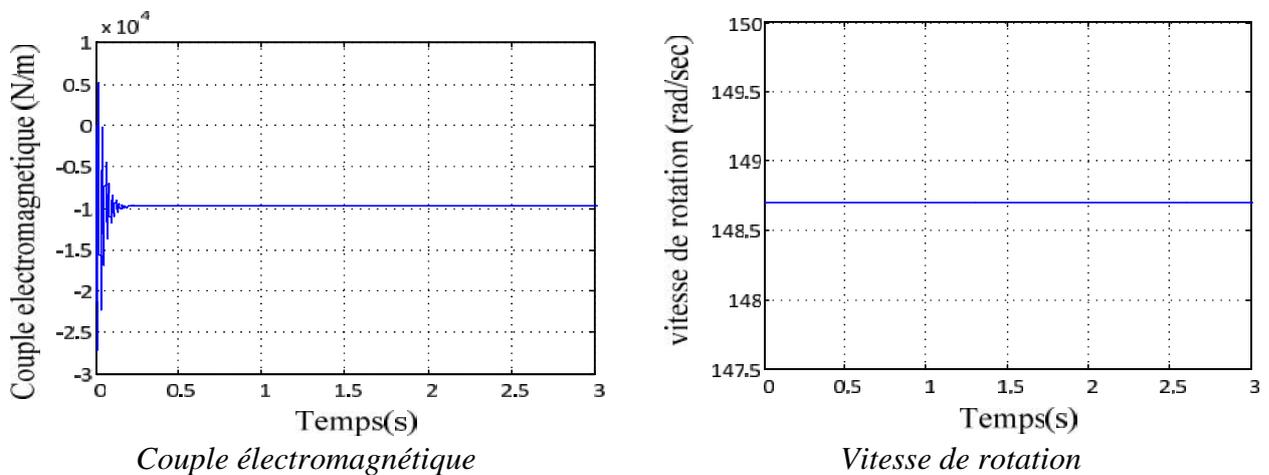


Fig. (II.25): Couple électromagnétique et Vitesse de rotation

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu obtenir un modèle de la partie mécanique qui nous a permis d'implanter une technique de réglage des éoliennes à vitesse variable, le contrôle MPPT qui permet l'extraction du maximum de la puissance du vent.

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons pu exploiter un modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation. La complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé, dans lequel les équations de la machine étaient à coefficients variables dans le temps, à un repère orthogonal dans lequel les équations sont devenues à coefficients constants dans le temps. Le modèle de la MADA a été simulé sous MATLAB/Simulink, et les résultats de simulation ont montré une bonne conformité au comportement dynamique de la machine.

Chapitre III

Commande vectorielle de la MADA

III.1 Introduction

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable des systèmes de génération de l'énergie. Cette solution convient à toutes les applications où les variations de la vitesse sont limitées autour de la vitesse de synchronisme. Puisque la puissance traitée par le côté rotorique (puissance de glissement) est proportionnelle au glissement, une conversion d'énergie est possible en utilisant un convertisseur de puissance du côté rotorique, celui-ci ne traite qu'une petite fraction de puissance du système global. Dans les entraînements à vitesses variables, dans le cas d'un fonctionnement moteur, la puissance de glissement est traitée par un convertisseur AC/AC placé au niveau du rotor. Les systèmes à vitesse variable de génération de l'énergie électrique ont plusieurs avantages en comparaison avec les générateurs synchrones à vitesse fixe et celle à induction [35], [33], [34].

Une caractéristique importante de la commande par orientation de la tension statorique suivant le référentiel synchrone (champ tournant) de la MADA, a comme objectif la possibilité de réaliser une commande découplée des puissances active et réactive du côté statorique pour des applications en mode moteur ou générateur. D'ailleurs, si le convertisseur contrôlé est utilisé pour l'alimentation du côté rotorique, les composantes de puissance du système global peuvent être contrôlées indépendamment. [36], [34], [37].

Le but visé dans ce chapitre consiste à introduire un algorithme de commande des puissances active et réactive pour un système de production de l'énergie électrique à la base de la machine asynchrone à double alimentation alimentée par un onduleur du côté rotor contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI.

III.2. Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone $\{s$, $\{r$, ou $\{m$ au choix, afin d'obtenir un découplage flux-courant et couple-courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment du flux [30], [2], [38].

Prenons l'une des trois expressions du couple électromagnétique trouvées dans le chapitre précédent, par exemple l'équation suivante.

$$Cem = p.(\{_{ds}.I_{qs} - \{_{qs}.I_{ds}) \quad (III.1)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\{_s = \{_{ds} \Rightarrow \{_{qs} = 0$$

Donc l'expression du couple électromagnétique devient [DA09] :

$$Cem = p.\{_{ds}.I_{qs} \quad (III.2)$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple électromagnétique peut être contrôlé indépendamment du flux par action sur le courant I_{qs} , ce qui est l'objectif de la commande vectorielle.

III.3. Modèle de la MADA a flux statorique oriente

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [4], [30], [40].

Rappelant le système d'équations différentielles décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \{_{ds} - \check{S}_s \{_{qs} \\ V_{qs} &= R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \{_{qs} + \check{S}_s \{_{ds} \\ V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \{_{dr} - (\check{S}_s - \check{S}) \{_{qr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \{_{qr} + (\check{S}_s - \check{S}) \{_{dr} \end{aligned} \quad (III.3)$$

Avec un flux statorique constant et orienté, $\{_s = \{_{ds}$ et $\{_{qs} = 0$.

Ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante [39] :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} + \check{S}_s \{_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \{_{dr} - (\check{S}_s - \check{S}) \{_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \{_{qr} - (\check{S}_s - \check{S}) \{_{dr}
 \end{aligned} \tag{III.4}$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [4], [30].

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= 0 \\
 V_{qs} &= V_s = \check{S}_s \{_{ds} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \{_{dr} - (\check{S}_s - \check{S}) \{_{qr} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \{_{qr} + (\check{S}_s - \check{S}) \{_{dr}
 \end{aligned} \tag{III.5}$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{aligned}
 \{_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\
 0 &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\
 \{_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\
 \{_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs}
 \end{aligned} \tag{III.6}$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$Cem = p \cdot \frac{V_s}{\check{S}_s} \cdot I_{qs} \tag{III.7}$$

Cem : Le couple électromagnétique.

p : Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

III.3.1. Expressions des puissances (active et réactive) statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s &= V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{aligned} P_s &= V_s I_{qs} \\ Q_s &= V_s I_{ds} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courants statoriques I_{qs} et I_{ds} respectivement, sur lesquels nous avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{V_s}{\tilde{S}_s L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} &= -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{aligned} P_s &= -\frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s &= \frac{V_s^2}{\tilde{S}_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

Il ressort de l'expression (III.11) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{\tilde{S}_s L_s}$ imposée par le réseau [2].

III.3.2. Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (III.10), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + \frac{V_s M}{\check{S}_s L_s} \\ \psi_{qr} = \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.12)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.5), on trouve :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} - \check{S}_r \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} + \check{S}_r \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + \frac{\check{S}_r M V_s}{\check{S}_s L_s} \end{aligned} \quad (III.13)$$

A partir des systèmes d'équations (III.11) et (III.13), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous

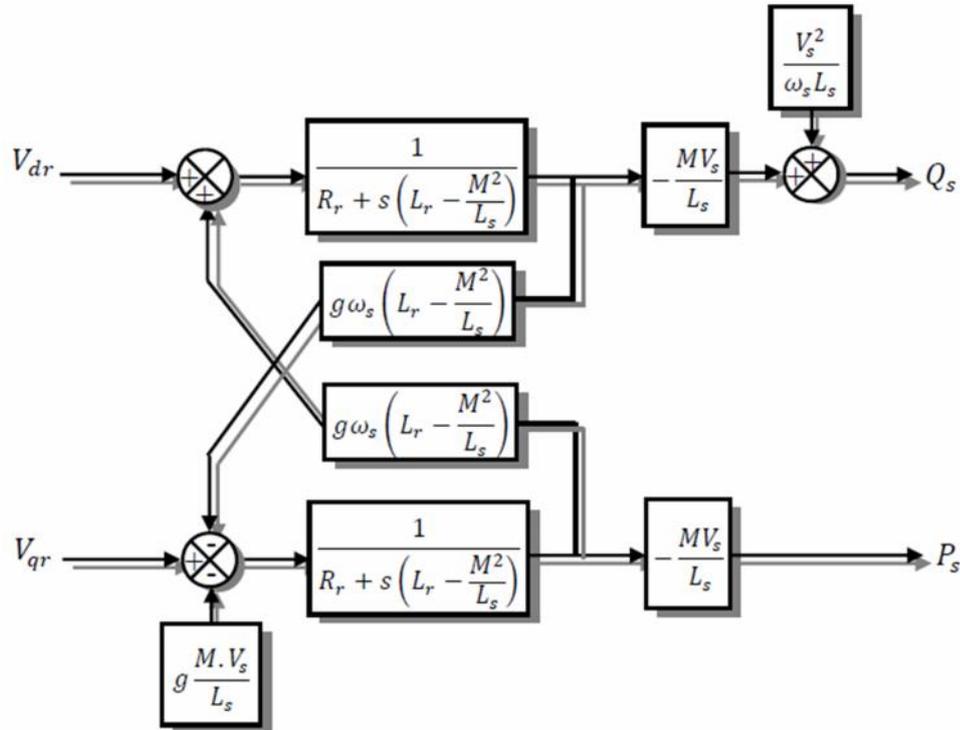


Fig. (III.1): Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

L'expression $\tilde{S}_r(L_s - \frac{M^2}{L_s})$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature.

Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

III.4. Contrôle indépendant des puissances active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

III.5. Réglage direct des puissances active et réactive

Dans cette partie, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA en utilisant des régulateurs PI (Proportionnel Intégral).

III.5.1. Schéma bloc de la régulation

Pour réguler la MADA, nous avons mis en place une boucle de régulation pour chaque puissance avec un régulateur PI, tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans l'équation (III.13) [4], [41].

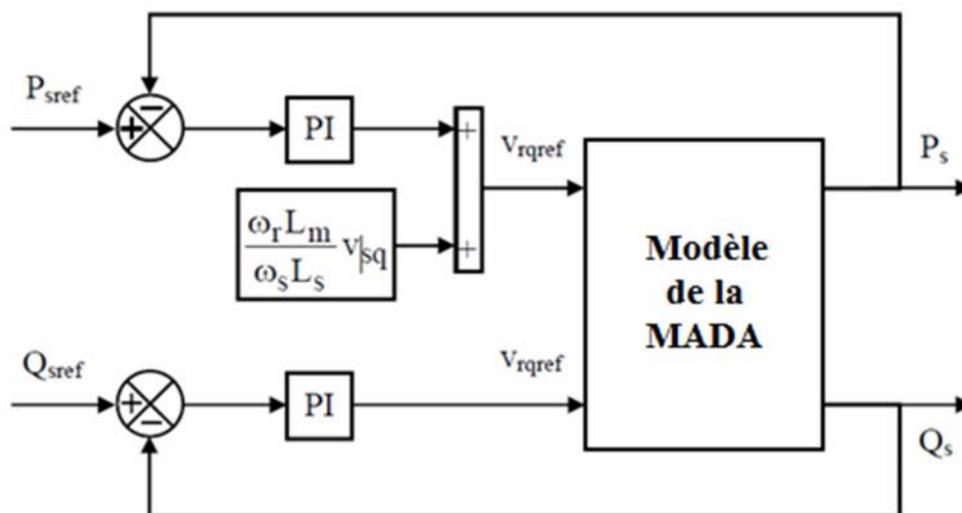


Fig. (III.2): Schéma bloc du réglage direct des puissances active et réactive

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur de la pulsation des courants rotoriques \tilde{S}_r . Par conséquent, on obtient une commande vectorielle avec un seul régulateur pour chaque puissance, présentée sur la figure (III.2).

III.5.2. Calcul des paramètres du régulateur PI

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive, offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [4].

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basée sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler [42], [4].

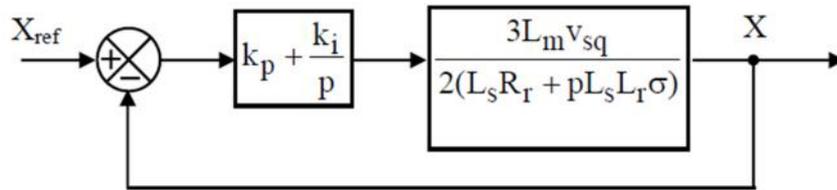


Fig. (III.3): Schéma bloc du système de régulation

La figure (III.3) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau du stator de la DFIM en boucle fermée par un régulateur PI. Dans ce cas, la fonction de transfert de chaque puissance est déduite à partir du modèle de la DFIM en tenant compte de l'équation (III.13).

La fonction de transfert en boucle ouverte (F_{BO}) du système de régulation de la figure (III.3) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{P + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{3MV_s}{2L_s L_r \dagger}}{\frac{P}{k_p} \cdot \frac{R_r}{L_r \dagger} + P} \quad (III.14)$$

$$\dagger = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$$

Tel que :

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante:

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{L_r \dagger} \quad (III.15)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des régulateurs dépendent de ces paramètres. Si ce n'est pas le cas, la compensation est moins performante [4].

Après la compensation, on obtient la fonction FBO suivante :

$$F_{BO} = \frac{3k_p MV_s}{2L_s L_r \dagger p} \quad (\text{III.16})$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante:

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \dagger P} \quad (\text{III.17})$$

Avec: $\dagger = \frac{2L_s L_r \dagger}{3k_p MV_s}$

\dagger : est la constante du temps du système.

Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse comme suit:

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{2L_s L_r \dagger}{3\dagger MV} \\ k_i &= \frac{2R_r L_s}{3\dagger MV} \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

III.5.3. Schéma synoptique du contrôle de la MADA

La figure ci-dessous représente le schéma synoptique de la simulation, avec les paramètres de la MADA illustrés par l'annexe. La machine est connectée directement au réseau du côté statorique; de plus, le circuit rotorique est alimenté à travers un onduleur contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion. Les erreurs entre les puissances de références et celles mesurées au niveau du stator sont traitées par l'algorithme de commande considéré, afin de concevoir les tensions de références du rotor.

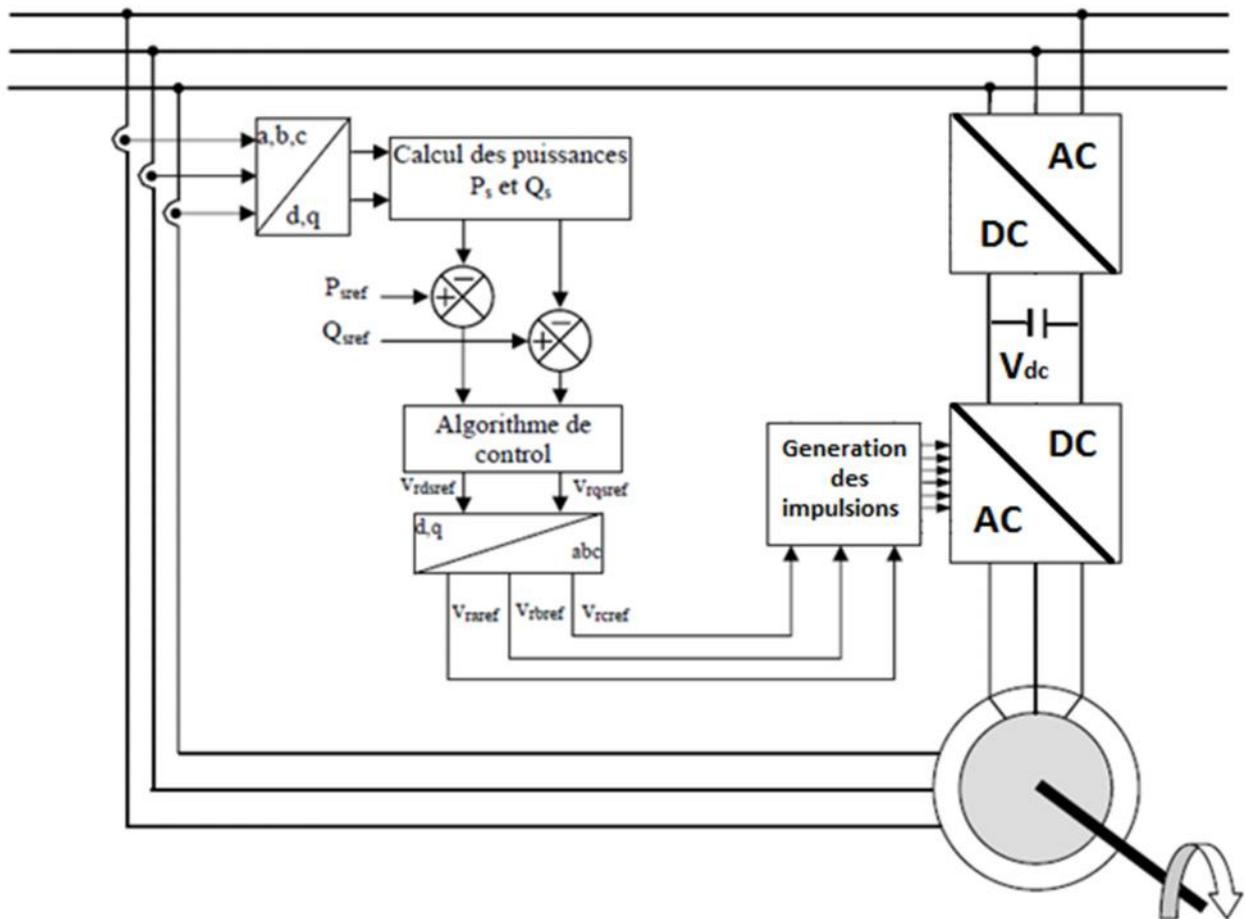


Fig. (III.4) : Schéma synoptique du contrôle direct des puissances active et réactive de la MADA

III.5.4. Résultat de simulation pour le réglage direct des puissances

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant le réglage direct des puissances active et réactive que nous venons de présenter précédemment, sur le modèle de la MADA obtenu et validé dans le chapitre II. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande en puissances d'une MADA de 1.5MW entraînée à une vitesse fixe de 1420 tr/sec.

On applique des échelons variables de la puissance active et réactive statorique de références

A $t=1$ s puis a $t=2$ s deux échelons sur la référence de la puissance active statorique.

A $t = 1.5$ s, un échelon sur la référence de la puissance réactive statorique.

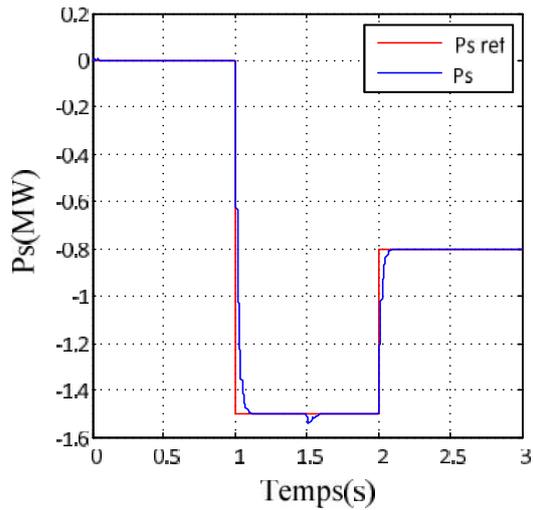


Fig. (III.5): Puissance active statorique

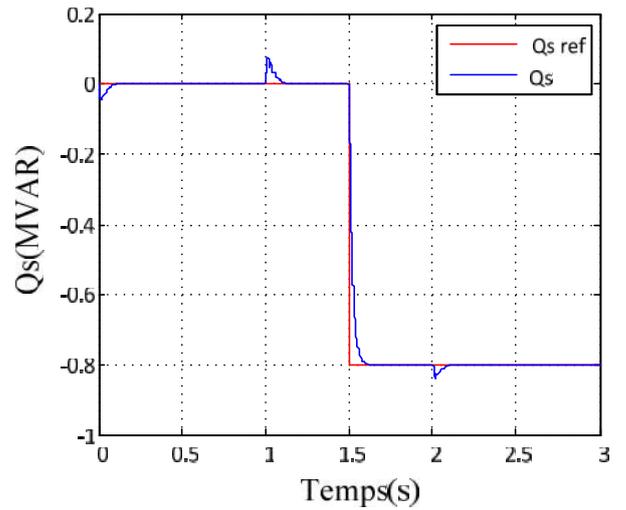
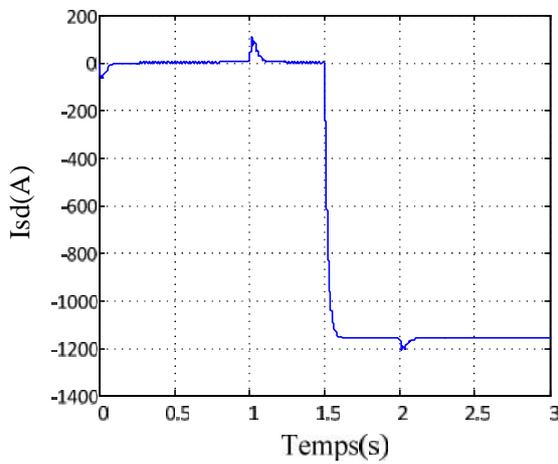
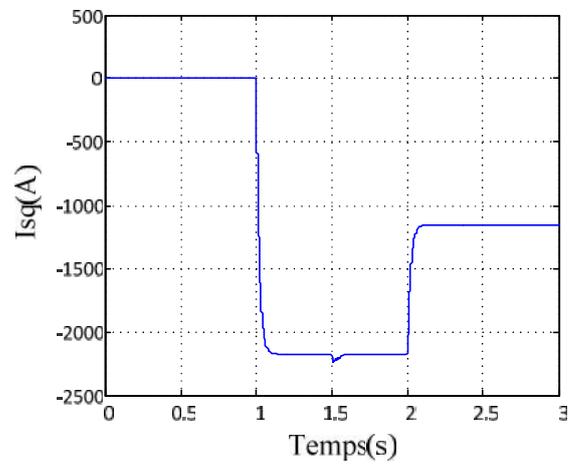


Fig. (III.6): Puissance réactive statorique

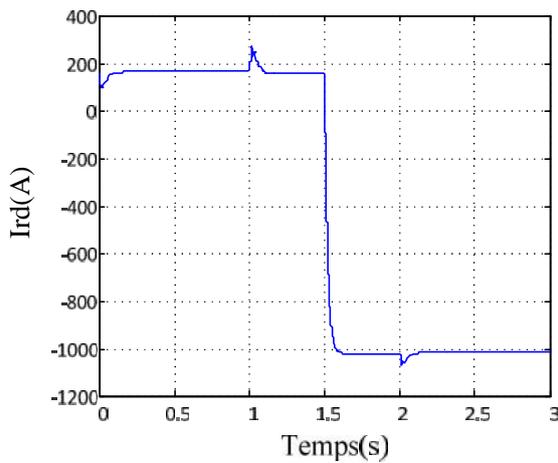


a: courant direct statorique

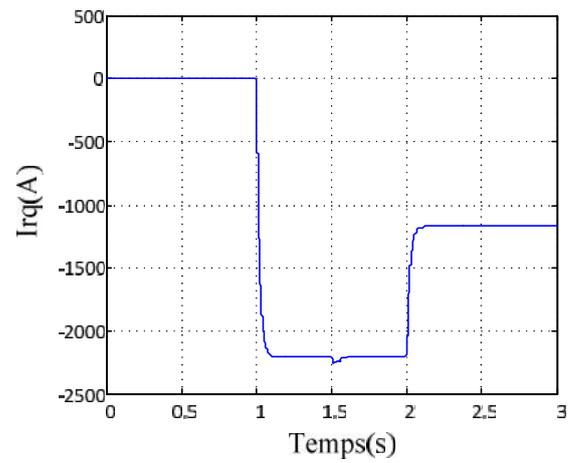


b: courant quadrature statorique

Fig. (III.7): Composantes direct et quadratique du courant statorique



a: courant direct rotorique



b: courant quadratique rotorique

Fig. (III.8): Composantes direct et quadratique du courant rotorique

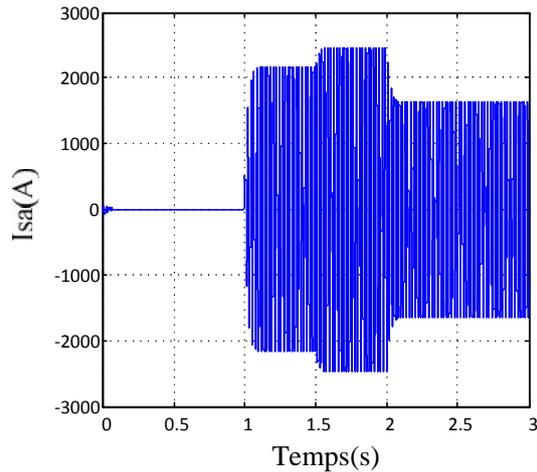


Fig. (III.9): Courant d'une phase statorique

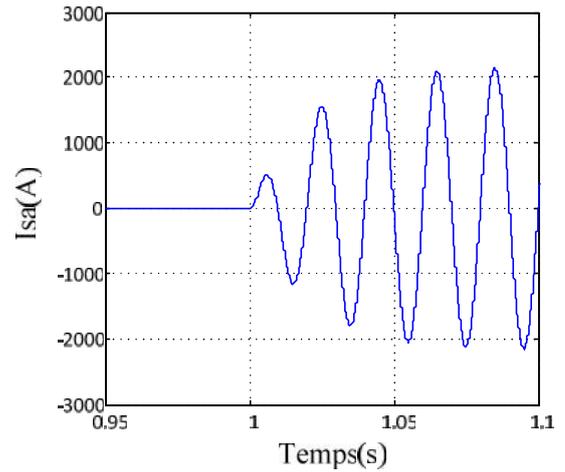


Fig. (III.10): Courant d'une phase statorique(Zoom)

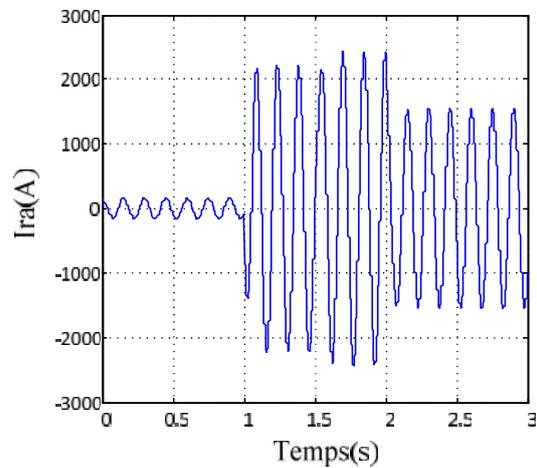


Fig. (III.11): Courant d'une phase rotorique

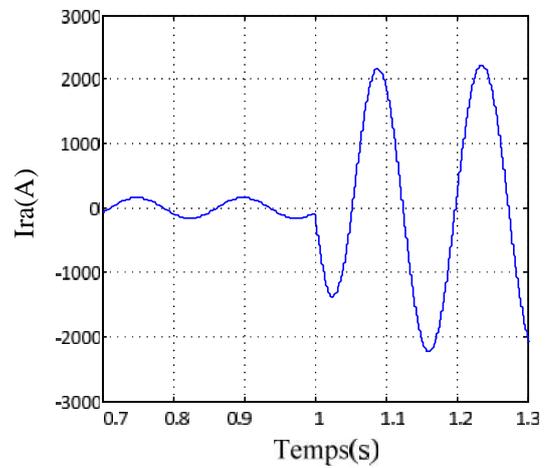


Fig. (III.12): Courant d'une phase rotorique(Zoom)

D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant des régulateurs PI présente un bon découplage au réglage de la puissance active et réactive au niveau du stator et une bonne poursuite à leurs valeurs de références imposées. Cependant, cette méthode présente certaines perturbations aux niveaux des puissances active et réactive l'ors du changement de références de ces derniers et cela influe sur le fonctionnement a vitesse variable.

III.6. Réglage indirect des puissances active et réactive

Cette technique consiste à synthétiser l'algorithme de contrôle à partir de l'inversement de la fonction de transfert du système à réguler afin d'élaborer les tensions rotoriques de référence en fonction des puissances active et réactive au niveau du stator. On cherche donc à établir les expressions des puissances active et réactive d'une part et des tensions rotoriques d'autre part en

fonction des courants rotoriques tout en tenant compte le modèle mathématique de la MADA. [4], [2], [45].

III.6.1. Réglage sans boucle de puissance

La figure (III.13) représente le schéma bloc du système de régulation sans boucle de puissance. Ce schéma consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes directe et quadratique du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

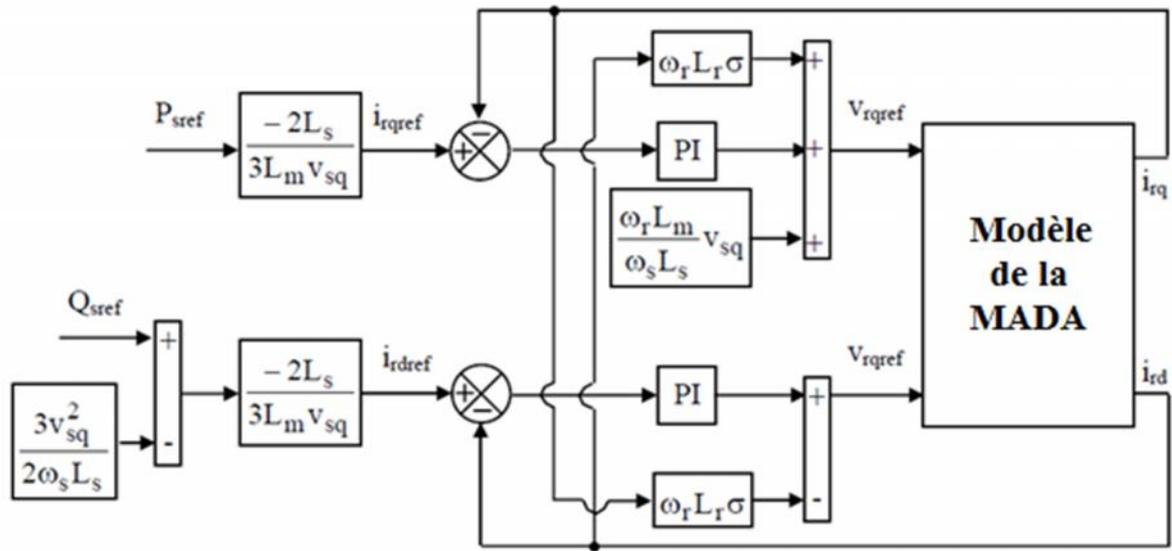


Fig. (III.13): Schéma bloc du réglage indirect sans boucle de puissance

III.6.1.1. Calcul des paramètres du régulateur PI

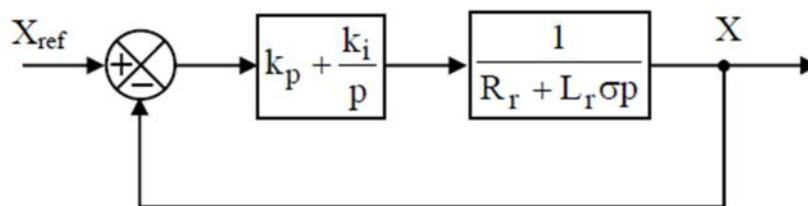


Fig. (III.14) : Schéma bloc du système de régulation

Les gains de régulateurs PI sont calculés de la même manière qu'à la section précédente.

Dans ce cas, on déduit la fonction de transfert de chaque composante du courant rotorique à partir de l'équation (III.13) de telle sorte les termes de couplages sont ignorés.

La fonction de transfert en boucle ouverte du système de régulation de la figure (III.14) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{P + \frac{k_i}{k_p} \cdot \frac{1}{L_r \dagger}}{\frac{p}{k_p} \cdot \frac{R_r}{L_r \dagger} + P} \quad (\text{III.19})$$

En appliquant la méthode de compensation des pôles à la fonction de transfert (III.19), on obtient l'égalité suivante :

$$F_{bo} = \frac{k_p}{L_r \dagger P} \quad (\text{III.20})$$

Après la compensation, on obtient la FBO suivante:

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{L_r \dagger} \quad (\text{III.21})$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante:

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \dagger P} \quad (\text{III.22})$$

Avec: $\dagger = \frac{L_r \dagger}{k_p}$

\dagger : est la constante du temps du système.

Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont exprimés en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse comme suit:

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{L_r \dagger}{\dagger} \\ k_i &= \frac{R_r}{\dagger} \end{aligned} \quad (\text{III.23})$$

III.6.1.2. Schéma synoptique du réglage indirect sans boucle de puissance

Le schéma synoptique du contrôle indirect des puissances active et réactive de la figure (III.15) a été déduit de celui de la figure (III.13) grâce à une légère modification dans le système de contrôle. Dans ce cas, les erreurs entre les courants rotoriques de références et ceux mesurés sont traitées par l'algorithme de commande considéré afin de concevoir les tensions de références du rotor.

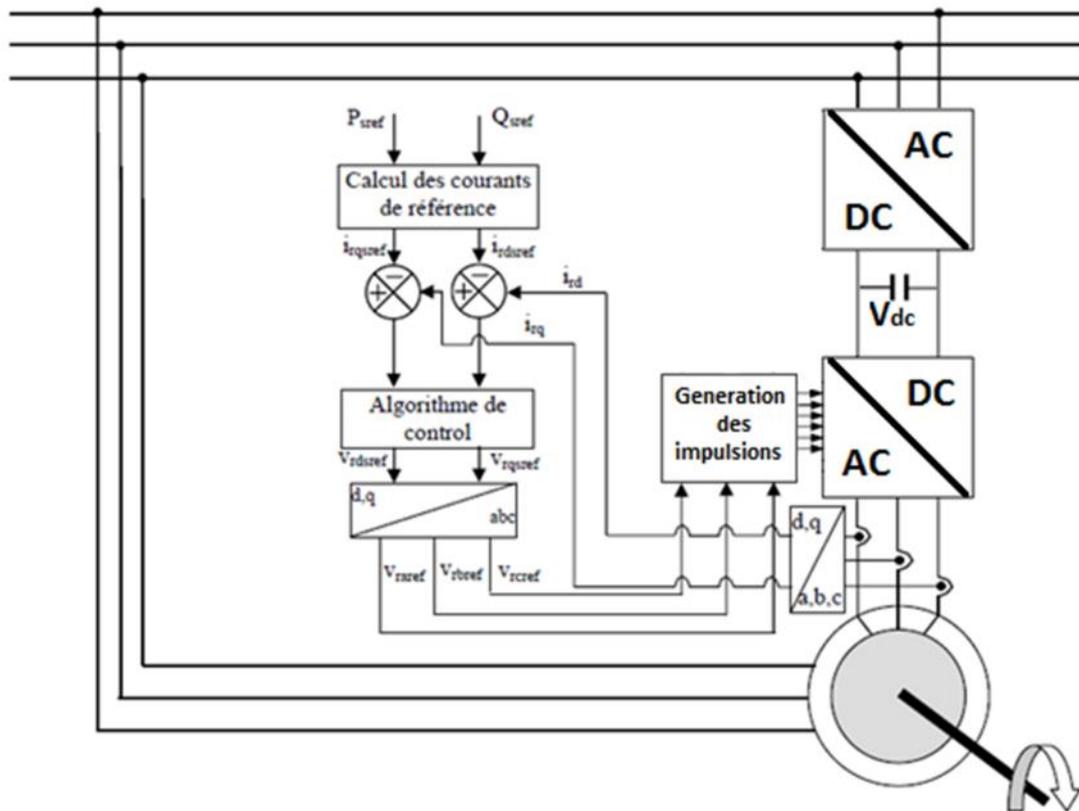


Fig. (III.15): Schéma synoptique du contrôle indirect sans boucle de puissance

III.6.1.3. Résultat de simulation pour le Réglage sans boucle de puissance

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant le réglage indirect des puissances active et réactive sans boucle de puissance que nous venons de présenter précédemment, sur le modèle de la MADA. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande en puissances d'une MADA de 1.5MW entraînée à une vitesse fixe de 1420 tr/sec.

On applique des échelons variables de la puissance active et réactive statorique de références

A $t=1$ s puis a $t=2$ s deux échelons sur la référence de la puissance active statorique.

A $t = 1.5$ s, un échelon sur la référence de la puissance réactive statorique.

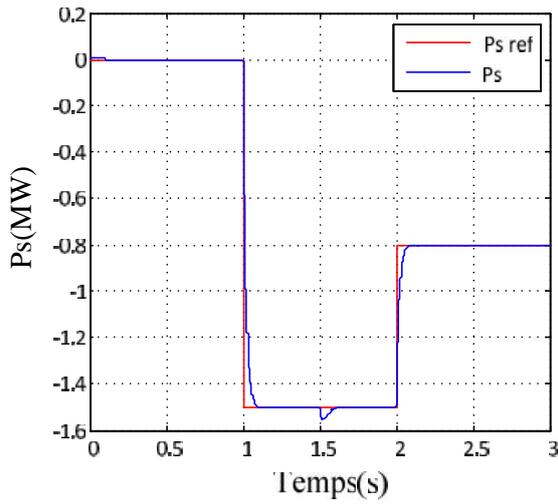


Fig. (III.16): Puissance active statorique

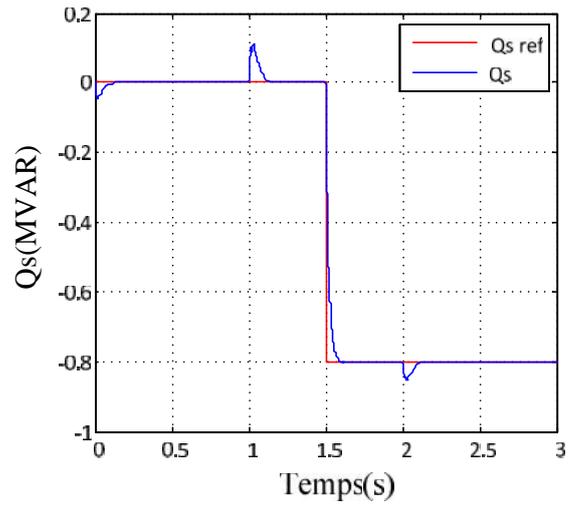
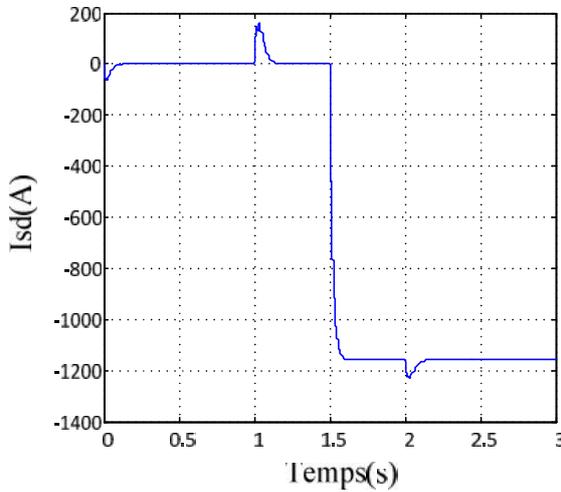
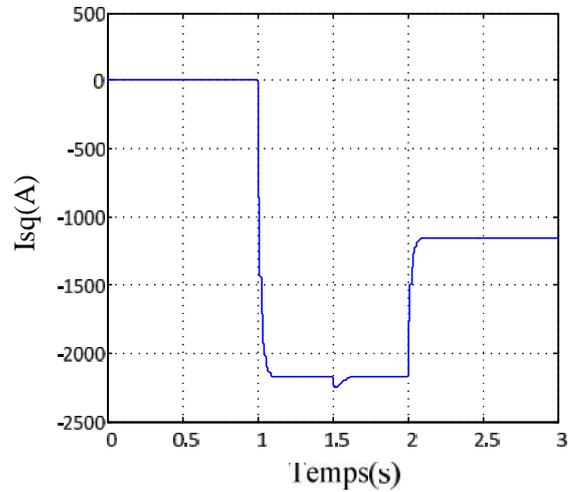


Fig. (III.17): Puissance réactive statorique

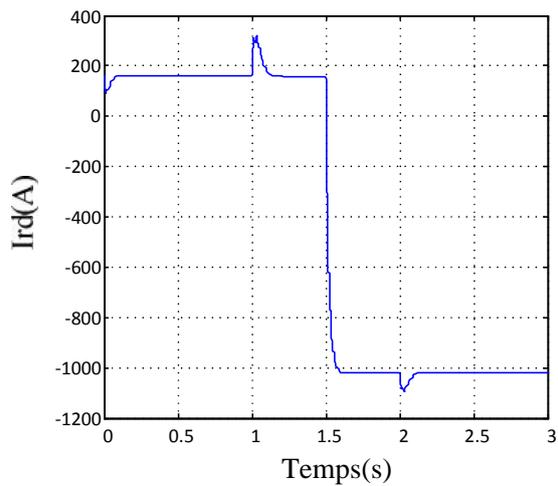


a: courant direct statorique

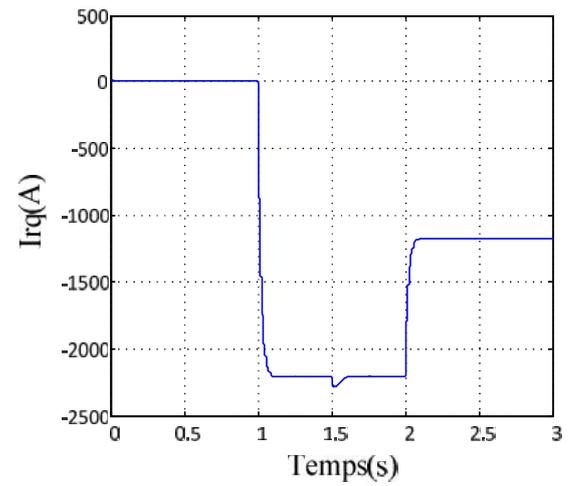


b : courant quadrature statorique

Fig. (III.18): Composantes direct et quadratique du courant statorique



a: courant direct rotorique



b: courant quadratique rotorique

Fig. (III.19): Composantes direct et quadratique du courant rotorique

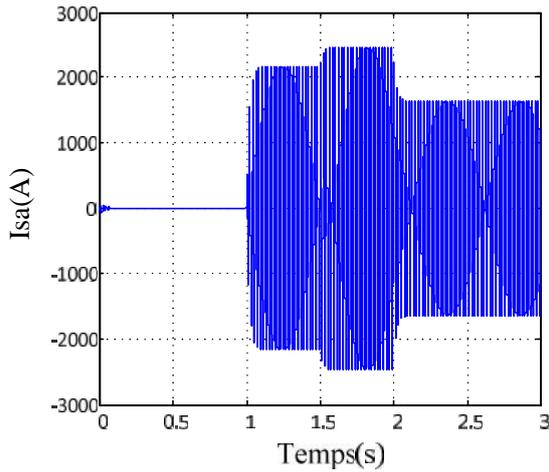


Fig. (III.20): Courant d'une phase statorique

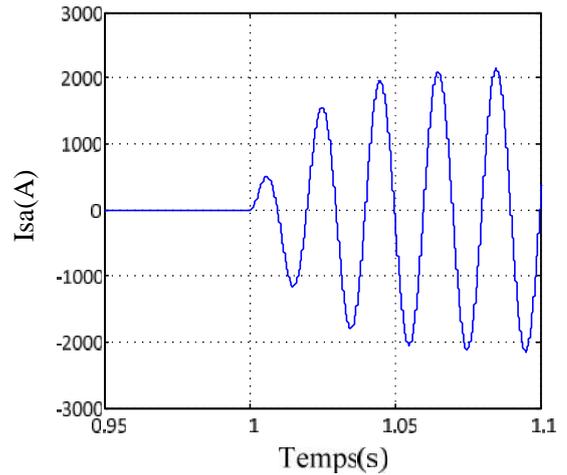


Fig. (III.21): Courant d'une phase statorique(Zoom)

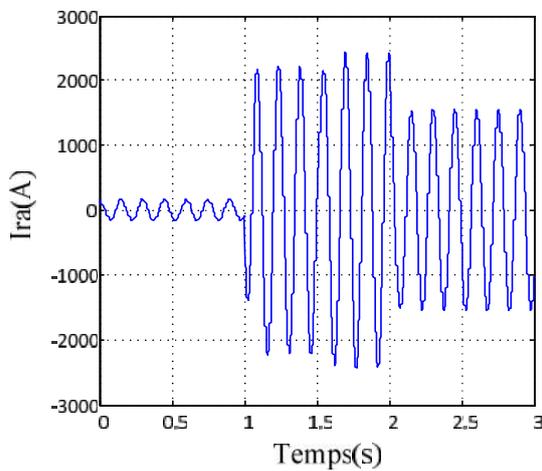


Fig. (III.22): Courant d'une phase rotorique

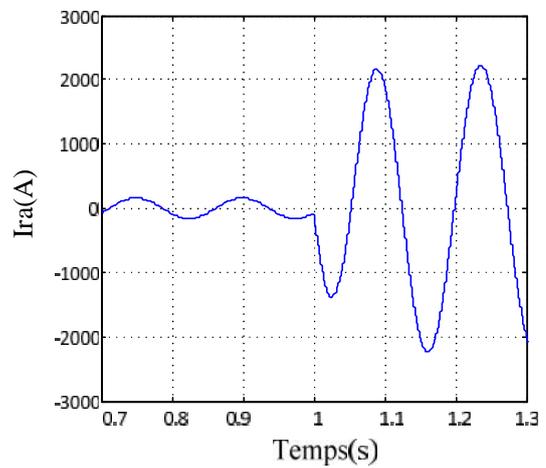


Fig. (III.23): Courant d'une phase rotorique(Zoom)

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle indirect des puissances active et réactive sans boucle de puissance en terme de découplage entre la puissance active et réactive. Cependant, la grande sensibilité de ce type de contrôle lors de la variation des consignes constitue un inconvénient majeur à l'application de celui-ci là où il y a des variations continues.

III.6.2. Réglage avec boucle de puissance

Pour améliorer le système de contrôle précédent, nous allons introduire une boucle de régulation supplémentaire des puissances active et réactive dans le schéma bloc (III.13) de telle sorte que chaque axe de régulation contient deux régulateurs PI, l'un pour contrôler la puissance et l'autre pour contrôler le courant rotorique figure (III.24) [45].

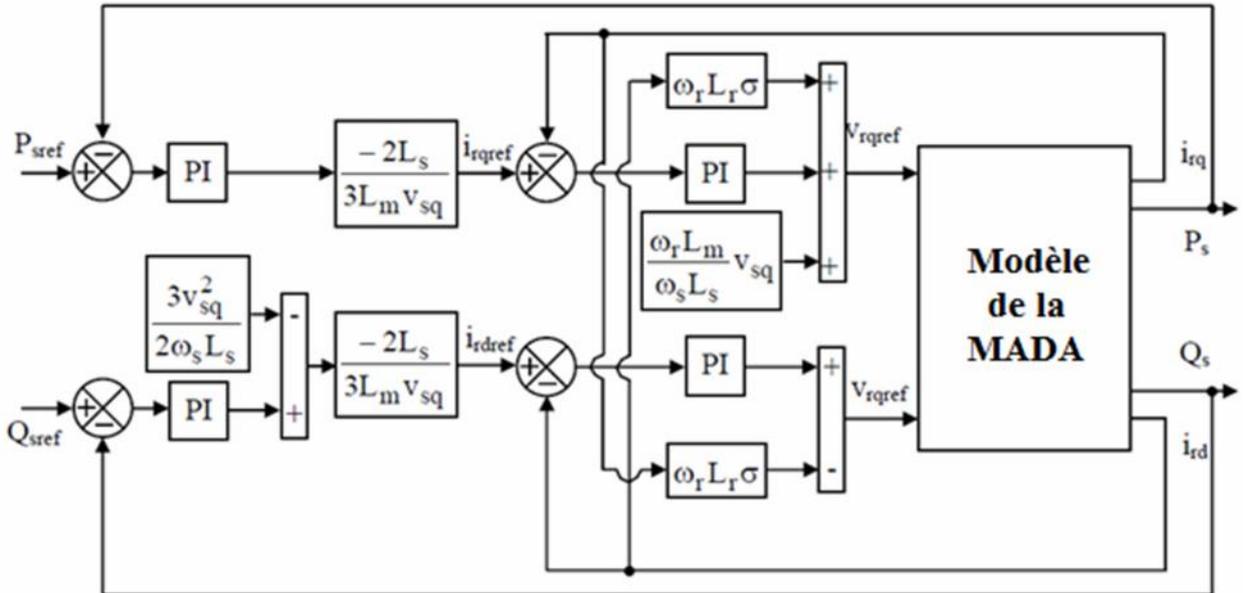


Fig. (III.24): Schéma bloc du réglage indirect avec boucle de puissance

III.6.2.1. Schéma synoptique du réglage avec boucle de puissance

Le schéma synoptique du contrôle indirect des puissances active et réactive avec boucle de puissance de la figure (III.25) a été déduit de celui de la figure (III.15) grâce à une légère modification de la boucle de contrôle. Dans ce cas, les erreurs entre les courants rotoriques de références et ceux mesurés sont traitées par l’algorithme de commande considéré, afin de concevoir les tensions de références du rotor

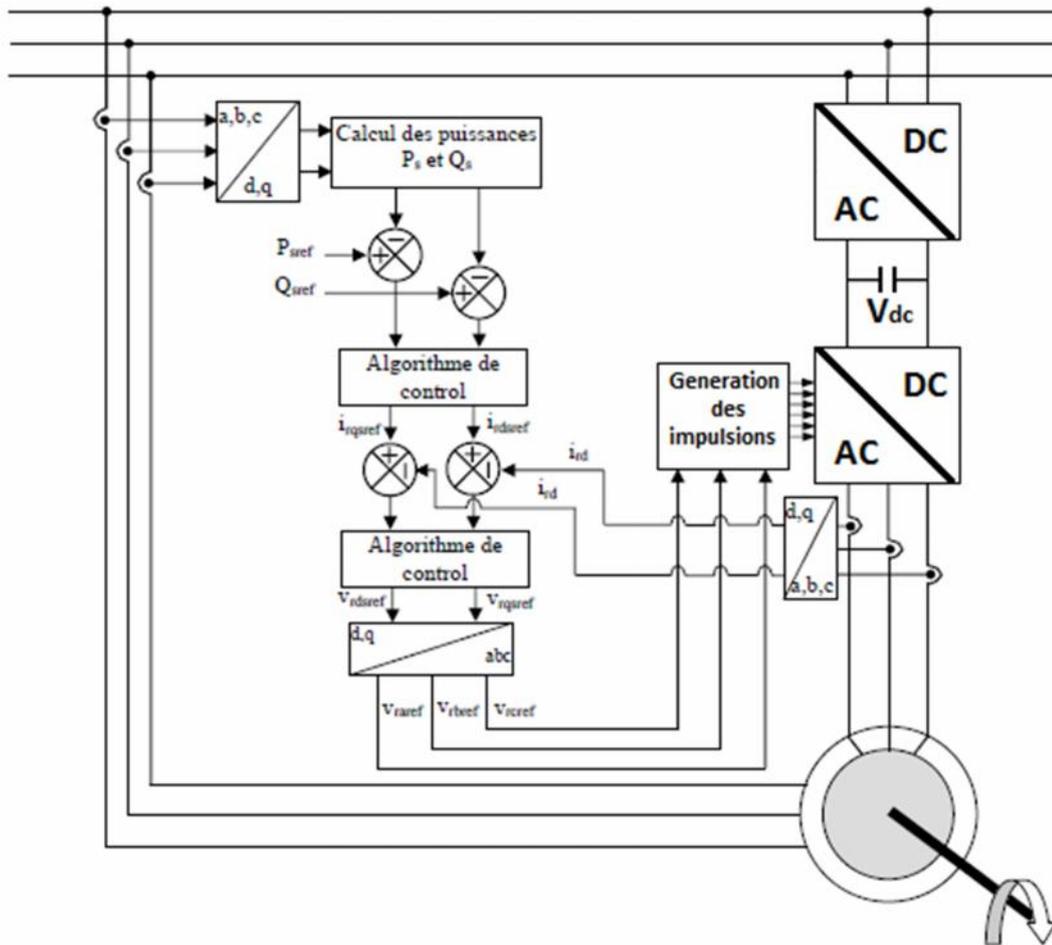


Fig. (III.25): Schéma synoptique du contrôle indirect avec boucle de puissance

III.6.2.2. Résultat de simulation pour le réglage indirect avec boucle de puissances

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant le réglage indirect des puissances active et réactive avec boucle de puissance que nous venons de présenter précédemment, sur le modèle de la MADA. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande en puissances d'une MADA de 1.5MW entraînée à une vitesse fixe de 1300 tr/sec.

On applique des échelons variables de la puissance active et réactive statorique de références

A $t=1s$ puis à $t=2s$ deux échelons sur la référence de la puissance active statorique.

A $t = 1.5 s$, un échelon sur la référence de la puissance réactive statorique.

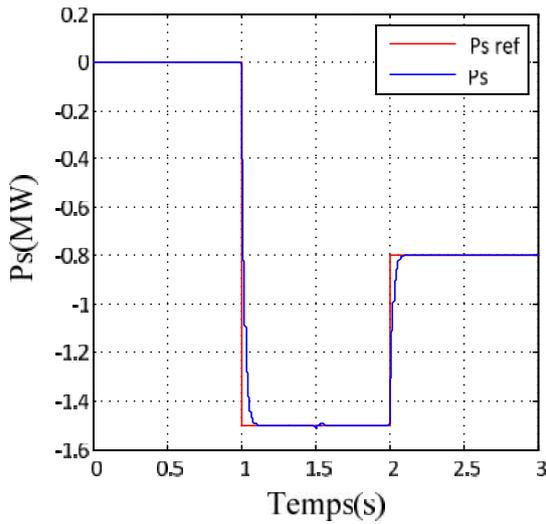


Fig. (III.26): Puissance active statorique

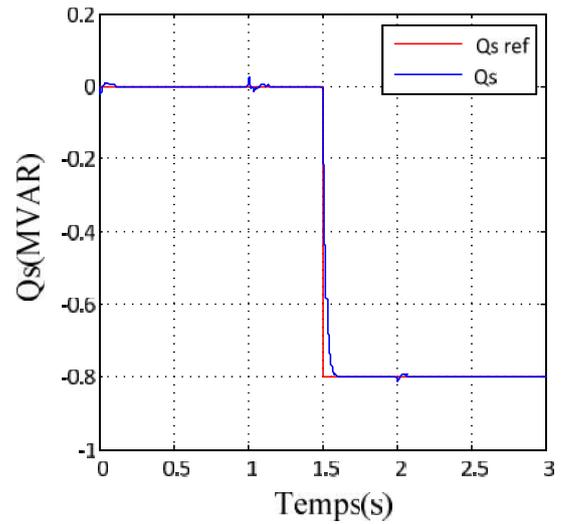
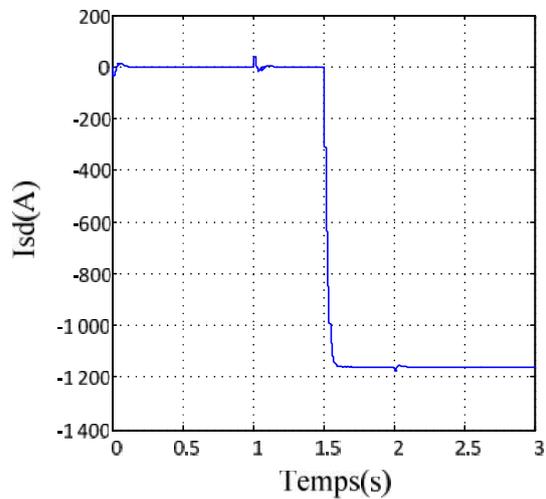
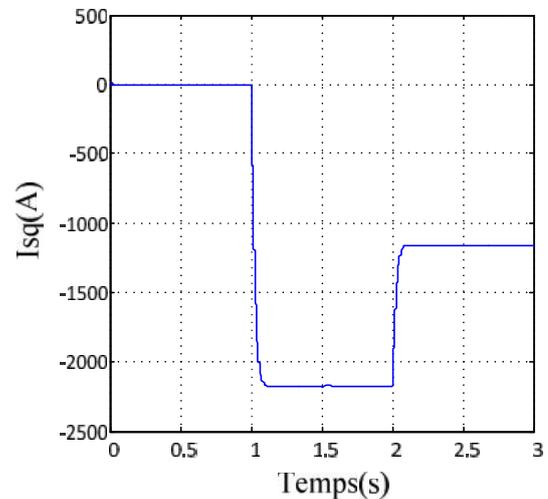


Fig. (III.27): Puissance réactive statorique

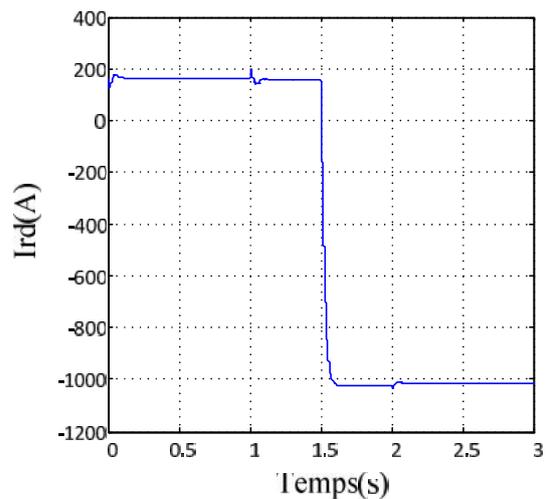


a: courant direct statorique

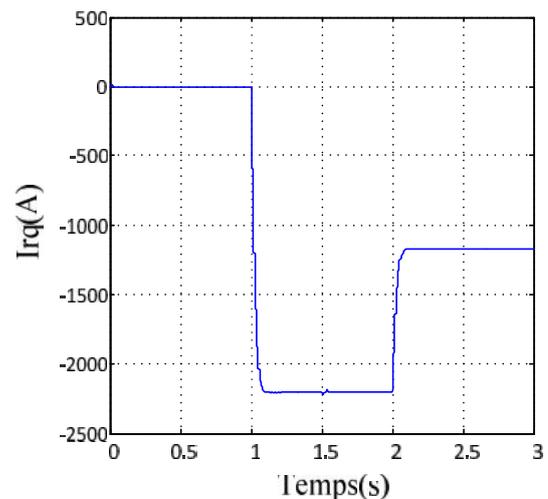


b : courant quadrature statorique

Fig. (III.28): Composantes direct et quadratique du courant statorique



a: courant direct rotorique



b: courant quadratique rotorique

Fig. (III.29): Composantes direct et quadratique du courant rotorique

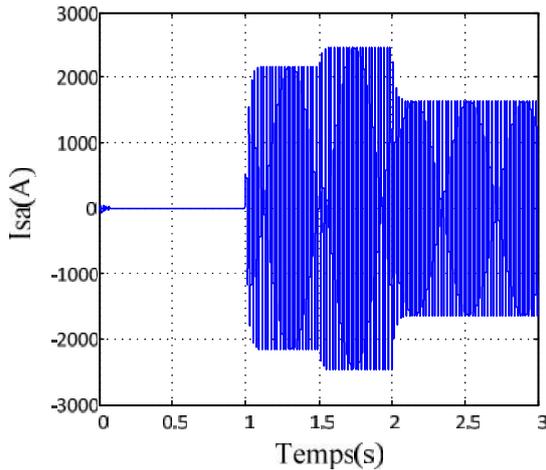


Fig. (III.30): Courant d'une phase statorique

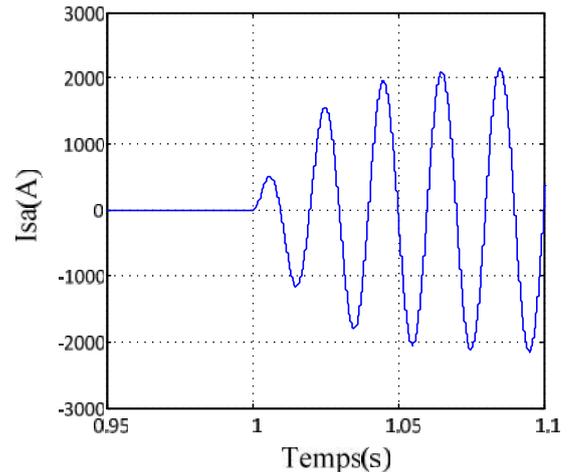


Fig. (III.31): Courant d'une phase statorique (Zoom)

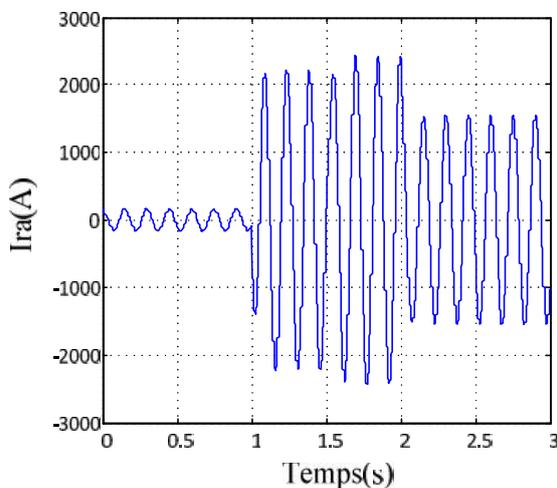


Fig. (III.32): Courant d'une phase rotorique

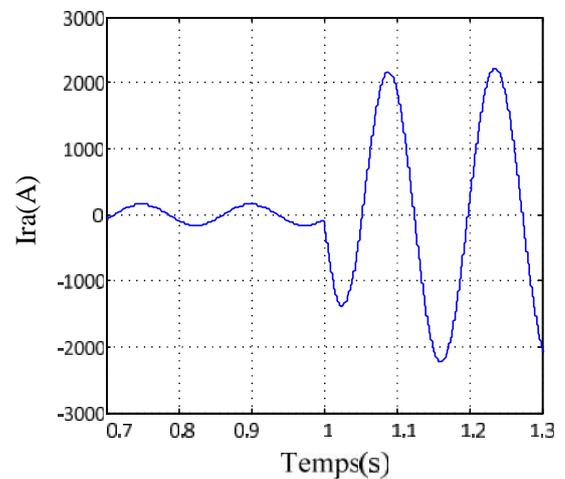


Fig. (III.33): Courant d'une phase rotorique (Zoom)

III.7. Introduction des convertisseurs pour la commande du rotor de la MADA

III.7.1. Convertisseur coté réseau

La tension d'alimentation de l'onduleur associé à la MADA est générée par une cascade composée par un redresseur à commutation forcée associé à un filtre passe bas, figure (III.34) :

Ce type de convertisseur réalisé avec des transistors de puissance (bipolaires, MOSFET ou IGBT) pour des puissances allant jusqu'à une centaine de kW, avec des fréquences de découpage ou de commutation égales ou supérieures à 10 kHz. Pour des puissances de quelques centaines de kW ou plus, on utilise couramment des GTO mais à des fréquences de commutation assez basses (500 Hz à 1000 Hz) [43].

Ces convertisseurs sont commandés par modulation de largeur d’impulsions (MLI) et possédant comme objectif principal la bidirectionnalité du passage de la puissance permettant à la machine le fonctionnement en deux régimes hyposynchrone et hypersynchrone. Aussi, avec la technique de commande à MLI, on aura une alimentation en mode de découpage, ce qui va nous faciliter l’opération de filtrage et réduire la taille des éléments du filtre associé.

Ce convertisseur est constitué de trois branches (ou bras), chacune est composée d’une paires d’interrupteurs supposés parfaits, à commutation instantanée et à chute de tension négligeable aux bornes, avec des commandes complémentaires. Chaque interrupteur K_{ij} , où i est le numéro de bras (1,2,3) et j le numéro de l’interrupteur (1,2) est composé d’un transistor d’une diode de récupération et modélisé par deux états complémentaires.

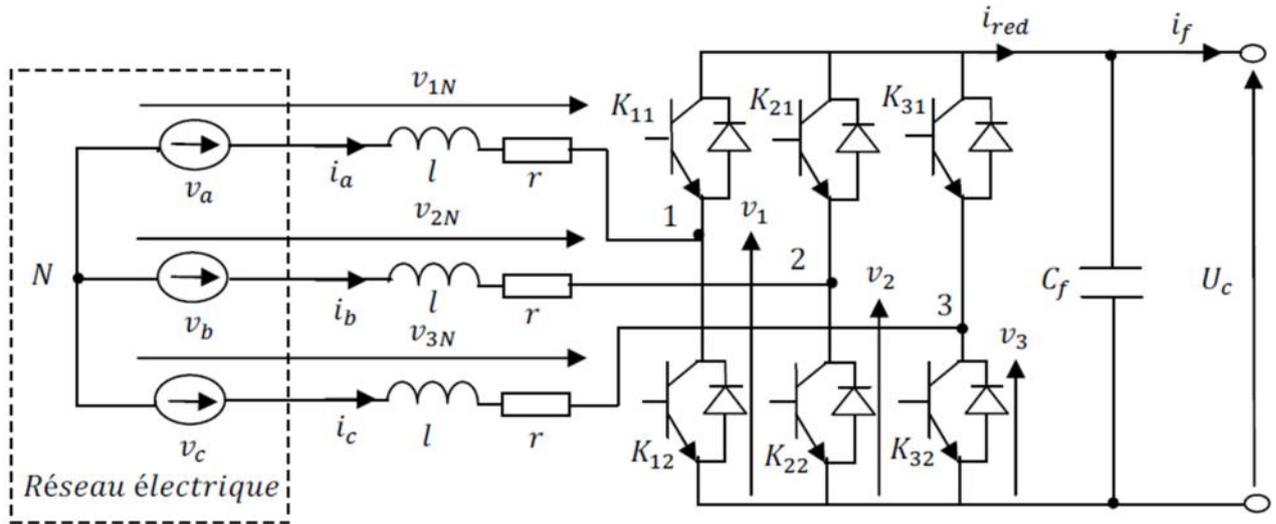


Fig. (III.34): Convertisseur AC-DC triphasé à commutation forcée

A partir de ce schéma, on peut déduire les relations suivantes :

$$\begin{aligned} v_1 - v_{1N} + v_{2N} - v_2 &= 0 \\ v_1 - v_{1N} + v_{3N} - v_3 &= 0 \end{aligned} \tag{III.24}$$

En additionnant ces équations, on obtient :

$$2v_1 - 2v_{1N} + v_{2N} + v_{3N} - v_2 - v_3 = 0 \tag{III.25}$$

Pour un réseau triphasé équilibré, on peut écrire la relation suivante :

$$v_{1N} + v_{2N} + v_{3N} = 0 \tag{III.26}$$

Dans la relation précédente on peut remplacer $v_{2N} + v_{3N}$ par $-v_{1N}$ et on tire :

$$\begin{aligned}
v_{1N} &= \frac{1}{3}(2v_1 - v_2 - v_3) \\
v_{2N} &= \frac{1}{3}(-v_1 + 2v_2 - v_3) \\
v_{3N} &= \frac{1}{3}(-v_1 - v_2 + 2v_3)
\end{aligned} \tag{III.27}$$

Selon la fermeture ou l'ouverture des interrupteurs K_{ij} les tensions de branche peuvent être égales à la tension de référence ou à 0. On introduit d'autres variables S_{11}, S_{12} et S_{13} qui prennent 1 si l'interrupteur K_i est fermé ou 0 s'il est bloqué. Le système précédent peut être réécrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{1N} \\ v_{2N} \\ v_{3N} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{12} \\ S_{13} \end{bmatrix} \tag{III.28}$$

Le courant redressé peut s'écrire :

$$i_{red} = S_{11}i_a + S_{12}i_b + S_{13}i_c \tag{III.29}$$

Ces variables de commande S_{i1} présentent des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Celle-ci permet de déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs et de régler d'une manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par une comparaison à hystérésis entre les courants d'entrée i_{abc} et les courants de référence i_{abcref}

Les états des interrupteurs dans ce cas sont déduits selon les règles suivantes :

$$\text{Si } i_{aref} - i_a \geq \Delta i \text{ alors } S_{11} = 0 \text{ et si } i_{aref} - i_a \leq -\Delta i \Rightarrow S_{11} = 0.$$

$$\text{Si } i_{bref} - i_b \geq \Delta i \text{ alors } S_{21} = 0 \text{ et si } i_{bref} - i_b \leq -\Delta i \Rightarrow S_{21} = 0.$$

$$\text{Si } i_{cref} - i_c \geq \Delta i \text{ alors } S_{31} = 0 \text{ et si } i_{cref} - i_c \leq -\Delta i \Rightarrow S_{31} = 0.$$

Les courants absorbés du réseau i_{abc} sont déduits à partir des équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 l \frac{di_a}{dt} &= v_a - v_{1N} - r.i_a = v_a - U_c \frac{2S_{11} - S_{21} - S_{31}}{3} - r.i_a \\
 l \frac{di_b}{dt} &= v_b - v_{2N} - r.i_b = v_b - U_c \frac{-S_{11} + 2S_{21} - S_{31}}{3} - r.i_b \\
 l \frac{di_c}{dt} &= v_c - v_{3N} - r.i_c = v_c - U_c \frac{-S_{11} - S_{21} + 2S_{31}}{3} - r.i_c
 \end{aligned}
 \tag{III.30}$$

Tandis que la tension aux bornes du condensateur est calculée par la relation :

$$C_f \frac{dU_c}{dt} = S_{11}i_a + S_{21}i_b + S_{31}i_c - i_f
 \tag{III.31}$$

III.7.2. Commande du convertisseur coté réseaux

Pour la commande de ce convertisseur, on fait un asservissement de la tension de sortie U_c et des courants d'entrée i_{abc} . Ces courants sont reportés au système de référence lié à la tension du réseau. Ce système de référence qui correspond aux axes (d, q) permet de découpler les expressions de la puissance active et la puissance réactive échangées entre le réseau et le rotor. On va contrôler la puissance active et par conséquent la tension dans l'étage continu par l'intermédiaire du courant i_d et la puissance réactive par l'intermédiaire de i_q .

Le schéma bloc de cette commande est illustré par la figure suivante :

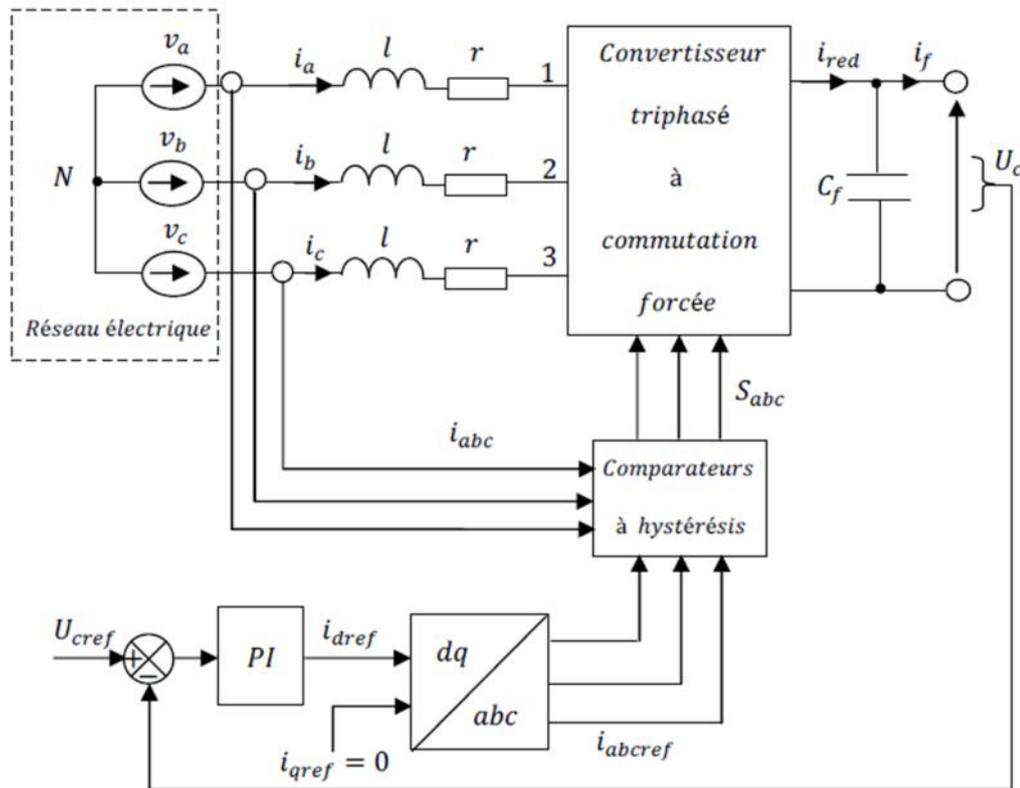


Fig. (III.35): Schéma bloc du convertisseur coté réseau commandé par MLI à hystérésis

Ici, on a commandé ce convertisseur en choisissant convenablement les deux courants de référence pour l'axe q et l'axe d comme suit :

. Pour un fonctionnement à facteur de puissance unitaire caractérisé par une puissance réactive nulle et des distorsions harmoniques des courants très faibles, la référence de la composante du courant sur l'axe q est choisie égale à zéro ;

. La composante du courant sur l'axe d dépend de la différence entre la tension de référence et celle réelle de l'étage continu à la sortie du redresseur, et l'appel de puissance par la machine. Un régulateur de type PI ayant comme entrée l'erreur de tension de l'étage continu par rapport à sa référence, peut répondre à cette exigence.

On a opté pour ce convertisseur à MLI qui forme avec le convertisseur coté rotor une alimentation électrique en double pont à MLI permettant la bidirectionnalité de l'écoulement de puissance et la réduction de la pollution harmonique.

III.7.3. Modélisation du convertisseur coté du rotor

Un onduleur autonome (à commande MLI) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, à fréquence fixe ou variable. Il est constitué dans le domaine des puissances élevées par des transistors ou des thyristors GTO ; surtout dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable. Pour les puissances moins élevées, on utilise les transistors à commutation rapide [44].

Cet onduleur à commutations commandées est constitué de trois branches disposées de la même manière que dans le redresseur commandé, voir figure (III.36) :

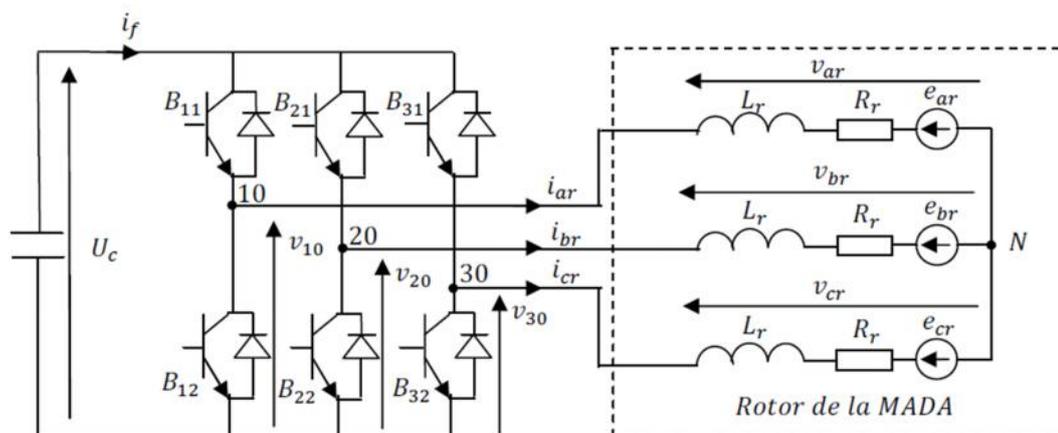


Fig. (III.36): Schéma de principe de l'onduleur triphasé

De la même manière que pour le redresseur à commutation forcée, on introduit d'autres variables caractérisant l'état des interrupteurs qui prennent 1 si l'interrupteur B_{i1} est fermé ou 0 s'il est bloqué, et on déduit l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \frac{Uc}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

Le courant filtré peut s'écrire :

$$i_f = f_{11}i_{ar} + f_{12}i_{br} + f_{13}i_{cr} \quad (III.33)$$

Ces variables de commande f_{i1} présentent aussi des signaux logiques déduits de l'application de la technique de commande à MLI. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés comme pour le redresseur commandé en courant par une comparaison à hystérésis entre les courants de sortie i_{abcr} et les courants de référence i_{abcref} . Les états des interrupteurs sont déduits selon les règles suivantes :

Si $i_{arref} - i_{ar} \geq \Delta i$ alors $f_{11} = 0$ et si $i_{arref} - i_{ar} \leq -\Delta i \Rightarrow f_{11} = 1$.

Si $i_{brref} - i_{br} \geq \Delta i$ alors $f_{21} = 0$ et si $i_{brref} - i_{br} \leq -\Delta i \Rightarrow f_{21} = 1$.

Si $i_{crref} - i_{cr} \geq \Delta i$ alors $f_{31} = 0$ et si $i_{crref} - i_{cr} \leq -\Delta i \Rightarrow f_{31} = 1$.

III.8. Résultats de simulation du système onduleur-MADA

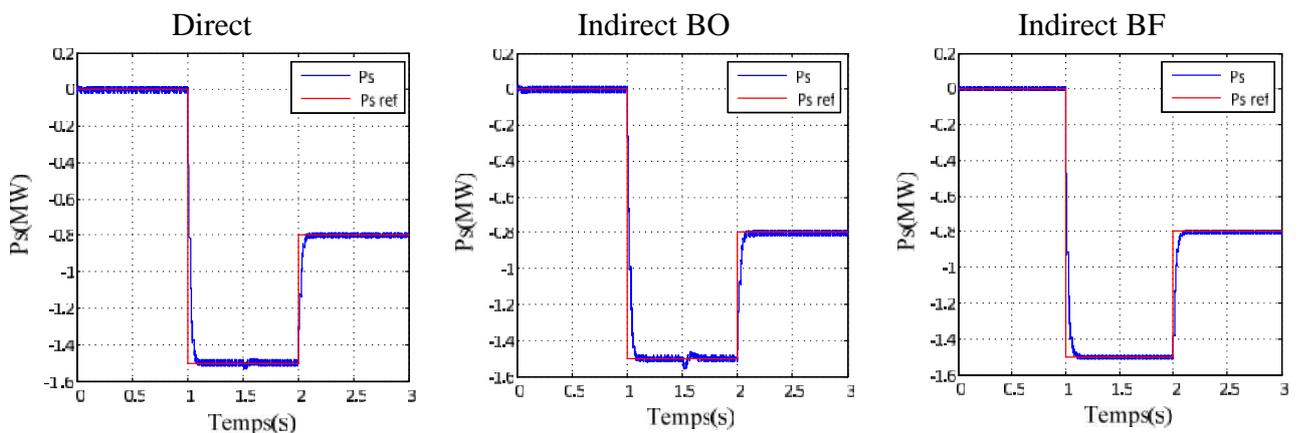


Fig. (III.37): Puissance Active statorique

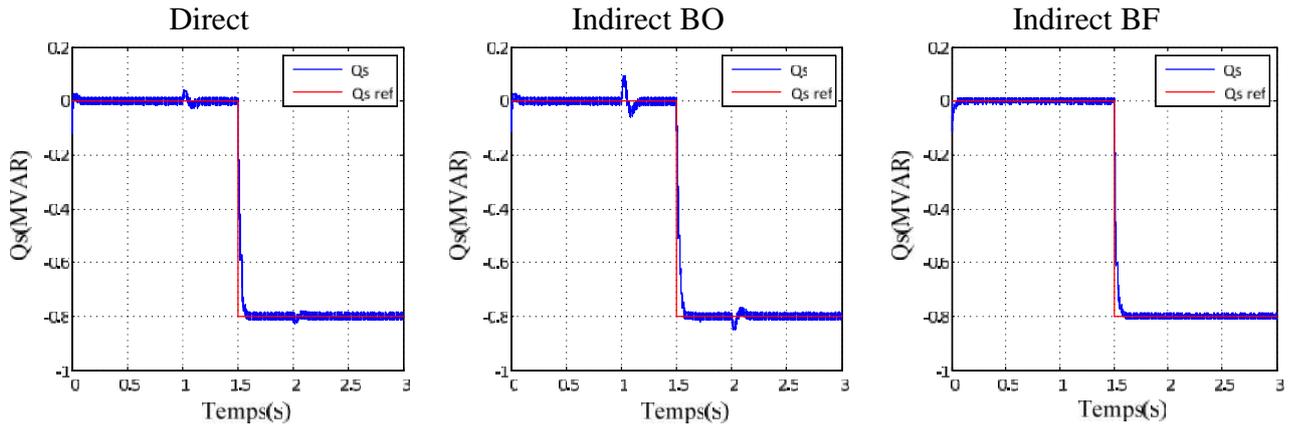


Fig. (III.38): Puissance réactive statorique

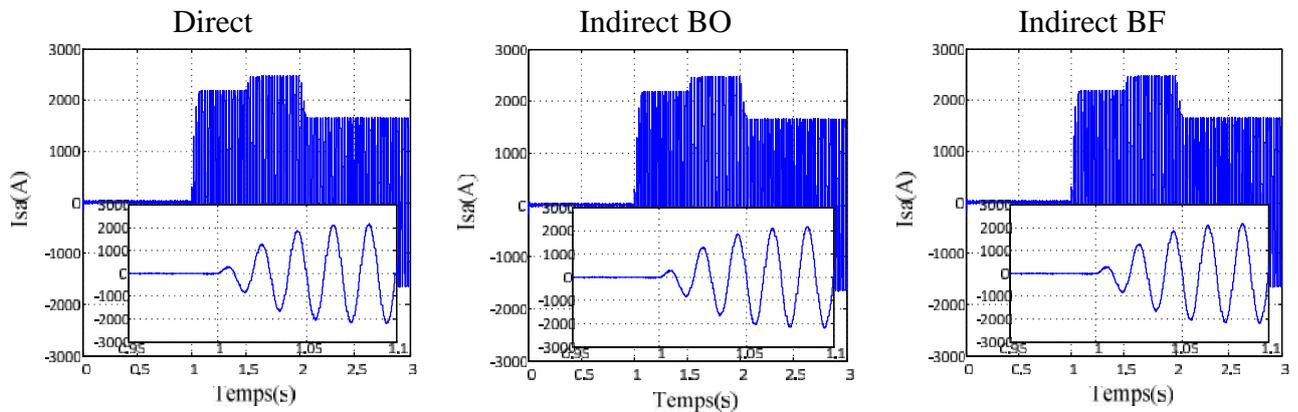


Fig. (III.39): Courant d'une phase statorique

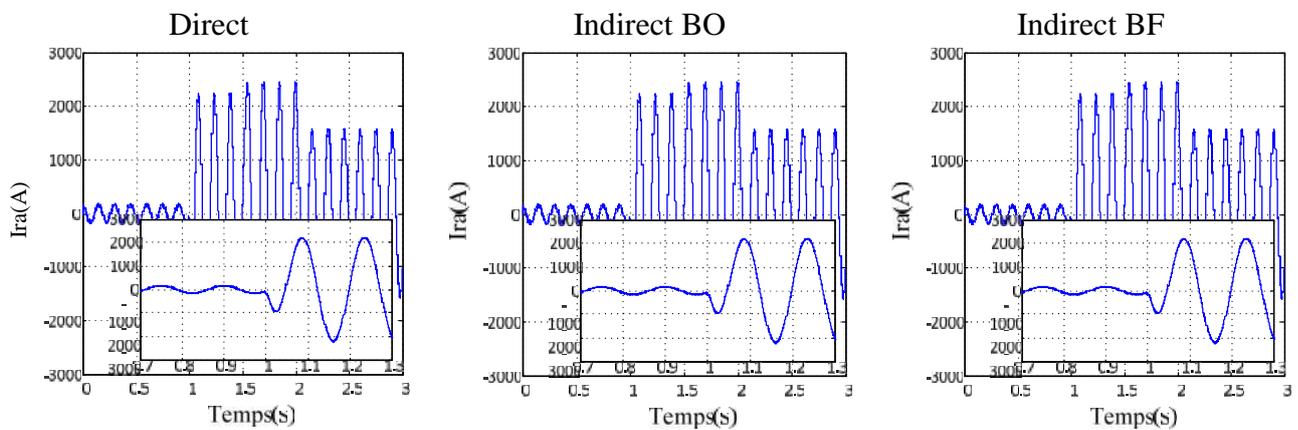


Fig. (III.40): Courant d'une phase rotorique

Les résultats de simulation ci-dessus montrent l'efficacité de la commande en puissances de la MADA pour les trois méthodes étudiées. En effet, les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application des échelons de puissance et des fluctuations de puissance pour la méthode en boucle ouvert, particulièrement la puissance réactive, dues à l'absence d'un boucle de régulation sur les puissances pour cette méthode, ces oscillations et ces

fluctuations de puissances sont bien compensées pour les méthodes en boucle fermé (directe et indirecte en boucle fermé).

III.9. Résultat de simulation de la chaîne éolienne

Le test de performance de la chaîne éolienne est fait en considérant un vent de vitesse variable (montré dans le deuxième chapitre). La machine étant raccordée à un réseau de grande puissance d'une tension de 690 V d'amplitude et d'une fréquence de 50 Hz. Les résultats de simulation de toute la chaîne éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

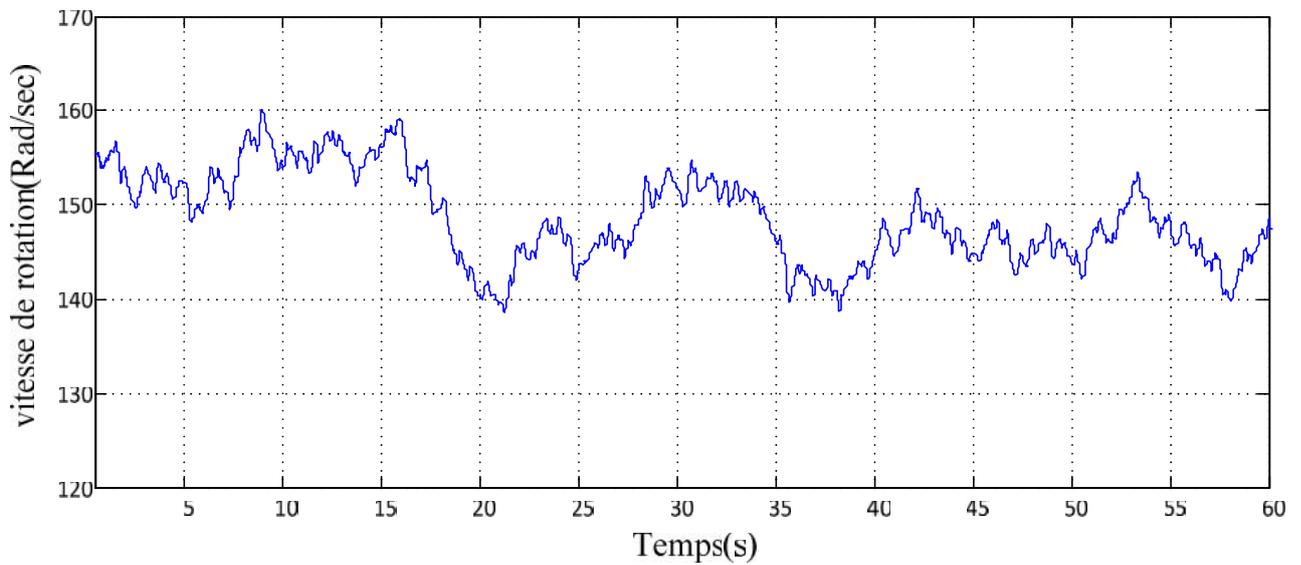


Fig. (III.41): vitesse de rotation de la MADA

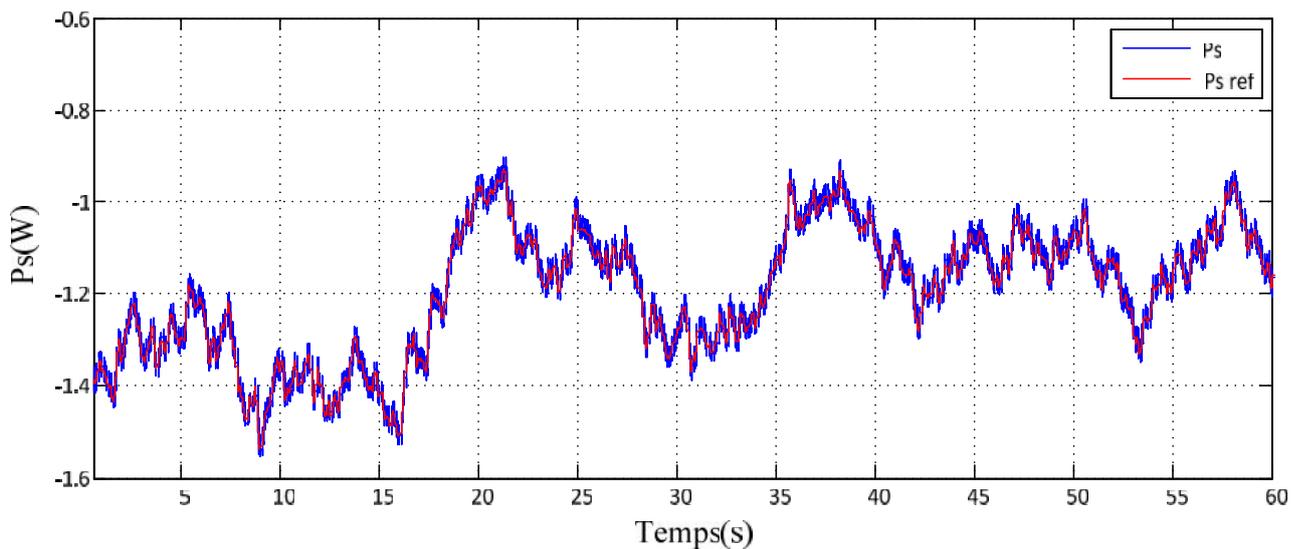


Fig. (III.42): Puissance active statorique

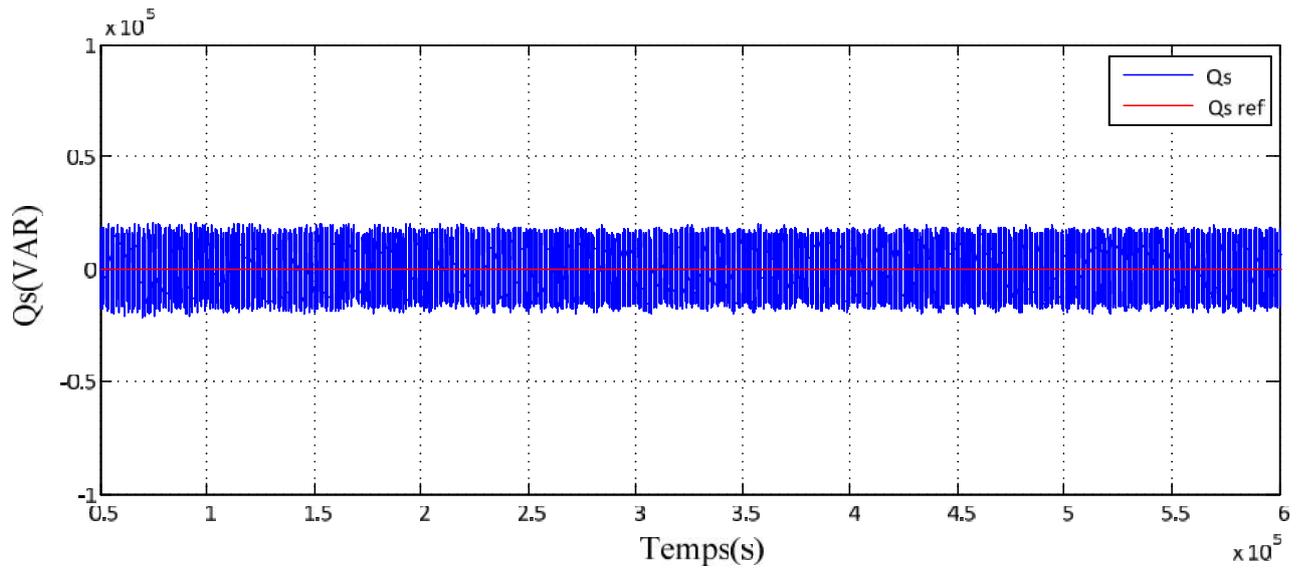


Fig. (III.43): Puissance réactive statorique

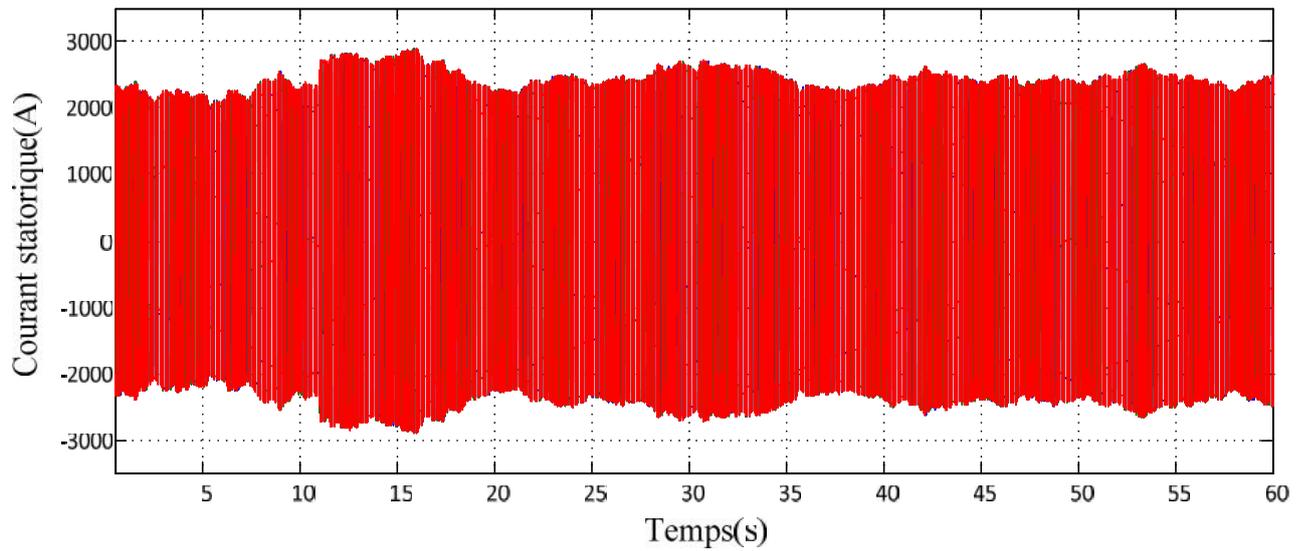


Fig. (III.44): Courant statorique

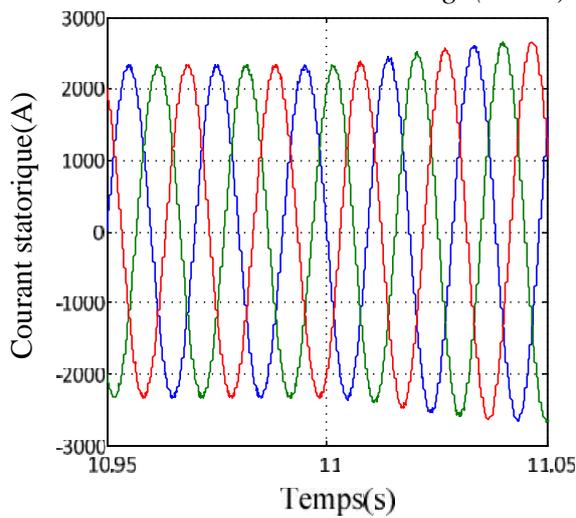


Fig. (III.45): Courant statorique (Zoom 01)

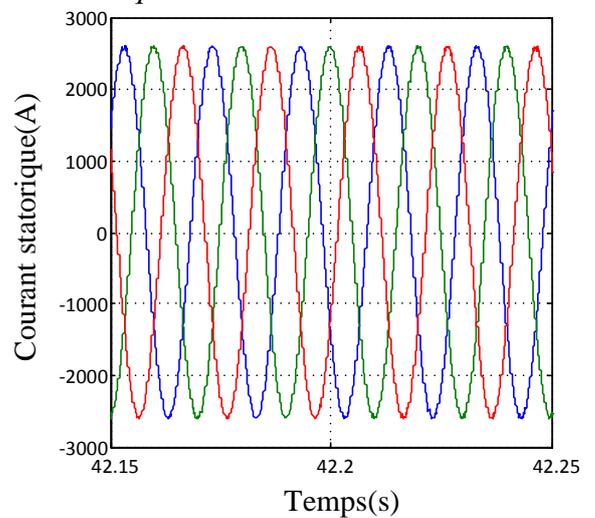


Fig. (III.46): Courant statorique (Zoom 02)

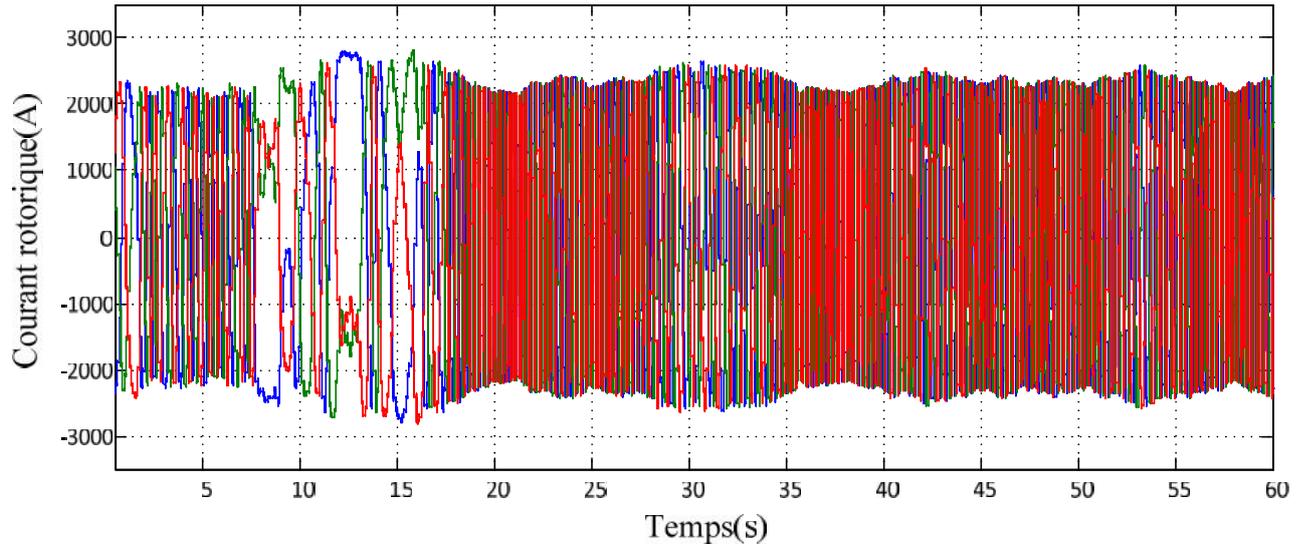


Fig. (III.47): Courant rotorique

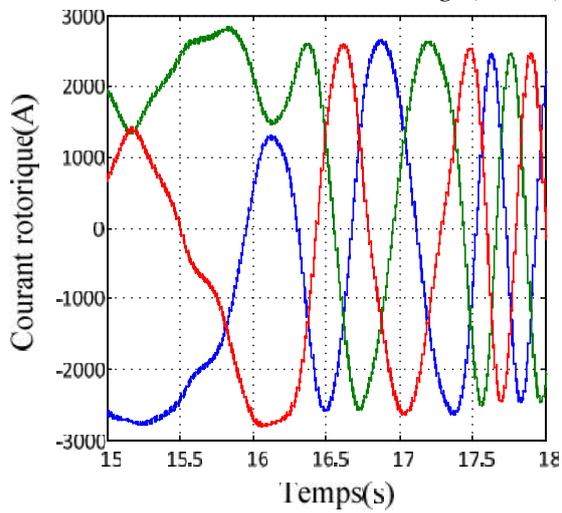


Fig. (III.48): Courant rotorique (Zoom 01)

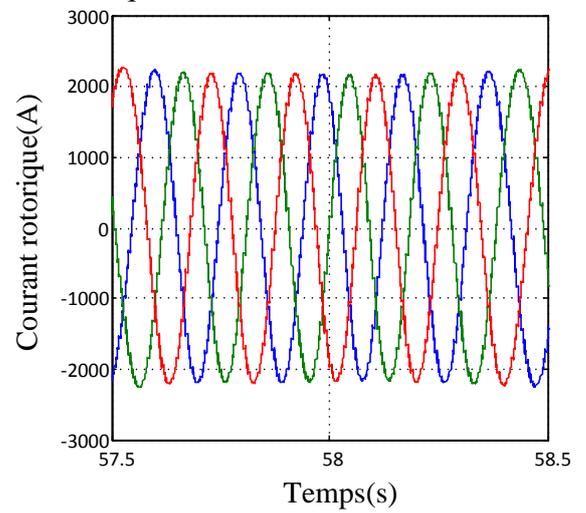


Fig. (III.49): Courant rotorique (Zoom 01)

III.10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux rotorique permet de découpler les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active

Dans ce chapitre, nous avons évalué et examiné par simulation les performances des différents systèmes de régulations des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA en mode générateur pour un fonctionnement déterminé. D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que la méthode directe de réglage des puissances présente la simplicité à mettre en œuvre.

En effet, la méthode indirecte avec boucle de puissance permet d'obtenir un système de réglage performant pour un fonctionnement de la MADA, ainsi qu'elle présente l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permet d'assurer la protection de la DFIM en limitant les courants. Cette dernière, permette d'avoir un fonctionnement optimal du système de conversion électrique. Cependant, elle présente une complexité à mettre en œuvre.

Conclusion
générale

Conclusions générales

Lors de cette étude nous avons modélisé un système global de génération d'énergie électrique à partir d'énergie éolienne. Celle-ci a été suivie d'une commande en vue d'atteindre les meilleures performances.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

- L'établissement d'un état de l'art relatif aux convertisseurs électromécaniques utilisant la MADA.
- la configuration de la DFIM qui consiste à connecter le stator directement au réseau, ainsi que le rotor est alimenté à travers un convertisseur de puissance, grâce aux avantages présentés par cette dernière dans le domaine de la génération à vitesse variable notamment dans les systèmes éoliens. L'avantage principal de cette configuration réside dans le fait que le convertisseur de puissance au niveau rotorique traite seulement une fraction de 20 à 30 % de la puissance nominale du système complet de conversion pour une vitesse d'entraînement autour de celle de synchronisme. C'est cette configuration que nous avons retenu dans notre étude.
- La synthèse des travaux afin de mieux cerner le projet. Cette étape s'est intéressée à l'optimisation du rendement de la MADA dans un système éolien (MPPT). Deux types de commandes ont été élaborés. Ils reposent sur deux principes différents.

L'un utilisant la vitesse du vent pour commander la MADA, l'autre estimant la valeur de la puissance active statorique de référence à partir de la vitesse mécanique de rotation de la machine. L'avantage que procure la deuxième méthode en terme de robustesse par rapport aux perturbations dues aux soudaines rafales de vent a été la raison de son choix lors de la simulation.

- L'établissement d'une stratégie de commande afin d'imposer des références de puissance actives et réactives, de permettre un fonctionnement à vitesse variable et de conforter ainsi notre problématique.

Plusieurs structures de contrôle ont été donc établis en vue de les comparer et d'en retenir le meilleur. Ainsi, nous avons choisi la structure indirecte en boucle fermée a cause de sa robustesse et sa capacité à limiter les courants rotoriques donc à protéger le bobinage de la machine et le régulateur PI de par sa simplicité et de ses performances convenables.

Conclusions générales et perspectives

Grâce à la commande en puissance active et réactive de la MADA, celle-ci devient un outil intéressant pour le gestionnaire du réseau. L'opérateur système est ainsi doté d'un dispositif qui lui est utile car ces puissances peuvent être simplement contrôlées.

A travers cette étude nous obtenons non seulement un moyen générant de l'énergie électrique avec un rendement optimal, mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité du réseau en compensant donnant un facteur de puissance qui égal à l'unité.

Nous avons pu noter alors, que la MADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Perspectives :

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MADA sont envisageables:

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
 - Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
 - Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
 - L'intégration d'un système de stockage inertiel.
 - L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.
 - Réalisation de la stratégie de contrôle proposée.
-

Annexes

Annexe A : Paramètres de la turbine

| | |
|----------------------------------|-----------------------|
| <i>Vitesse nominale du vent</i> | <i>12m/s</i> |
| <i>Rayon de la turbine</i> | <i>32m</i> |
| <i>Rapport de multiplication</i> | <i>50</i> |
| <i>Cp max</i> | <i>0.48</i> |
| <i>Lamda optimale</i> | <i>8.12</i> |
| <i>Inertie</i> | <i>10³</i> |
| <i>Coefficient de frottement</i> | <i>0.0071</i> |

Annexe A : Paramètres de la MADA

| | |
|--|---------------------|
| <i>Puissance nominale P</i> | <i>5MW</i> |
| <i>Tension statorique nominale Vsmax</i> | <i>690V</i> |
| <i>Tension rotorique nominale Vrmax</i> | <i>20V</i> |
| <i>Résistance statorique</i> | <i>0.012 Ohm</i> |
| <i>Résistance rotorique</i> | <i>0.021 Ohm</i> |
| <i>Inductance statorique</i> | <i>1.7507 e-4 H</i> |
| <i>Inductance rotorique</i> | <i>2.0372e-4H</i> |
| <i>Inductance mutuelle</i> | <i>0.0135 H</i> |
| <i>Vitesse de rotation nominale</i> | <i>1440 tr/min</i> |

Annexe C : les Gains des régulateurs PI

| <i>Méthode</i> | | <i>K_p</i> | <i>K_i</i> |
|--|----------------------------|----------------------|----------------------|
| <i>Méthode direct</i> | | <i>2.7640e-005</i> | <i>0.0015</i> |
| <i>Méthode indirect en boucle ouvert</i> | | <i>0.0188</i> | <i>1.05</i> |
| <i>Méthode indirect en boucle fermée</i> | <i>Boucle de courant</i> | <i>0.0376</i> | <i>2.1</i> |
| | <i>Boucle de puissance</i> | <i>0.3</i> | <i>60</i> |

Annexe D : paramètre de l'alimentation coté rotorique

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Tension continue de référence</i> | <i>400 V</i> |
| <i>Inductance du filtre</i> | <i>01 mH</i> |
| <i>Capacité du bus continue</i> | <i>500 mF</i> |
| <i>Gain proportionnel</i> | <i>55.5277</i> |
| <i>Gain intégral</i> | <i>3.0843^e+3</i> |

Références bibliographiques

- [1] A.MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
 - [2] F. POITIERS « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
 - [3] F. J. POZA LOBO « Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable » Thèse de Doctorant. Ins Nat. Poly Grenoble. 2003.
 - [4] A. BOYETTE « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, GREE de Nancy, 2006.
 - [5] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat, ÉNSAM France, 2003.
 - [6] B. MULTON « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques » Rapport de synthèse ECRIN (L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables), Paris, France, Mai 2002.
 - [7] N. MEKKAOUI « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèse de Magister, Université de BATNA, 2004.
 - [8] B. MULTON « Aérogénérateurs électriques» Master Recherche STS IST-SPEE Paris 11 – ENS Cachan, France 2009.
 - [9] N. LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005..
 - [10] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2010 », Avril 2011, Allemagne,
 - [11] Z. TIR «Contribution à l'étude d'un aérogénérateur asynchrone en cascade» Thèse de Magister, Université de SETIF, 2010.
 - [12] N. Kasbadji Merzouk « Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ? » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7
-

Références bibliographiques

- [13] L. HAMANE « les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11.
- [14] L. LECLERCQ « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » Thèse de doctorat, LEEP de Lille, 2004.
- [15] M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [16] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [17] M. SIDDO « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » PFE, ENP d'Alger, 2007.
- [18] A. GAILLARD « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [19] S. METATLA « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2009.
- [20] T. BURTON, D. SHARPE, N. JENKINS, E. BOSSANYI. « Wind energy handbook ». John Wiley & Sons 2001.
- [21] F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ. « Wind turbine control systems, principles, Modeling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [22] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008.
- [23] F. IOV, A. D. HANSEN, P. SORENSEN, F. BLAABJERG. « Wind turbine blockset in matlab/Simulink, general overview and description of the models ».
- [24] A. D. HANSEN, C. JAUCH, P.SØRENSEN, F. IOV, F. BLAABJERG. « Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT ». Riso National Laboratory, Roskilde. Denmark, December 2003.
- [25] C. NICHITA, D. LUCA, B. DAKYO, E. CEANGA. « Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators ». IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, no. 4, pp 523- 529, December 2002.
-

Références bibliographiques

- [26] S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA. « Stability augmentation of a grid-connected wind farm ». Springer 2009.
- [27] Y.BENCHERIF. «Modélisation et commande d'une machine asynchrone a double alimentation pour la production de l'énergie éolienne» Thèse de Magister, ENP, 2008.
- [28] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008.
- [29] B. BOUKHEZZAR. « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable ». Thèse de doctorat, université paris XI 2006.
- [30] I. BOLDEA. « Variable speed generators ». Taylor & Francis 2006.
- [31] A. NESBA. « Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat d'état, ENP, 2007.
- [32] O. Chee-Mun. « Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink ». Printice hall, 1998.
- [33] Gergaud O. « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, France, 2002.
- [34] Leonhard W. «Control of electrical drives», 2nd edition, Springer, New York, 1997.
- [35] Nakra H. L. et Duke B. «Slip power recovery induction generator for large vertical axis wind turbines», IEEE Trans. On Ener. Conv., vol. 3, no. 4, pp.733-737, 1988.
- [36] Datta R. ET. Ranganathan V. T, «Decoupled control of active and reactive power for a grid connected doubly fed induction machine without position sensors», IEEE Tran. On industry applications, pp. 2623-2628, 1999.
- [37] Xu Q. L., et Cheng W., «Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme», IEEE Tran. on industry application, vol. 31, no. 3, pp.636-642, 1995.
- [38] R. KRISHNAN. « Electric motor drives modeling, analysis and control». Prentice Hall, 2001.
-

Références bibliographiques

- [39] D. AOUZELLAG, K. GHEDAMSI, E.M. BERKOUK. « Network power flux control of a wind generator ». *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 3, pp 615-622, Elsevier 2009.
- [40] N. P. QUANG, J.-A. DITTRICH. « Vector control of three-phase ac machines ». Springer, 2008.
- [41] K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E.M. Berkouk, « Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system», *Renewable energy*, Elsevier, vol. 33, no.9, pp. 2145–2156, 2008.
- [42] S. El Aimani «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2004, France.
- [43] ADEME Département Energies Renouvelables « Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens » ADEME Editions, 2001, ISBN 2-86817-583-X
- [44] R. Mukund Patel «Wind and Solar Power Systems» Second Edition 2006 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press of Taylor & Francis Group.
- [45] A. MEHDARY «Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une aéroturbine», 6^{èmes} Journées des doctorants, Laboratoire des sciences de l'information et des systèmes LSIS, université de St Jérôme, Marseille, 2009.
-

يقدم هذا العمل دراسة طرق التحكم في المولد الحثي ثنائي التغذية المستعمل في تحويل الطاقة الهوائية لإنتاج الكهرباء من اجل ذلك قمنا بإنشاء نموذج لكل مكونات المولد الهوائي (الناعورة المولد الحثي ثنائي التغذية و السلسلة المتكونة من المموج و المقوم) بهدف توليد اكبر قدر ممكن من الطاقة قمنا باستعمال تقنية التحكم الشعاعي و التي تسمح بدورها في التحكم في الطاقة الفعلة و الردية. لتحقيق هذا التحكم استخدمنا عدة طرق كما حللنا و قارنا اداء هذه الطرق المستعملة في النظام المذكور سالفاً. تغذية العضو الدوار كانت عن طريق المموج المتحكم فيه بتقنية تعديل طول النبضة بواسطة التحكم في التيار و ذلك للحفاظ على جودة الشبكة. اختتمت هذه الدراسة بمحاكاة المولد الهوائي و استخلصنا من ذلك ان الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية لها قدرة جيدة على العمل في التطبيق السالف الذكر.

الكلمات المفتاحية

الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية. المولد الهوائي. التتميط. مموج. مقوم. تحكم شعاعي.

Résumé

Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, MADA et cascade redresseur – onduleur).

Afin d'atteindre le point de fonctionnement à puissance produite maximale (MPPT), une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectuées par trois méthodes, Les performances du dispositif ont été analysées et comparées en termes de suivi de consigne et rapidité.

La MADA étant pilotée par le rotor nous avons appliqué la technique de commande par MLI et pour éviter la dégradation du réseau nous avons utilisé la technique MLI à hystérésis.

Cette étude a été conclue par la simulation de l'ensemble de l'éolienne. Nous avons pu ainsi constater la capacité de la MADA à intégrer ce genre d'application.

Mots clés :

Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, modélisation, onduleur, redresseur, commande vectorielle.

Abstract

This work presents the modeling and the control of the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production. With this intention, a model of the different components of the wind generator (Turbine, DFIM and cascaded converter- inverter) was established.

The maximum power point tracking control was done by a vector control of the generator with active and reactive stator powers as control variables. This control is elaborated by three methods. The performances of the system are analyzed and compared in terms of references tracking and rapidity.

The converter is used for drive the DFIM. For this reason we used the PWM technique to control this device and in order to limit the damage of the network we used PWM hysteresis technique.

This study was concluded by a simulation of the wind generator. We observed at a result, that the DFIM is able to be used in the wind generation application.

Keywords:

Doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, inverter, converter, vector control.