



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



BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté Des Sciences De l'Ingéniorat

Année 2022

Département d'Electromécanique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion éolienne couplée à un réseau électrique.

Option : Electromécanique

Présentée par :

CHEBEL AHLEM

Soutenu publiquement le 16 / 03 / 2022 devant le jury:

HEROUS LAZHAR	<i>Président</i>	<i>Prof</i>	U.ANNABA
BENRETEM ABDELOUAHAB	<i>Rapporteur</i>	<i>Prof</i>	U. ANNABA
IVAN DOBREV	<i>Co-encadreur</i>	<i>Dr</i>	ENSAM PARIS
BOURAS SLIMANE	<i>Examineur</i>	<i>Prof</i>	U. ANNABA
KHELIL KHALED	<i>Examineur</i>	<i>Prof</i>	U. SOUK AHRAS
ZAHZOUH ZOUBIR	<i>Examineur</i>	M C A	U. SOUK AHRAS

Avant-propos

*A cœur vaillant rien d'impossible
A conscience tranquille tout est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessin
Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent
En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout notre unique et seul atout
Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance
Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal
Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal
Espérant des lendemains épiques
Un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri
Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys
Je prie dieu que cette soutenance fera signe de persévérance
Et que je serai enchantée par notre travail honoré.*



Remerciements

« *L'encre du savant est plus sacrée que le sang du martyr* »

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donnée la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur **BENRETEM Abdelouaheb** professeur à Université Badji-Mokhtar-Annaba, pour le temps qu'il m'a accordé tout au long de cette thèse, pour ses grandes compétences scientifiques, pour ses conseils, ses remarques toujours constructives et ses remarquables qualités humaines. Dans cette thèse, j'exprime mes sincères condoléances pour le décès du professeur **Haddouche Ali** ALLAH Yarahmo.*

*Je présente mes vifs remerciements aux membres du jury de soutenance de cette thèse de doctorat, à savoir : Monsieur **Herous lazhar**, Professeur à Université Badji Mokhtar, Annaba, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Monsieur, **Bouras slimane**, Professeur à l'Université de Université Badji Mokhtar, Annaba d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Monsieur, **khelil Khaled**, Professeur à l'Université de Université de Souk Ahras, d'avoir accepté d'évaluer ce travail d'évaluer ce travail*

*Monsieur, **Zahzouh zoubir**, Maitre de conférences -A- à l'Université de Université de Souk Ahras, d'avoir accepté d'évaluer ce travail*

Je remercie de tout mon cœur toute ma famille, mes parents, mes frères, ma sœur et mes proches qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant toute la durée de ces longues études.

CHÉBEL Ahlem.



Dédicace

☞ A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

☞ A mon cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

☞ A mes chers et adorable frères et sœur

Asma la douce, Hocine le généreux et mon cher petit frère Mohamed Yassine. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

☞ A toute ma famille CHEBEL et LATTOUI.

A mes copines et sœurs BARKAT Ibtissem et BOULEGHEB Loubna et Yasmine Ainsi qu'à mes amies et mes collègues.

CHEBEL AHLEM.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION EOLIENNE	3
I.1. Introduction	4
I.2. Bref historique	4
I.3. Gisement national et mondial du vent	6
I.3.1. Evaluation de l'énergie renouvelable dans le monde.....	6
I.3.2. Programme des énergies renouvelables en Algérie	8
I.3.2.1. Atlas de la vitesse du vent en Algérie.....	8
I.4. Evaluation du potentiel éolien dans la région d'Annaba.....	9
I.4.1. Analyse statistique de la vitesse du vent	9
I.4.2. La direction du vent.....	9
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
I.5.1. Avantages	10
I.5.2. Inconvénients	10
I.6. Classification des turbines éoliennes	10
I.7. Présentation Du Système Eolien	11
I.8. Les différents types d'éoliennes.....	11
I.8.1. Eoliennes à axe vertical « VAWT »	11
I.8.1.4. Eoliennes à axe horizontal « HAWT ».....	13
I.8.1.4.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal.....	14
I.9. Principaux composants d'une éolienne.....	15
I.10. La Vitesse du rotor	17
I.10.1. Fonctionnement à vitesse fixe	17
I.10.2. Fonctionnement à vitesse variable :	18
I.11. Générateurs électriques.....	19
I.12. Conclusion	24
I.13. Références bibliographiques	25
CHAPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME EOLIEN	27
II.1 Introduction	28
II.2. Capacités de réglages des différentes technologies d'éoliennes	28
II.3. Conversion de l'énergie éolienne.....	28
II.3.1. Eolienne isolée (autonome)	28
II.3.2. Eolienne connectée au réseau	29
II.3.3. Modélisation du vent.....	29
II.3.4. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	30
II.3.5. Théorie de Betz.....	30
II.4. Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne	31
II.4.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	31
II.4.2. Modèle de la turbine.....	31
II.4.2.1. Puissance mécanique de la turbine.....	31
II.4.2.2. Vitesse relative.....	31
II.4.2.3. Modèle analytique du coefficient de puissance.....	32
II.4.2.4. Couple mécanique de la turbine.....	33
II.4.2.5. Modèle de la partie mécanique	33
II.5. Régulation de la puissance d'une éolienne.....	34
II.5.1. Bilan des forces sur une pale	34
II.5.2. Régulation mécanique	34
II.5.2.1. Contrôle par angle de calage variable « pitch control » [PAO09].....	36
II.5.2.2. Contrôle par décrochage aérodynamique passif « passive stall control »	36
II.5.2.3. Contrôle par décrochage aérodynamique actif « active stall control »	37
II.5.3. Régulation électrique (contrôle MPPT).....	37
II.6. Résultats de Simulations	39
II.7. Interprétations des résultats	40
II.8. Conclusion.....	40
II.9. Références bibliographiques.....	41
CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	42
III.1. Introduction	43
III.2. Description du système éolien.....	43
III.3. La machine asynchrone à double alimentation (MADA).....	44
III.3.1. Définition	44
III.3.2. Structure.....	44
III.3.3. Classification des machines asynchrone à double Alimentation.....	44
III.3.4. Comparaison entre les différentes MADA	46
III.3.5. Principe et mode de fonctionnement de la MADA	47

III.3.5.1. Fonctionnement en moteur avec alimentation unique au stator	47
III.3.5.2. Fonctionnement en générateur avec double alimentation.....	47
III.3.5.3. Modes de fonctionnement de la MADA	49
III.3.6. Domaines d'application de la MADA.....	50
III.3.7. Avantages et inconvénients de la MADA	51
III.3.7.2. Inconvénients	52
III.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	52
III.4.1. Hypothèses simplificatrices.....	52
III.4.2. La mise en équation de la MADA	53
III.4.2.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé (a, b, c).....	53
III.4.2.2. Utilisation de la transformée de PARK à la MADA	54
III.4.2.3. Modèle de MADA dans le référentiel (d, q).....	55
III.4.2.4. Référentiel lié au stator (α, β).....	57
III.4.2.5. Représentation d'état dans le référentiel de Park.....	58
III.5. Modélisation des convertisseurs statiques.....	58
III.5.1. Structure du convertisseur côté machine.....	58
III.5.2. Modélisation du convertisseur côté rotor « CCM »	58
III.5.3. Choix de structure des semi-conducteurs.....	60
III.6. Simulation de la machine asynchrone double alimentation.....	60
III.6.1. Résultats de simulation de la MADA.....	60
III.8. Conclusion	68
III.9. Références bibliographiques	69
CHAPITRE IV : LES STRATEGIES DE COMMANDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE CONNETEE AU RESEAU.....	71
IV.1. Introduction	72
IV.2. La commande vectorielle de la MADA	72
IV.2.1. But et principe de la commande vectorielle	72
IV.2.2. Orientation du flux statorique.....	73
IV.2.2.1. Commande directe des puissances active et réactive :	76
IV.2.2.2. Commande indirecte des puissances active et réactive :	76
IV.2.2.3. Synthèse du régulateur PI.....	77
IV.2.3. Résultats de simulation de la MADA	78
IV.3. La commande par MLI de la MADA.....	87
IV.3.1. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tensions et sa commande à MLI.....	87
IV.3.1.1. Description de l'onduleur	87
IV.3.1.2. Principe de l'onduleur à deux niveaux	87
IV.3.1.3. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux	87
IV.3.1.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	89
IV.3.2. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI.....	89
IV.3.2.1. Modélisation du redresseur à MLI.....	89
IV.3.3. Résultats de simulation de la MADA cas en utilisant un onduleur et un redresseur à deux niveaux :	90
IV.4. Commande par la logique floue d'une MADA	94
IV.4.1. Historique et domaine d'application de la logique floue.....	94
IV.4.2. Bases générales de la logique floue	95
IV.4.2.1. Ensemble floue.....	95
IV.4.2.2. Variable et valeurs de variable linguistique	96
IV.4.2.3. Fonction d'appartenance.....	96
IV.4.2.4. Opérateurs de la logique floue.....	96
IV.4.3. Réglage et commande par logique floue	96
IV.4.4. Structure interne d'un système flou	97
IV.4.4.1. Interface de fuzzification	97
IV.4.4.2. Base de règles d'inférences.....	97
IV.4.4.3. Interface de Défuzzification	97
IV.4.5. Application de la logique floue à la commande de la MADA.....	98
IV.4.6. Résultats de simulation de la MADA cas en utilisant la commande par logique floue.....	100
IV.5. L'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique.....	102
IV.5.1. Rappel sur la production de l'énergie électrique	102
IV.5.2. Le réseau électrique.....	102
IV.5.3. Le réseau de transport.....	103
IV.5.4. Fermes éoliennes	103
IV.5.4.1. Gestion du réseau électrique	104
IV.5.4.2. Raccordement des éoliennes aux réseaux électriques	104
IV.5.4.3. Types de raccordement.....	105
IV.5.4.4. Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne.....	105
IV.6. Conclusion	106
IV.7. Références bibliographiques	107
CONCLUSION GENERALE.....	109

Liste des figures

Chapitre I :

Fig. I. 1. Ancêtres des moulins à vent. [HAU06]..... 4

Fig. I. 2. Les différents moulins à travers le monde..... 5

Fig. I. 3. Première aérogénératrice de Poul LaCour en 1891 à Askov, Danemark. [HAU06]..... 5

Fig. I. 4. Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2005–2015. 6

Fig. I. 5. Puissance des installations éoliennes cumulée installée (GW) dans les principales régions du monde. [MULT] 7

Fig. I. 6. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol. 8

Fig. I. 7. Variation saisonnière de la vitesse moyenne du vent durant la période 2005-2015. 9

Fig. I. 8. Mesures instantanées de la direction max du vent du janvier 2005 au décembre 2015. 9

Fig. I.9. Correspondance taille-puissance des éoliennes. 10

Fig. I. 10. Conversion de l'énergie cinétique du vent. 11

Fig. I. 11. Éolienne de Savonius. 12

Fig. I. 12. Éolienne de Darrieus. 12

Fig. I. 13. Eolienne de Darrieus de type H. 13

Fig. I. 14. Exemples des éoliennes horizontale. 14

Fig. I. 15. Turbines éoliennes en amont et en aval. 14

Fig. I. 16. L'éolienne E126 de 7.5MW d'ENERCON (Allemagne). 15

Fig. I. 17. Principaux composants d'une éolienne. 15

Fig. I. 18. La tour éolienne et ses composants électroniques à l'intérieur. 16

Fig. I. 19. Vue aérienne de la nacelle. 16

Fig. I. 20. Multiplicateur de vitesse. [HAU06]..... 16

Fig. I. 21. Eolienne directement connectée au réseau. 17

Fig. I. 22. Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique). 18

Fig. I. 23. Génération à puissance électrique constante (pâles orientables)..... 18

Fig. I. 24. Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS. 19

Fig. I. 25. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent. 19

Fig. I. 26. Système éolienne à base de machine asynchrone à cage d'écureuil. 20

Fig. I. 27. Générateur asynchrone à double stator. 20

Fig. I. 28. Connexion indirecte d'une machine asynchrone réseau. 20

Fig. I. 29. Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs..... 20

Fig. I.30. Système éolienne à base de MADA à énergie rotorique dissipée..... 21

Fig. I. 31. Système éolienne à base de MADA structure de Kramer..... 21

Fig. I. 32. Système éolien à base de MADA avec cyclo convertisseur. 22

Fig. I. 33. Système éolien à vitesse variable à base de MADA structure Scherbius. 22

Fig. I. 34. Système éolien à vitesse variable à base de MADA avec convertisseurs matriciel. 23

Fig. I. 35. Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable. 23

Chapitre II :

Fig. II. 1. Simulation du profile de la vitesse du vent. 29

Fig. II. 2. Représentation d'une colonne d'air. 30

Fig. II. 3. Tube de courant autour d'une turbine éolienne. 30

Fig. II. 4. Configuration d'un système de conversion de l'énergie éolienne. 31

Fig. II. 5. Coefficient de puissance pour différents types d'aérogénérateur..... 32

Fig. II. 6. Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance. 32

Fig. II. 7. Schéma bloc du modèle de la turbine. 34

Fig. II. 8. Bilan des forces sur une pale. 34

Fig. II. 9. Courbe typique d'une turbine éolienne. 35

Fig. II. 10. Variation de l'angle de calage d'une pale..... 36

Fig. II. 11. Système pitch contrôle, utilisant : (a) un actionneur hydraulique, (b) 3 moteurs électriques placés à l'intérieur du moyeu..... 36

Fig. II. 12. Turbine éolienne commandée par « passive stall ». 37

Fig. II. 13. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent. 38

Fig. II. 14. Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne. 39

Fig. II. 15. (a) La vitesse mécanique et (b) la puissance produite. 39

Fig. II. 16. (a) Le coefficient de puissance et (b) La vitesse spécifique. 40

Chapitre III :

Fig. III.1. Système de conversion éolienne à base de la MADA..... 43

Fig. III. 2. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA. 44

Fig. III. 3. Schéma de principe de la MADA à rotor bobiné simple. 44

Fig. III. 4. Machine asynchrone à rotor bobiné (standard). [AGU10]..... 45

Fig. III. 5. Schéma de principe de la MADA en cascade asynchrone..... 45

Fig. III. 6. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère..... 45

Fig. III. 7. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais..... 46

Fig. III. 8. Caractéristique mécanique couple/vitesse de la machine asynchrone..... 48

Fig. III. 9. Configuration des enroulements et des flux dans une machine synchrone et dans une MADA..... 49

Fig. III. 10. Modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation..... 49

Fig. III. 11. Représentation spatial des enroulements de la MADA. 52

Fig. III. 12. Modèle électrique d'une phase..... 53

Fig. III. 13. Représentation de la MADA dans le système biphasé et triphasé..... 55

Fig. III. 14. Passage du triphasé au biphasé et l'inverse. 55

Fig. III. 15. Repère (d,q) de la machine MADA..... 55

Fig. III. 16. Définition des axes réels de la MADA par rapport au référentiel ($\alpha \beta$)..... 57

Fig. III. 17. Structure de la MADA avec un convertisseur côté machine CCM.....	58
Fig. III. 18. Schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé.....	59
Fig. III. 19.(a) La vitesse mécanique et (b)le couple électromagnétique.....	61
Fig. III. 20. Les courants statoriques et rotoriques d'une phase (Isa et Ira).....	61
Fig. III. 21. Les composantes des courants statoriques (Isd et Isq) selon le repère (d,q).....	62
Fig. III. 22. Les composantes des courants rotoriques (Ird et Irq) suivant le repère (d,q).....	63
Fig. III. 23. Les composantes des flux statoriques (ϕ_{sd} et ϕ_{sq}) selon le repère(d,q).....	63
Fig. III. 24. Les composantes des flux rotoriques (ϕ_{rd} et ϕ_{rq}) selon le repère(d,q).....	64
Fig. III. 25. La vitesse mécanique.....	65
Fig. III. 26. Le courant statorique Isa.....	65
Fig. III. 27. Le courant rotorique Ira.....	65
Fig. III. 28. Le couple électromagnétique (N.m).....	65
Fig. III. 29. La vitesse mécanique.....	66
Fig. III. 30. Le courant statorique Isa.....	66
Fig. III. 31. Le courant rotorique Ira.....	66
Fig. III. 32. Le couple électromagnétique.....	66
Fig. III. 33. La vitesse mécanique.....	67
Fig. III. 34. Le courant statorique Isa.....	67
Fig. III. 35. Le courant rotorique Ira.....	67
Fig. III. 36. Le couple électromagnétique.....	67
Chapitre IV:	
Fig. IV. 1 . Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la MCC.....	73
Fig. IV. 2. Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique.....	74
Fig. IV. 3. Bloc de contrôle à flux orienté.....	75
Fig. IV. 4. Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	76
Fig. IV. 5. Schéma bloc de la commande directe.....	76
Fig. IV. 6. Schéma bloc de la commande indirecte.....	76
Fig. IV. 7. Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.....	77
Fig. IV. 8. Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.....	77
Fig. IV. 9. Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	78
Fig. IV. 10. La puissance active statorique et sa reference.....	78
Fig. IV. 11. La puissance réactive statorique et ses references.....	79
Fig. IV. 12. Les flux statoriques selon l'axe d et q.....	79
Fig. IV. 13. Les courants statoriques selon l'axe d et q.....	80
Fig. IV. 14. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.....	80
Fig. IV. 15. Puissance active statorique.....	81
Fig. IV. 16. Puissance réactive statorique.....	81
Fig. IV. 17. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.....	81
Fig. IV. 18. Puissance active statorique.....	81
Fig. IV. 19. Puissance réactive statorique.....	82
Fig. IV. 20. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.....	82
Fig. IV. 21. Puissance active statorique.....	82
Fig. IV. 22. Puissance réactive statorique.....	83
Fig. IV. 23. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.....	83
Fig. IV. 24. Puissance réactive statorique.....	83
Fig. IV. 25. Zoom sur les puissances active et réactive statorique et ses references.....	84
Fig. IV. 26. Profil du vent appliqué.....	84
Fig. IV. 27. La vitesse mécanique.....	84
Fig. IV. 28. Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.....	85
Fig. IV. 29. Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.....	86
Fig. IV. 30. Les flux statoriques selon l'axe d et q.....	86
Fig. IV. 31. Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	88
Fig. IV. 32. Principe de commande en MLI-ST.....	89
Fig. IV. 33. Structure du redresseur à MLI.....	90
Fig. IV. 34. Puissance active statorique.....	91
Fig. IV. 35. Puissance réactive statorique.....	91
Fig. IV. 36. Les courants statoriques et rotoriques selon les axes d et q.....	92
Fig. IV. 37. Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.....	93
Fig. IV. 38. Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.....	93
Fig. IV. 39. La vitesse mécanique et le couple électromagnétique avec et sans onduleur.....	94
Fig. IV. 40. Fonction d'appartenance des entrées (e) et de la sortie(u).....	96
Fig. IV. 41. Structure interne d'un système flou.....	97
Fig. IV. 42. Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive.....	98
Fig. IV. 43. La commande floue de la MADA.....	98
Fig. IV. 45. La vitesse mécanique.....	100
Fig. IV. 46. Le couple électromagnétique.....	101
Fig. IV. 47. Puissance active statorique.....	101
Fig. IV. 48. Puissance réactive statorique.....	101
Fig. IV. 50. Schéma d'un réseau électrique incorporant de l'énergie renouvelable.....	103
Fig. IV. 51. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives.....	103
Fig. IV. 52. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [Rob06].....	104
Fig. IV. 53. Intégration d'un système de stockage.....	106

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau. I. 1. Synthèse du marché éolien par grandes zones géographiques en 2017 et 2018 [GWEC].	7
Tableau. I. 2. Classification des turbines éoliennes.	10
Tableau. I. 3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical [POI03].	13
Tableau. I. 4. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal [POI03].	15

Chapitre III :

Tableau. III. 1. Classification et comparaison des différentes variantes de la MADA. [DEN10].	46
Tableau. III. 2. Modes opérationnels de la MADA.	50
Tableau. III. 3. La transformation de Concordia et de Clarke.	56

Chapitre IV:

Tableau. IV. 1. Implication floue.	96
Tableau. IV. 2. Matrice d'inférence des règles floues.	99

GLOSSAIRE

BDV : Boite de vitesse.
 BP : Bobinage de Puissance.
 BC : Bobinage de Commande.
 BDFIM: Brushless Doubly Fed Induction Machine.
 CCM : Convertisseur Coté Machine.
 CCR : Convertisseur Coté Réseau.
 CVD : Commande Vectorielle Directe.
 CVI : Commande Vectorielle Indirecte.
 CDFIM: Cascaded Doubly Fed Induction Machine.
 CF: Contrôleur flou.
 DFIG: Doubly Fed Induction Generator.
 DFM : Doubly Fed Machine
 FTBF : Fonction de Transfert en Boucle Fermée.
 FTBO : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte.
 FOC : Field Oriented Control.
 GADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.
 GSAP : Génératrice Synchronne à Aimants Permanents.
 GAS : Le générateur asynchrone à cage d'écureuil.
 GSRB : Le générateur synchronne à rotor bobiné.
 GTO: Gate Turn-Off Thyristor.
 IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.
 MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.
 MAS: Machine Asynchrone.
 MS : Machine Synchronne.
 MRV : Les générateurs à réluctance variable.
 MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
 MPPT: Maximum Power Point Tracking.
 MLI : Modulation de largeur d'impulsion.
 RLF : Régulateur logique floue.

NOTATION

Symboles spécifiques à la turbine :

V : Vitesse du vent (m /s) ;
 m : Masse de l'air (Kg) ;
 P_{disp} : la puissance disponible (W) ;
 ρ : Masse volumique de l'air (kg/m^3) ;
 R : Rayon de pale (m) ;
 E : Energie cinétique (J) ;
 S : Surface balayée par les pales de la turbine (m^2) ;
 P_m : La puissance réelle extraite par les pales du rotor (W) ;
 P_{mt} : La puissance totale théoriquement disponible (W) ;
 P_{tur} : La puissance mécanique de la turbine éolienne (W) ;
 Ω_t : Vitesse mécanique de la turbine (rad/s) ;
 λ : Vitesse relative ou Ratio de vitesse ;
 λ_{opt} : Vitesse relative optimale ;
 C_p : Coefficient de puissance ;
 β : Angle de calage des pales (deg) ;
 C_{pmax} : Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance ;
 C_{aer} : Couple sur l'axe lent (côté turbine) (N.m) ;
 G : Gain du multiplicateur ;
 Ω_g : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s) ;
 C_r : Le couple résistant (N.m) ;
 J_t : Le moment d'inertie de la turbine ($kg.m^2$) ;
 J_g : Le moment d'inertie du générateur ($kg.m^2$) ;
 J : Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice » ($kg.m^2$) ;
 C_{vis} : Couple de frottement visqueux (N.m) ;
 Ω_{mec} : La vitesse de rotation du générateur (tr/min) ;
 f_T : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine ;
 f_g : Le coefficient des frottements visqueux du générateur ;
 V_m : La vitesse maximale du vent (m/s) ;
 V_d : La vitesse de démarrage (m/s) ;
 α : Angle d'incidence des pales (deg) ;
 P_n : La puissance nominale de l'éolienne (W) ;
Paramètres de la modélisation et de la commande de la MADA :
 Ω_s : La vitesse du synchronisme (rad/s) ;
 p : Nombre de paires de pôles ;
 ω : Pulsation électrique des grandeurs rotoriques (Pulsation de glissement) (rad/s) ;

ω_r : Pulsations des grandeurs électriques rotoriques (rad/s) ;
 ω_s : Pulsations des grandeurs électriques statoriques (rad/s) ;
 Ω : La vitesse de rotation du rotor de la MADA (tr/min) ;
 g : Glissement de la vitesse de rotation ;
 n : La vitesse du rotor (tr/min) ;
 n_s : La vitesse synchrone (tr/min) ;
 f_r : Fréquence électrique des grandeurs rotoriques (Hz) ;
 P_{res} : La puissance délivrée par le réseau ou fournie par la machine (W) ;
 P_s : La puissance transitant le stator (W) ;
 P_r : La puissance transitant par le rotor (W) ;
 P_{mec} : La puissance mécanique (W) ;
 S_a, S_b, S_c : Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statorique ;
 R_a, R_b, R_c : Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés rotoriques ;
 θ : L'angle électrique entre le repère statorique et le repère rotorique (rad) ;
 R_s : La résistance d'une phase statorique (Ω) ;
 R_r : La résistance d'une phase rotorique (Ω) ;
 M : L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor (H) ;
 (d, q) : Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme) ;
 $P(\theta)$: Transformation de Park ;
 θ_s : Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d) (rad) ;
 θ_r : Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d) (rad) ;
 C_{32} : Transformation de Concordia/Clarke ;
 P_{abc} : La puissance électrique statorique instantanée (W) ;
 $(V_s)^T$: Vecteur des tensions instantanés des phases statoriques a, b et c (V) ;
 P_j : Représente la puissance perdue par effet joule au stator (W) ;
 P_r : Représente la puissance électromagnétique stockée dans le champ (W) ;
 P_{el} : Représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique (W) ;
 C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice (N.m) ;
 P_s : Puissance active statorique (W) ;
 P_r : Puissance active rotorique (W) ;
 Q_s : Puissance réactive statorique (VAR) ;
 Q_r : Puissance réactive rotorique (VAR) ;
 α, β : Axes de référentiel de Concordia/Clarke (repère de Park fixe au stator),
 σ : Coefficient de dispersion ;
 i_a : Le courant d'induit (A) ;
 i_f : Le courant d'excitation (A) ;
 P_{s-ref} : Consigne de la puissance active statorique (W) ;
 Q_{s-ref} : Consigne de la puissance réactive statorique (W) ;
 K_p, K_i : Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur PI ;
 T_r : Le temps de réponse du système (s) ;
 S_1, S_2, S_3 : Etats de commutation des interrupteurs de l'onduleur ;
 m : Indice de modulation ;
 f_p : Fréquence de porteuse (Hz) ;
 f_r : Fréquence de référence (Hz) ;
 r : Le taux de modulation ;
 U_c : La tension d'entrée du redresseur (V) ;
 V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur (V) ;

Paramètres de la commande par logique floue de la MADA

A, B : Ensemble flou ;
 U, X : Univers de discours ;
 $\mu A, \mu B$: Les fonctions d'appartenance ;
 A_i : Sous-ensemble flou ;
 $e, \Delta u$: Les ensembles flous de variables d'entrée ;
 Δe : L'ensemble flou de la variable de sortie ;
 $r(t)$: La valeur de référence ;
 $y(t)$: La valeur réelle (mesurée)
 $e(t)$: Erreur ;
 $\Delta_e(t)$: variation d'erreur ;
 $G_e, G_{\Delta e}, G_u$: sont des facteurs d'échelle ou des gains de normalisation ;
 $E(t), \Delta E(t), U(t)$: les quantités normalisées à l'entrée et à la sortie des FC.

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est devenue de plus en plus essentielle pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité est une garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation, etc.) et un facteur essentiel pour le développement économique. L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils ménagers électriques (chauffage, climatisation, lavage, médical, informatique, ... etc.) ont conduit à d'énormes besoins mondiaux en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas accès à l'électricité en raison d'une économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones d'accès difficiles et de logements dispersés [ENER].

Face à cela, et à la diminution du stock mondial d'hydrocarbures, et loin de l'utilisation de combustibles fossiles polluants (pétrole, gaz et charbon) de plus en plus invasifs et destructeurs pour l'environnement, plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables. En effet, un véritable défi mondial est pris au sérieux aujourd'hui, tant en termes de politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre (principalement du CO₂) [CAM03] à leur niveau de 1990 [NU98], et en termes d'exploitation des ressources énergétiques renouvelables. Cela a été recommandé lors de la 3^e Conférence des Parties à la Convention - Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto (Japon) en décembre 1997.

Plusieurs pays se sont lancés dans le développement et l'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que le solaire, la biomasse, la géothermie, la marée, l'hydraulique, etc... Parmi ces sources d'énergie, l'énergie éolienne est la plus prometteuse au monde en termes de développement. D'une part, parce que l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable [GHE11]; d'autre part, le soutien institutionnel et gouvernemental, ainsi que le potentiel éolien et le développement de technologies de conversion énergétique. Tous ces facteurs ont permis le développement rapide de l'énergie éolienne avec un taux de croissance annuel de 30% et une pénétration du marché de l'électricité de 12% en 2014 [GWEC].

Après des siècles d'évolution et d'autres recherches au cours des dernières décennies, plusieurs pays se sont tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans ce domaine dans le monde sont respectivement : la Chine, les États-Unis, l'Allemagne, l'Espagne, l'Inde et le Royaume-Uni. Depuis les années 1990, l'amélioration de la technologie des éoliennes a mené à la construction d'éoliennes de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Avec le développement de certains projets d'énergie éolienne « offshore », les grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde à un prix compétitif par rapport à l'énergie produite par les installations conventionnelles.

L'Algérie lance une dynamique d'énergie verte en lançant un ambitieux programme pour le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur le développement de ressources inépuisables telles que l'énergie éolienne, et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain [MEM15].

Grâce à la combinaison d'initiatives et d'intelligence, l'Algérie s'engage dans une nouvelle énergie durable. Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22000 MW entre 2011 et 2030, dont 12000 MW seront consacrés à couvrir la demande nationale en électricité et 10000 MW pour l'exportation. L'exportation d'électricité est toutefois subordonnée à l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements externes [MEM15].

Dans ce contexte général, notre étude se concentre sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, qui est devenue compétitive grâce à trois facteurs essentiels : la nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie éolienne, l'évolution de la technologie des semi-conducteurs et les nouvelles méthodes de contrôle des turbines à vitesse variable.

En effet, les éoliennes seront certainement amenées, à court terme, à fournir des services systèmes (compensation de la puissance réactive par exemple) comme les alternateurs de centrales classiques et/ou à participer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique (filtrage des courants harmoniques en particulier). De plus, les différents gestionnaires de réseaux ne pourront plus se permettre de perdre tout ou partie de la puissance installée afin de garantir la stabilité du réseau suite à un défaut d'origine électrique. C'est pourquoi les systèmes éoliens devront certainement assurer, à plus long terme, une continuité de service suite à un défaut électrique sur le réseau ou à un défaut sur un des éléments de la chaîne de conversion électromécanique (interrupteurs de puissance, capteurs...).

À l'heure actuelle, le système d'énergie éolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est le plus utilisé dans les parcs éoliens terrestres. Son principal avantage, et non le moindre, est d'avoir ses convertisseurs statiques en trois phases dimensionnés pour une partie de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un avantage économique important par rapport à d'autres solutions de conversion électromécanique possibles (machine synchrone aimant permanent par exemple). Ce type d'opération augmente l'efficacité énergétique, réduit les charges mécaniques et améliore la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. L'intérêt de la vitesse variable pour un système d'énergie éolienne est d'être en mesure de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent et d'être en mesure d'obtenir la puissance maximale de celui-ci par la MPPT (Maximum Power Point Tracking) stratégie, pour chaque vitesse, pour ce type d'application la machine asynchrone à double alimentation (MADA) associée aux convertisseurs d'électronique de puissance est aujourd'hui la machine la plus largement utilisée.

Dans la chaîne de conversion électromécanique d'un système éolien, les convertisseurs statiques triphasés à structure tension 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 techniques avancées de l'automatique issues de l'intelligence artificielle deviennent de plus en plus familières dans divers domaines d'application ces dernières années. L'intelligence artificielle est une discipline scientifique relative au traitement des connaissances et au raisonnement, dans le but de permettre à une machine d'exécuter des fonctions normalement associées à l'intelligence humaine telles que la compréhension, le raisonnement, le dialogue, l'adaptation, l'apprentissage, etc.

Le concept qui nous intéresse plus particulièrement dans la notion de l'intelligence artificielle est celui de la logique floue. L'idée forte de ce concept est la suivante : plutôt que de donner des connaissances sophistiquées à un système, on le dote de capacités à en acquérir et/ou à améliorer des connaissances simples.

Aujourd'hui, le taux de pénétration des fermes éoliennes devient de plus en plus significatif dans le réseau électrique. Donc une supervision des puissances des fermes éoliennes semble nécessaire afin de les connecter au réseau électrique sans affecter à la qualité d'énergie électrique produite.

L'objectif principal de cette thèse est de montrer qu'un système éolien basé sur une MADA peut contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique et d'utiliser des stratégies de contrôle simples pour mettre en œuvre d'un système de conversion de l'énergie éolienne connecté au réseau électrique basé sur la machine asynchrone à double alimentation. C'est donc dans ce cadre que nous développerons notre étude pour un système de conversion de l'énergie éolienne permettant de fournir de l'énergie constante au réseau tout en offrant des services système tels que la fourniture d'énergie réactive pour la correction des facteurs d'énergie. L'utilisation des différentes stratégies de contrôle sera discutée en montrant leurs avantages en termes de robustesse contre les variations paramétriques de la machine, la réduction des ondulations des puissances et du couple tout en réduisant le contenu harmonique des courants générés par la MADA.

Cette thèse est organisée en quatre chapitres, comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons une étude sur l'état de l'art des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Nous présenterons quelques statistiques sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde au cours des dernières années avec une étude du gisement national et mondial du vent. En plus, on va étudier l'évaluation du potentiel éolien dans la région d'Annaba. Nous allons décrire les différents composants qui composent l'éolienne ainsi que les différents types d'éoliennes existantes, en détaillant leurs avantages et inconvénients. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées pour montrer les avantages de la machine asynchrone à double alimentation, en particulier en haute puissance et à vitesse variable.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du système de conversion du vent, qui comprend essentiellement les caractéristiques et le fonctionnement d'une éolienne. Puis, les modèles analytiques de l'éolienne, sa modélisation et les différentes stratégies de régulation et de commande seront expliquées dans les différentes zones de fonctionnement. La stratégie de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) sera conçue en utilisant des différentes méthodes d'extraction d'énergie. Des résultats de simulation et d'expérimentation seront présentés dans l'objectif de vérifier et valider les stratégies de contrôle.
- Afin de valider l'intérêt de la vitesse variable pour un système d'énergie éolienne. Le troisième chapitre traite la modélisation et la simulation de MADA, en présentant en premier temps des généralités sur la MADA, ces différents constituants, le principe de fonctionnement, la topologie et les différentes configurations de cette machine en fonctionnement moteur et génératrice en précisant sa particularité par rapport aux autres types des machines, ainsi que ses différents domaines d'application. En plus, une classification et une comparaison des différents types de cette machine seront présentées. Ensuite la modélisation complète de la MADA. Enfin la simulation du fonctionnement de la machine sera présentée.
- Dans le quatrième chapitre, les différentes stratégies de commande d'une chaîne de conversion éolienne connectée au réseau seront représentées. D'abord, la commande vectorielle (plus spécifiquement celle avec orientation du flux statorique) va nous permettre de réaliser une commande indépendante de la puissance active et réactive de la MADA, en utilisant des régulateurs de type Proportionnel- Intégral (PI). Deux types de commandes vectorielles sont développés ici. La première appelée commande vectorielle directe (CVD) dans laquelle on effectue la régulation directement des puissances sans prendre en compte les couplages internes existants entre les énergies dans la MADA. La deuxième c'est la commande vectorielle indirecte (CVI) qui s'occupe d'abord du réglage des courants rotoriques de la MADA ensuite le réglage en cascade des puissances. En outre, nous présentons dans la deuxième partie la commande MLI de la MADA nous étudions dans un premier lieu le stator de la MADA qui est alimentée par une source triphasée et le rotor qui est connectée à un onduleur triphasé MLI. Dans le second lieu nous présentons le système complet constitué de : la machine asynchrone à double alimentation et le convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux. Ensuite, la troisième partie sera consacré au développement d'une technique basée sur la logique floue pour améliorer les performances du système, la logique floue peut expliquer le comportement de fonctionnement d'un système en termes de règles avec l'avantage de ne pas exiger la disponibilité d'information précise. Ces différentes stratégies de commande seront présentées et évaluées par des résultats de simulation. A la fin de ce chapitre l'intégration d'un parc éolien connecté à une machine asynchrone à double alimentation dans le réseau électrique sera étudiée. A ce stade, les caractéristiques des réseaux de distribution d'électricité seront présentées avec une petite généralité sur les réseaux (production, transport...), les techniques de raccordement des éoliennes au réseau électrique, l'importance de l'utilisation des systèmes de stockage seront également discutées.
- La thèse sera clôturée par une conclusion générale où la finalité de l'objectif est mise en évidence par une description des résultats dont les performances sont jugées très satisfaisantes et prometteuses. Des perspectives intéressantes seront indiquées vers la fin pour contribuer à l'amélioration du fonctionnement du système éolien basé sur la MADA.

CHAPITRE I :
ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION
EOLIENNE.

C *e chapitre est entièrement consacré aux généralités sur les systèmes éoliens, il ouvre une petite fenêtre sur le passé de « l'homme et le vent ». Un bref état de l'art sur l'énergie éolienne, y est également donné, ainsi que les différentes structures de réglage existantes et utilisées dans le domaine actuel de l'énergie éolienne.*

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est utilisée depuis longtemps dans les fermes pour moudre le grain ou pomper l'eau sous forme de moulins à vent. Le principe est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Aujourd'hui, ce principe s'applique à l'énergie éolienne dans le système d'alimentation, mais il est converti en énergie électrique par l'utilisation d'éoliennes. Le nouvel intérêt pour l'énergie éolienne depuis le milieu des années 1970 est le résultat de deux préoccupations : d'une part, la protection de l'environnement et l'économie de combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part, les développements technologiques rendent la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de la même puissance.

Bien que les éoliennes aient atteint une certaine maturité technique, la technologie des éoliennes continue d'évoluer. La dernière génération d'éoliennes fonctionne à vitesse variable. Ce type d'opération augmente l'efficacité énergétique, réduit le stress mécanique et améliore la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes en tout temps. Le vent est une variable aléatoire et très fluctuante. Les variations de puissance résultant des fluctuations du vent sont la principale perturbation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Par conséquent, les éoliennes sont considérées comme des générateurs d'énergie variables connectés à un réseau électrique, les éoliennes n'imposent pas l'amplitude de tension et ne régulent pas le rapport puissance-fréquence, c'est-à-dire qu'ils ne participent pas aux services du système, et perturbent donc la stabilité des réseaux d'autant plus que leur taux de pénétration est élevé. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies ont vu le jour pour optimiser cette production d'énergie.

I.2. Bref historique

Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Utiliser cette énergie pour faire un travail est une pratique aussi ancienne que l'histoire. Il y a environ 5000 ans, les Égyptiens ont été les premiers à exploiter cette source d'énergie dans le domaine maritime. Ils l'utilisaient pour déplacer de petits bateaux à l'aide d'une voile. Les Chinois étaient, à l'époque, les premiers à prendre la mer sur des radeaux de fortune.

Quant aux premières éoliennes, il faut remonter 4000 ans en arrière pour trouver leur origine. C'est sous le règne de Hammurabi, roi de Babylone, que les premiers systèmes d'irrigation à vent sont apparus et que les premiers moulins à vent à axe vertical pour broyer le grain étaient déjà utilisés en Perse [RIO07], des moulins à vent similaires et extrêmement primitifs ont survécu en Afghanistan jusqu'à nos jours, comme le montre la figure I.1. Peu à peu, cette technologie a commencé à se rendre dans les pays méditerranéens et en Europe centrale.



(a) Moudre les grains en Afghanistan 1977.



(b) Pompage de l'eau en Chine.

Fig. I. 1. Ancêtres des moulins à vent. [HAU06].

Bien que les éoliennes soient déjà présentes dans l'Ouest bien avant le XIII^e siècle, c'est à cette époque qu'elles ont vraiment décollé. Ils ont été appelés « moulins à vent », parce que leur utilisation principale était de moudre le grain.

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190, en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, la performance des moulins à vent a été constamment améliorée entre le 12^{ème} et 19^{ème} siècle. Dans les années 1800, environ 20 000 éoliennes étaient en service en France pour transporter l'eau d'irrigation, et aux Pays-Bas, 90 % de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait de l'énergie éolienne. Vers la fin du XIX^e siècle, des moulins à vent d'un diamètre de rotor de 20 à 30 mètres étaient présents en Europe. Ils ont été utilisés non seulement pour moudre le grain, mais aussi pour pomper l'eau. L'industrialisation a conduit à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11 % de l'énergie industrielle néerlandaise et que l'Allemagne comptait plus de 18 000 unités installées [BOY06]. D'autre part, la construction d'éoliennes à pales multiples ne s'est pas développée sur le vieux continent, mais en Amérique où elle est apparue en 1870. Il conquiert tout le pays et revient en Europe, où il a été conçu en 1876, où il est établi sous le nom de moulin américain.

Il existe plusieurs types de ces machines, la plus connue étant la machine à toile à quatre ailes. Jusqu'à la révolution industrielle, les moulins à vent et les roues à eau étaient les principaux moteurs de l'activité économique à l'époque. Au fil

des siècles, les différentes techniques de capture du vent ont été constamment perfectionnées, jusqu'à ce que la vapeur et l'électricité sonnent le glas de l'énergie éolienne pendant un certain temps. La figure I.2 montre quelques conceptions construites à travers l'Europe et les États-Unis.



(a) Moulin à vent – Danemark.



b) Tour-moulin à vent – Grec.



(c) Moulins à vent -Espagne.



(d) Moulin à vent –Allemagne.

Fig. I. 2. Les différents moulins à travers le monde.

C'est le physicien et mathématicien Lord Kelvin qui a eu la brillante idée de couplage d'un générateur électrique à un moulin à vent. Cette première étape vers les premières éoliennes modernes remonte à 1802. Mais les premières applications concluantes ont dû attendre un autre demi-siècle, lorsque Zenobe Gramme a inventé la dynamo. En 1888, la première éolienne reliée à un système de stockage d'énergie a été construite. L'idée était là, mais pas encore la performance. Il ne fallut pas longtemps avant que la performance des éoliennes monte en flèche grâce au travail du Danois Poul La Cour, qui découvrit en 1891 que le nombre de pales et leur forme ont une influence claire sur l'efficacité. Grâce à cette découverte majeure sur l'aérodynamique et l'amélioration des générateurs, les éoliennes sont devenues de plus en plus puissantes [HAU06].

Des moulins à vent qui produisaient de l'électricité, une innovation danoise de 1891, Poul La Cour fut le premier à utiliser de vieux moulins à vent pour produire de l'électricité au 19^{ème} siècle (figure I.3). Ils ont permis aux habitants des zones rurales de produire leur propre électricité pour faire fonctionner des ampoules, des outils, puis des radios. Cependant, dans les années 1930 du 20^{ème} siècle, malgré les services qu'elle avait rendus à la société, les jours de l'énergie éolienne semblaient être comptés. À mesure que la demande d'énergie augmentait et que les réseaux électriques atteignaient les zones rurales, des millions de petits moulins à vent tombèrent en désuétude et furent remplacés par de grandes centrales électriques qui brûlaient des combustibles fossiles bon marché et abondants [HAU06].



Fig. I. 3. Première aérogénérateur de Poul LaCour en 1891 à Askov, Danemark. [HAU06].

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu beaucoup de succès dans le passé. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque pour atteindre ses objectifs.

Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à combustion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation a été négligée et souvent abandonnée.

La crise pétrolière internationale de 1972 a donné un coup de pouce à l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables à grande échelle et en particulier à l'énergie éolienne. L'intégration de cette dernière dans les systèmes d'énergie électrique ne cesse d'augmenter avec un taux de croissance annuel de 24 % pour la période 2002-2006 [TSOUR09].

L'Europe continue de mener le monde en matière de capacité installée totale. En 2006, les pays ayant la capacité installée la plus élevée sont l'Allemagne avec 20 621 MW, l'Espagne et les États-Unis occupent respectivement la deuxième et la troisième place, avec chacune un peu plus de 11 603 MW installées. L'Inde est quatrième et le Danemark la cinquième. L'Asie a connu la plus forte augmentation de la capacité installée en dehors de l'Europe, avec un ajout de 3679 MW, prenant toute la capacité de plus de 10.600 MW, environ la moitié de celle de l'Allemagne. La capacité du marché chinois a été doublée grâce à de nouvelles mesures : il a atteint un seuil de 1347 MW d'énergie éolienne en 2006, soit une augmentation de 70 % par rapport à 2005. Cela porte la Chine à une capacité de 2604 MW, ce qui en fait le sixième plus grand marché dans le monde. On s'attend à ce que plus de 1500 MW soient installés en 2007. La croissance sur le marché africain et Moyen-Orient a également repris en 2006, avec 172 MW de nouvelles capacités installées principalement en Egypte, au Maroc et en Iran, portant le total à 441 MW, soit une croissance de 63%. L'Association européenne de l'énergie éolienne (EWEA) s'est fixé pour objectif de répondre aux besoins en électricité de 23 % d'énergie éolienne en Europe d'ici 2030 [TSOUT09]. Le Danemark prévoit que l'énergie éolienne couvrira 50 % de la consommation d'électricité d'ici 2025 [ELT08].

En 2008, avec plus de 8 500 mégawatts (MW) installés aux États-Unis, l'énergie éolienne a fourni 42% de la nouvelle capacité supplémentaire produite, selon les premières estimations, à partir de moins de 2 % de nouvelle capacité supplémentaire en 2004.

I.3. Gisement national et mondial du vent

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est indirectement due à la lumière du soleil de la terre. En chauffant certaines zones de la planète et en refroidissant d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air se déplacent constamment. Pour cette raison, le vent est une variable stochastique intermittente qui dépend d'une combinaison de facteurs tels que l'emplacement géographique, les saisons, l'altitude, la température et la hauteur du bassin versant. Il est particulièrement élevé pendant la période hivernale et au niveau de la mer (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

Bien que des études sur les variations temporelles et spatiales de la vitesse du vent aient été publiées dès 1942, le premier atlas des ressources éoliennes n'a été produit qu'en 1981 à Washington (États-Unis) par le Pacific Northwest Laboratory [SAI84]. En 1989, une équipe danoise de Riso Laboratory publie l'Atlas européen [SAI84]. Les premières œuvres algériennes sur le potentiel éolien ont été publiées par M. Said M et A. Ibrahim en 1984 [SAI84].

I.3.1. Evaluation de l'énergie renouvelable dans le monde

Les énergies renouvelables sont maintenant reconnues comme sources d'énergie communes dans le monde entier. Leur croissance rapide, en particulier dans le secteur de l'électricité, est le résultat de plusieurs facteurs. Il s'agit notamment de la compétitivité croissante des coûts des technologies d'énergie renouvelable, de diverses initiatives politiques ciblées, d'un meilleur accès au financement, d'une attention portée à la sécurité énergétique et aux solutions environnementales, de la demande croissante d'énergie dans les économies en développement et émergentes et de la nécessité de services énergétiques modernes. De nouveaux marchés émergent ainsi dans toutes les économies autour des énergies renouvelables centralisées et décentralisées.

L'énergie éolienne a été la principale source de production d'électricité en Europe et aux États-Unis en 2015, et la deuxième en Chine. L'augmentation mondiale de la capacité éolienne de 63 GW est un record, avec une production totale d'environ 433 GW (la figure I.4). Les pays non membres de l'OCDE (l'Organisation de coopération et de développement économiques de l'OCDE, qui comprend principalement les pays industrialisés européens et américains) ont construit la majorité des installations, la Chine en tête.

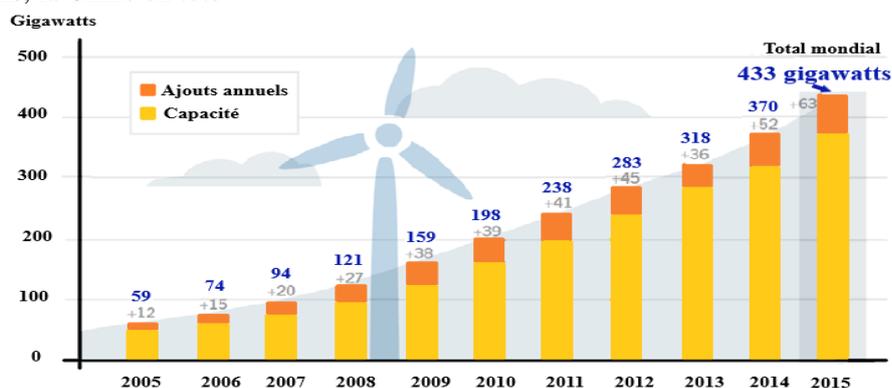


Fig. I. 4. Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne, 2005–2015.

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne avec une dynamique soutenue depuis une quarantaine d'années. En 2018, la mise en service de nouvelles installations éoliennes (onshore et offshore) a représenté 51,3 GW dans le monde. La région Asie-Pacifique représente plus de la moitié de ce marché, la Chine représentant à elle seule environ 45 % du développement annuel de l'énergie éolienne terrestre.

Fin 2018, la capacité terrestre mondiale cumulée s'élevait à 568,4 GW, à laquelle il faut ajouter une capacité de production offshore de plus de 23 GW, dont la majorité a été installée en Europe. Pour l'ensemble des pays, la production d'énergie éolienne a dépassé 1 200 TWh en 2018, contribuant ainsi à 4,6 % de la production mondiale d'électricité (tous secteurs confondus) estimée à 26 000 TWh.

La croissance du marché éolien est très inégale dans le monde (tableau I.1). Entre 2017 et 2018, l'Asie-Pacifique, qui possède la plus grande capacité installée à terre, continue de croître de plus de 10 %, mais l'Afrique et le Moyen-Orient tentent de rattraper une croissance de plus de 20 %. Au large, l'Asie-Pacifique, avec une croissance de plus de 60%, tente de rattraper l'Europe à moins de 20%.

Tableau. I. 1. Synthèse du marché éolien par grandes zones géographiques en 2017 et 2018 [GWEC].

MW éolien	Nouvelles capacités 2018	Marché annuel Évolution nouvelles capacités 2018 / 2017	Total des capacités à fin 2018	Évolution Total des capacités à Fin 2018 / Fin 2017
Total Onshore	46 820	-4,4%	568 409	8,9%
Amériques	11 940	12,9%	135 041	9,7%
Afrique, Moyen Orient	962	52,2%	5 720	20,2%
Asie-Pacifique	24 902	4,1%	256 320	10,8%
Europe	9 016	-35%	171 328	5,4%
Total Offshore	4 496	0,5%	23 140	24%
Amériques	0	N.A.	30	0%
Asie-Pacifique	1 835	43,8%	4 832	61,2%
Europe	2 661	-16,7%	18 278	16,9%
Total Onshore + Offshore	51 316	-4%	591 549	9,5%

Sur une plus longue période, la croissance de la capacité installée cumulée des centrales éoliennes dans les principales régions du monde souligne le décollage en Europe au début des années 2000 et l'importance des capacités de production en Asie-Pacifique à la veille des années 2020 (figure I.5).

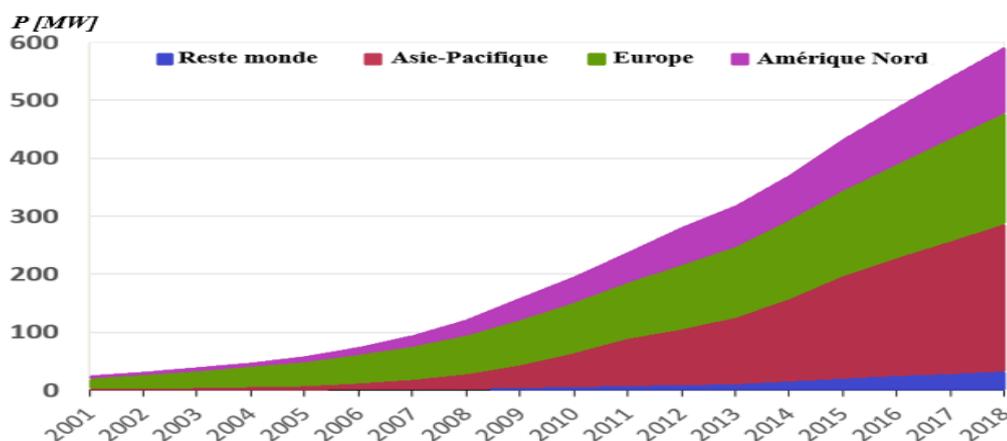


Fig. I. 5. Puissance des installations éoliennes cumulée installée (GW) dans les principales régions du monde.

[MULT]

Alors que les Etats-Unis et plusieurs pays européens ont soutenu l'industrialisation de la production d'énergie éolienne à terre (Danemark, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, entre autres) puis offshore (Royaume-Uni, Danemark, Allemagne,

Belgique, entre autres) depuis le début des années 1980 et 1990, c'est aujourd'hui la région Asie-Pacifique, et en particulier la Chine, qui domine le marché mondial de l'énergie éolienne depuis plusieurs années, en particulier dans sa composante onshore. Cette région représente 53% de la nouvelle capacité (éolien terrestre) installée en 2018 et 45% de la capacité cumulée totale installée dans le monde, toujours à terre.

Le fait que la région Asie-Pacifique et la Chine en particulier, joueront un rôle majeur dans la production d'énergie éolienne en 2020 jette un nouvel éclairage sur ce secteur et change ses fondamentaux :

- Les constructeurs historiques (VESTAS, SIEMENS GAMESA, GE, entre autres) ont diversifié leurs centres de fabrication afin de se rapprocher de leurs nouveaux marchés alors que les constructeurs chinois (GOLDWIND, UNITED POWER, ENVISION) ou indiens (SUZLON ou SENVION consolidé par des investisseurs étasuniens) se plaçaient en 2018 dans le *Top Ten* des fournisseurs ;
- Les principaux centres de recherche et développement (R&D), les constructeurs de pales, les constructeurs de mâts, les nombreux sous-traitants qui interviennent dans la filière éolienne se trouvent désormais dans la région Asie-Pacifique.
- La plupart des études, l'assemblage de composants, la construction d'éoliennes ou la construction d'infrastructures sont réalisées dans cette région; cela consolide les diverses activités industrielles liées à la production d'électricité éolienne, exerce une pression sur le coût de construction d'installations électriques et réduit ainsi le coût de production du vent MWh;

Les dispositions réglementaires relatives à l'impact sur l'environnement et sur les résidents locaux, les conditions de raccordement au réseau public d'électricité sont, dans l'ensemble, moins restrictives en Asie qu'en Europe; le délai d'étude, de développement et de construction d'installations de production d'énergie éolienne est donc beaucoup plus court (généralement trois ans) pour l'énergie éolienne terrestre en Chine, c'est-à-dire moins de la moitié du délai observé couramment dans la plupart des pays européens.

Ces dispositions encouragent le développement accéléré des installations éoliennes en Asie, et en particulier en Chine, et contribuent également à réduire les coûts financiers du financement intercalaire et donc, une fois de plus, à réduire le coût de production de l'éolien MWh, ce qui le rend plus compétitif.

I.3.2. Programme des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie a un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, en particulier dans le sud où les vitesses du vent sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m/s dans la région d'Adrar. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 1990 grâce à la production d'atlas de la vitesse éolienne et du potentiel éolien disponible en Algérie [BOUD13].

I.3.2.1. Atlas de la vitesse du vent en Algérie

La carte du vent de l'Algérie, estimée à 10 m du sol, est indiquée à la figure I.6. Les vitesses moyennes annuelles moyennes obtenues varient de 2 à 6,5 m/s. On peut voir qu'à l'exception de la région côtière (moins Béjaïa et Oran), Tassili et Beni Abbés, la vitesse moyenne du vent est supérieure à 3 m/s, [KAS01].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest.

Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

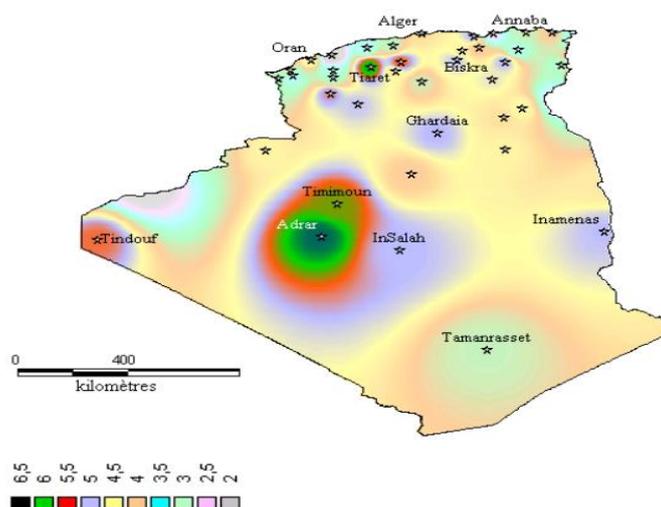


Fig. I. 6. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol.

I.4. Evaluation du potentiel éolien dans la région d'Annaba

La ville d'Annaba est située à l'extrême nord-est de l'Algérie. La région d'Annaba occupe une position stratégique sur la côte nord de la Méditerranée. Pour obtenir une évaluation claire du potentiel éolien de cette région, des observations météorologiques approfondies sont nécessaires. Cependant, l'énergie éolienne en tant que source d'énergie n'est pas suffisante pour fournir de l'électricité continue parce qu'elle est variable. S'il n'y a pas de vent soufflant, aucune énergie ne peut être produite. Ainsi, la quantité d'énergie qui peut être récoltée dans le vent dépend de la fréquence du vent et de sa direction.

La connaissance des caractéristiques du régime de vitesse du vent sur un site est importante pour l'exploitation des ressources éoliennes. Dans cette section, une analyse des données sur la vitesse du vent en termes de vitesse moyenne saisonnière et annuelle du vent et de la direction du vent est présentée.

Les données utilisées dans cette étude sont obtenues à partir des données de vitesse du vent mesurées à 10 m du sol recueilli sur la période 2005-2015 enregistrées à la station de mesure des paramètres météorologiques de l'aéroport Rabah Bitât d'Annaba.

I.4.1. Analyse statistique de la vitesse du vent

La vitesse du vent varie différemment d'un jour à l'autre, d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre, la figure (I.7) montre la variation de la vitesse moyenne saisonnière du vent.

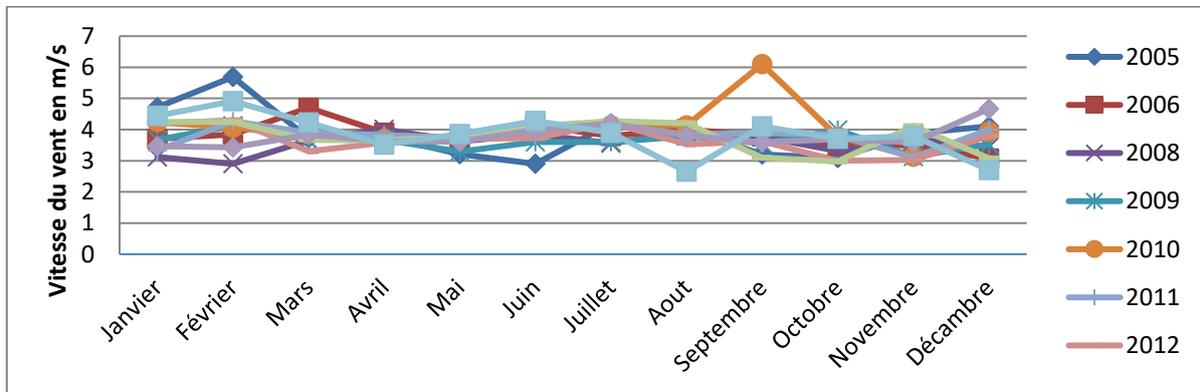


Fig. I. 7. Variation saisonnière de la vitesse moyenne du vent durant la période 2005-2015.

L'évolution des moyennes saisonnières de la vitesse du vent sur le site d'Annaba au cours des dernières années est indiquée dans la figure (I.7). Cette évolution de la vitesse montre :

- D'une part, une augmentation sensible de la vitesse du vent allant jusqu'à 6 m/s à 10 m du sol au cours de l'année 2010 ;
- D'autre part une stabilité de la vitesse pendant le reste des années avec une vitesse comprise entre 3 et 5 m/s.

Ainsi, ces données montrent que le site d'Annaba présente un potentiel éolien important du fait que le vent souffle à une vitesse relativement moyenne une stabilité de cette vitesse durant les onze dernières années avec une vitesse comprise entre 3 et 5 m/s.

I.4.2. La direction du vent

La figure (I.8) montre la direction du vent du janvier 2005 au décembre 2015.

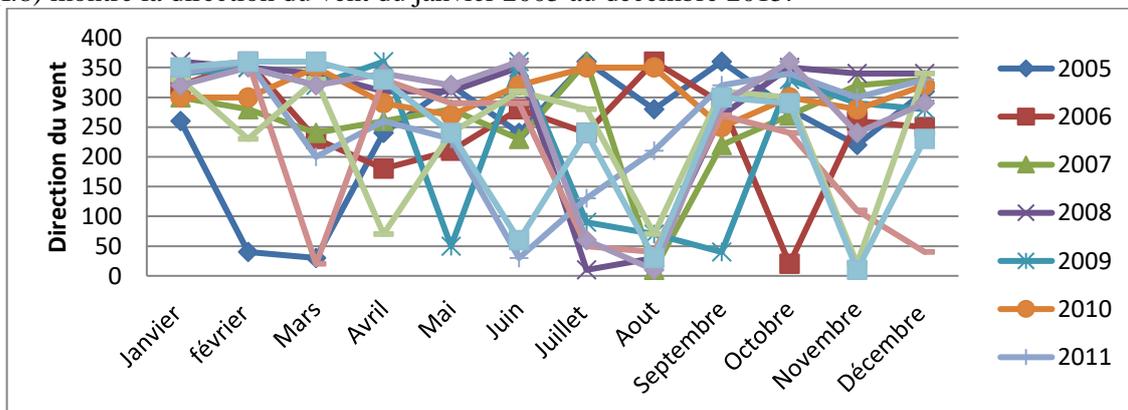


Fig. I. 8. Mesures instantanées de la direction max du vent du janvier 2005 au décembre 2015.

Les données enregistrées de la direction des vents durant les onze années montrent que le vent change de direction de façon imprévisible mais la plupart des temps ce vent souffle dans les directions (Ouest-Sud) et (Nord-Est).

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente également des inconvénients qui doivent être étudiés afin qu'ils ne deviennent pas un obstacle à son développement [CAMB03].

I.5.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, ce qui signifie que contrairement aux combustibles fossiles, les générations futures seront toujours en mesure d'en bénéficier.
- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a pas d'impact nocif sur l'environnement comme d'autres sources d'énergie qui ont provoqué un changement radical du climat grâce à la production énorme et directe de CO₂.
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un processus continu puisque les éoliennes en service peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux processus continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.
- Les parcs éoliens sont très faciles à démonter et ne laissent aucune trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes de ligne dues aux longs transports d'énergie sont moindres. En outre, cette source d'énergie peut stimuler l'économie locale, en particulier dans les zones rurales.
- C'est l'énergie renouvelable la moins chère à produire [BOUR99] [AVI99].
- La période de forte productivité est en hiver (vents plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus élevée.

I.5.2. Inconvénients

- L'impact visuel, cependant, reste un thème subjectif.
- Le bruit: il a été considérablement réduit, en particulier le bruit mécanique, qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés en termes de multiplicateur. Le bruit aérodynamique est lié à la vitesse du rotor, qui doit être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : Certaines études montrent que les oiseaux évitent les éoliennes [WIN15]. D'autres études indiquent que les parcs éoliens ne devraient pas être situés sur les chemins migratoires des oiseaux, de sorte que les oiseaux ne soient pas capturés par les turbines [EXT98].
- La qualité de l'énergie électrique: Puisque la source d'énergie éolienne est stochastique, l'énergie électrique due au vent aléatoire provoque l'instabilité dans la production.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie conventionnelles bien qu'en termes de coût, l'énergie éolienne peut sur les meilleurs sites, c'est-à-dire où il y a le plus de vent, rivaliser avec la plupart des sources d'énergie conventionnelles, son coût reste encore plus élevé que celui des sources conventionnelles sur les sites moins venteux.

I.6. Classification des turbines éoliennes

Une éolienne, plus communément appelée éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre d'entraînement, puis en énergie électrique via un générateur. Le tableau I.2 fournit une classification de ces turbines en fonction de la puissance qu'elles fournissent et du diamètre de leur hélice.

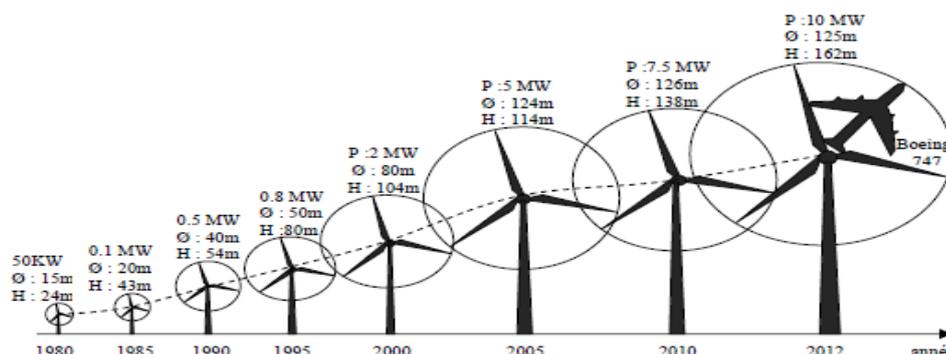


Fig. I.9. Correspondance taille-puissance des éoliennes.

Tableau. I. 2. Classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
PETITE	moins de 12 m	moins de 40 kw
MOYENNE	12 m à 45 m	De 40 kw à 1 Mw
GRANDE	46 m et plus	1 Mw et plus

I.7. Présentation Du Système Eolien

La fonction d'une éolienne est de convertir le mouvement du vent en énergie de rotation qui peut être utilisée pour conduire un générateur. Les éoliennes captent la puissance du vent au moyen de pales aérodynamiques tournant la puissance mécanique. Actuellement, les éoliennes les plus populaires sont les turbines à axe horizontal, où le nombre des pales est généralement égal à trois [ENE09] [KOUA].

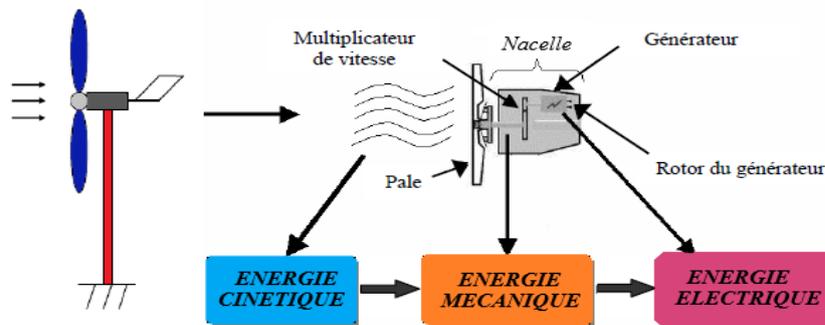


Fig. I. 10. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

➤ La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre les deux côtés de la pale crée une force aérodynamique, mettant le rotor en mouvement en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

➤ L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, plus l'éolienne est grande. La plupart des générateurs doivent tourner à très grande vitesse (1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le ralenti du rotor est accéléré par une boîte de vitesses. Certains types d'éoliennes ne sont pas équipés, de sorte que leur générateur est beaucoup plus grand et plus lourd.

➤ La production d'électricité par le générateur

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

➤ Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement; elle est traitée par un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20.000 volts par un transformateur. L'électricité est ensuite acheminée par un câble enfoui vers une station de transformation, où elle est injectée dans le réseau électrique et distribuée aux consommateurs les plus proches [BOUA12].

I.8. Les différents types d'éoliennes

Les solutions techniques pour la collecte de l'énergie éolienne sont très variées. Les éoliennes sont classées en fonction de l'agencement géométrique de l'arbre sur lequel l'hélice est montée en deux types : les éoliennes à axe vertical et horizontal [Mul04] [Pal 05] [Rob 06].

- Eoliennes à axe vertical en anglais VAWT : *Vertical Axis Wind Turbine*
- Eoliennes à axe horizontal HAWT : *Horizontal Axis Wind Turbine*.

I.8.1. Eoliennes à axe vertical « VAWT »

Les VAWT sont très peu mises en jeu de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal, elles tournent en moyenne 2 à 8 fois moins vite qu'une tripale classique avec le même rayon.

Les VAWT fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre la machinerie au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur ce qui facilite la maintenance et l'entretien), mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteurs car freinés par le relief. De par son axe vertical, il y a symétrie de

révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut le lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole par exemple. Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus classique et Darrieus en forme de H.

❖ Le rotor de Savonius

Inventé par le Finlandais Sigurd Savonius en 1924, ce rotor est basé sur le principe de « traînée différentielle » utilisé dans les anémomètres: les forces exercées par le vent sur chaque face d'un corps creux sont d'intensité différente, résultant en un couple moteur conduisant la rotation de l'ensemble. L'effet est renforcé ici par le flux d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (figure I.11).



Fig. I. 11. Éolienne de Savonius.

En conséquence, l'éolienne à rotor Savonius est complètement insensible à la direction du vent dans un plan horizontal. La faible valeur à vitesse réduite, qui est environ 8 fois inférieure à celle des turbines conventionnelles à trois pales, offre des caractéristiques intéressantes du point de vue de l'acoustique et de la sécurité, car cet aspect est fortement lié à la vitesse linéaire à l'extrémité de la pale. Cependant, ces propriétés impliquent l'utilisation d'un générateur avec un grand nombre de pôles et très souvent des machines sur mesure.

Commencer à basse vitesse est également un point fort. Ainsi, malgré une certaine faiblesse du coefficient de puissance (0,15 à 0,2), les avantages précédents auxquels s'ajoute une "certaine" esthétique le rendent bien adapté aux sites urbains. Les dimensions géométriques d'une telle canopée sont limitées. En effet, étant donné les forces mécaniques qui doivent être soutenues par le mât, les éoliennes de type Savonius ne peuvent pas être trop grandes.

❖ Le rotor de Darrieus

Conçue par l'ingénieur Français George Darrieus en 1931, l'éolienne Darrieus se caractérise par ses pales de rotor en forme de « C » qui la font ressembler un peu à un « batteur d'œufs » (figure I.12). Le rotor Darrieus fonctionne au moyen d'un ascenseur et est basé sur le fait qu'un profil placé dans un flux d'air à différents angles (figure I.12) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. Le résultat de ces forces génère alors un couple de conduite qui provoque l'appareil à tourner. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse de mouvement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation de l'appareil ne peut pas démarrer par elle-même. L'éolienne doit donc être démarrée par un dispositif auxiliaire (par exemple, le montage d'une petite éolienne Savonius sur le même rotor) lorsqu'elle est stationnaire. Cependant, ce n'est qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une turbine connectée au réseau, puisqu'il est alors possible d'utiliser le générateur comme un moteur qui tire le courant du réseau pour démarrer la turbine.

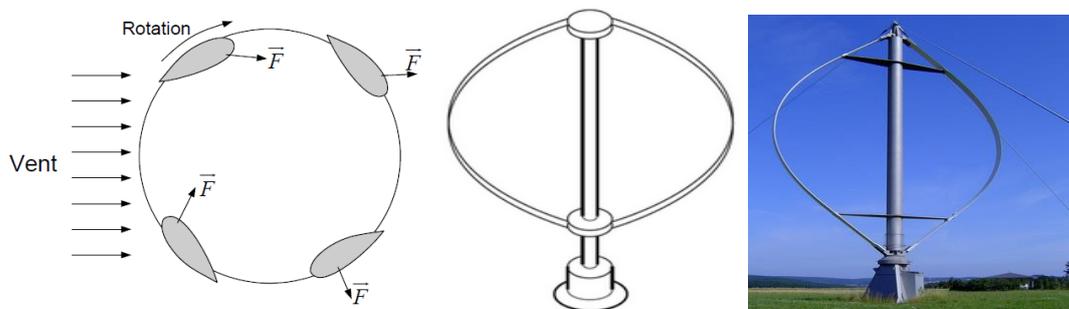


Fig. I. 12. Éolienne de Darrieus.

❖ Le rotor H-type

Un autre type de rotor vertical est connu sous le nom de rotor « H » ou rotor Musgrove, dont les pales prennent une forme « H » (figure I.13). Ce type de rotor peut démarrer seul, produit de l'énergie à partir de vents très faibles (1m/s), ne nécessite pas de régulation mécanique et résiste aux vents violents.

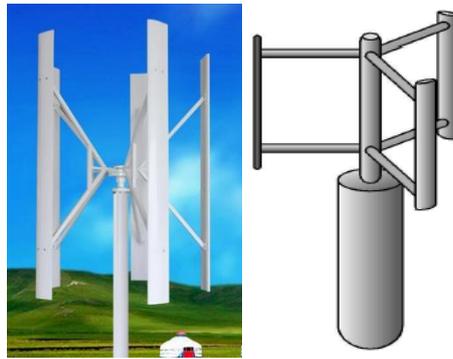


Fig. I. 13. Eolienne de Darrieus de type H.

Des éoliennes à axe vertical développées pour la production d'électricité dans les régions éloignées sont maintenant disponibles. Ce sont des machines à faible puissance, de 100W à 25kW.

Ils sont destinés à un usage permanent. Par exemple, la recharge des batteries utilisées pour alimenter un chalet dans les montagnes. Ils sont de conception simple et robuste et nécessitent peu ou pas d'entretien.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les VAWT restent marginaux et peu utilisés, voire abandonnés. En effet, la présence du collecteur d'énergie près du sol l'expose à la turbulence et au gradient de vent qui réduit son efficacité.

En outre, elles sont exposées à des problèmes d'aéroélasticité en raison des contraintes élevées auxquelles elles sont soumises, la surface qu'elles occupent au sol est très grande pour la puissance élevée, et la présence d'un dispositif de démarrage auxiliaire est nécessaire. La majorité des VAWT fonctionnent à basse vitesse, ce qui est très désavantageux dans les applications de production d'énergie avec connexion au réseau public (50 ou 60Hz) que la boîte de vitesses doit permettre un rapport de vitesse élevé. La faible efficacité aérodynamique (c-à-d le coefficient de faible puissance) et la réduction de la quantité de vent qu'ils reçoivent au niveau du sol sont les principaux handicaps des VAWT par rapport aux HAWT.

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical :

Tableau. I. 3. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical [POI03].

Avantages	Inconvénients
La conception verticale offre l'avantage de mettre la boîte de vitesses, le générateur et les dispositifs de commande directement sur le sol.	Elles sont moins efficaces que ceux avec un axe horizontal.
Son axe vertical est symétrique en rotation, ce qui lui permet de fonctionner dans n'importe quelle direction de vent sans avoir à faire pivoter le rotor.	La conception verticale de ce type d'éolienne exige qu'elle fonctionne avec le vent près du sol, donc moins fort parce qu'il est freiné par le relief.
Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	Leur installation au sol nécessite l'utilisation de tiges de cravate qui doivent passer au-dessus des pales, occupant ainsi une surface plus grande que la turbine à tour.

I.8.1.4. Eoliennes à axe horizontal « HAWT »

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des éoliennes. Elles se composent de plusieurs lames profilées aérodynamiquement comme les ailes d'un avion. Dans ce cas, portance n'est pas utilisé pour garder un avion en vol, mais pour générer un couple moteur pour conduire la rotation. Le nombre de pales utilisées pour la production d'énergie varie classiquement entre 1 et 3, le rotor à trois pales étant le plus couramment utilisé car il s'agit d'un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur de vent [VRI83]. Ce type d'éolienne a pris le relais des éoliennes à axe vertical parce qu'elles sont moins chères, moins exposées au stress mécanique, et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol favorise l'efficacité. Il convient toutefois de noter que certaines études défendent la viabilité du rotor vertical en effectuant des études multi-critères [MEN01].

La plupart des éoliennes installées sont des axes horizontaux (figure I.14). Ce choix présente plusieurs avantages, comme une faible vitesse de coupe et un coefficient de puissance relativement élevé [MAT06]. Toutefois, la boîte de vitesses (multiplicateur) et le générateur doivent être installés au sommet de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. En outre, un dispositif supplémentaire pour l'orientation des pales face au vent est fortement nécessaire.

Selon son nombre de pales, une HAWT est dite mono-pale, bipale, tripale ou multi-pale. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse parce que les matériaux sont moins chers et les pertes aérodynamiques par poussée sont minimales.

Cependant, un contrepoids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très populaire à cause de cela. Comme les rotors à une seule pale, les rotors à deux pales doivent être équipés d'un rotor d'inclinaison pour empêcher la turbine d'être frappée trop fort chaque fois qu'une pale de rotor passe la tour [LOP07]. Par conséquent, pratiquement toutes les éoliennes installées ou à installer dans un proche avenir sont de type tripale. Ceux-ci sont plus stables parce que la charge aérodynamique est relativement uniforme et qu'elles ont le coefficient de puissance le plus élevé à l'heure actuelle (près de 0,48).

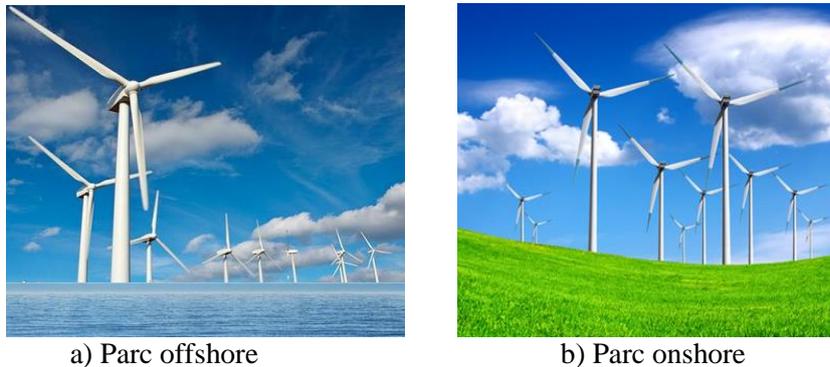


Fig. I. 14. Exemples des éoliennes horizontale.

I.8.1.4.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal

❖ Eoliennes lentes

Les éoliennes à circulation lente sont équipées d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie élevée impose généralement une limitation de diamètre d'environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de l'augmentation de la vitesse, mais diminue également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales conviennent particulièrement à de faibles vitesses de vent. Elles démarrent à vide pour des vents de 2 à 3 m/s et ont des couples de départ relativement élevés. Cependant, elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont principalement utilisées pour le pompage de l'eau [ABD07].

❖ Eoliennes rapides (Aérogénérateurs)

Les éoliennes rapides ont un nombre assez faible de pales, généralement entre 2 et 4 pales. Ils sont les plus largement utilisés dans la production d'énergie en raison de leur efficacité, le poids (plus léger par rapport à une turbine plus lente de la même puissance) et une grande efficacité. Cependant, elles ont l'inconvénient d'être difficiles à démarrer. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que celles des machines précédentes, et plus le nombre de pales est faible, plus la vitesse de rotation est élevée [ABD07].

Parmi les machines dont l'axe horizontal est parallèle à la direction du vent, il est encore nécessaire de différencier l'éolienne dont l'hélice est en amont de la machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

- **Amont** : Le vent souffle à l'avant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté en fonction de la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : Le vent souffle sur le dos des pales de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

L'agencement des turbines en amont est le plus utilisé parce qu'il est plus simple et donne de meilleurs résultats pour la haute puissance: pas de direction, moins d'effort de manœuvre et une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées en fonction de la direction du vent. À cette fin, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle selon cette direction [FER09].

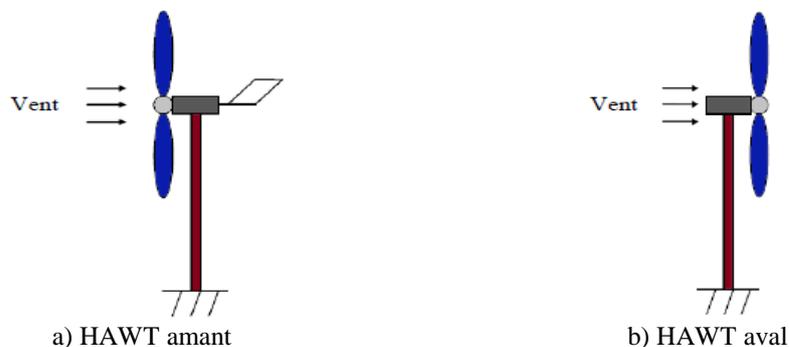


Fig. I. 15. Turbines éoliennes en amont et en aval.

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

Tableau. I. 4. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal [POI03].

Avantages	Inconvénients
Une très petite empreinte par rapport aux éoliennes à axe vertical.	Coût de construction très élevé.
Cette structure capte le vent plus haut, donc plus fort et plus régulier que près du sol.	L'équipement est situé au sommet de la tour, ce qui entrave la réponse à un incident.
Le générateur et les dispositifs de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'ajouter une pièce supplémentaire pour le switchgear.	

Afin d'utiliser la force maximale du vent, l'hélice doit balayer sur une surface où le vent est à son maximum. Pour ce faire, les éoliennes sont perchées en hauteur afin qu'elles ne soient pas affectées par les effets du sol qui ralentissent le vent.

C'est dans ce contexte que le constructeur allemand ENERCON a finalisé début 2011 la construction de l'éolienne la plus puissante au monde, à savoir l'E126, d'un diamètre de turbine de 126 m, d'une hauteur totale de 198 m et d'une puissance de 7,5 MW équipée d'un générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) (figure I.16). Cette éolienne, située sur un site d'essai à Magdeburg, en Allemagne, est capable de produire 14 millions de kWh, assez pour fournir de l'électricité à 15 000 personnes. L'installation de ces machines est justifiée par la réduction des zones d'installation potentielles, ce qui est particulièrement le cas en Allemagne.



Fig. I. 16. L'éolienne E126 de 7.5MW d'ENERCON (Allemagne).

I.9. Principaux composants d'une éolienne

Nous ne traiterons pas ici des éoliennes à axe vertical, puisque la majorité des éoliennes installées dans le monde sont des axes horizontaux.

Bien qu'apparemment simple en apparence, l'éolienne est un système complexe impliquant l'aérodynamique, la mécanique, l'électricité, le génie civil et l'ingénierie de contrôle. Le concept de technologie de l'axe horizontal à trois pales est l'éolienne contemporaine moderne. La figure I.17 montre ses principaux composants.

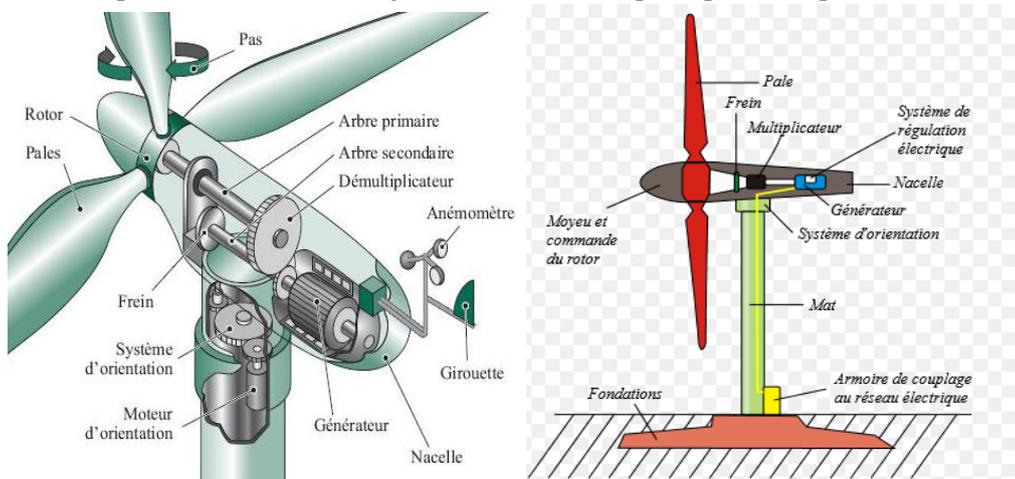


Fig. I. 17. Principaux composants d'une éolienne.

➤ La tour

Habituellement, un tuyau d'acier ou peut-être un treillis métallique, devrait être aussi élevé que possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matériel utilisé est un coût important et le poids doit être limité. Un

compromis consiste généralement à prendre une taille de mât légèrement plus grande que le diamètre du rotor de l'éolienne (p. ex. NORDEX N90 2,3 MW éolienne : 90 m de diamètre, mât de 80 m de hauteur) [POI03]. Figure I.18.



Fig. I. 18. La tour éolienne et ses composants électroniques à l'intérieur.

➤ La nacelle

La nacelle est la salle des machines de la turbine. Il contient tous les éléments mécaniques qui permettent au rotor de vent d'être couplé au générateur électrique.

L'assemblage des différents éléments logés dans la nacelle se fait en plein air comme le montre la figure I.19, où l'on peut voir une partie de la nacelle soutenant l'arbre mécanique, le multiplicateur de vitesse et sur le visage l'anneau utilisé pour fixer le moyeu.



Fig. I. 19. Vue aérienne de la nacelle.

➤ Le multiplicateur

Les rotors d'un diamètre supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop basses pour pouvoir conduire directement un alternateur conventionnel. Il est donc essentiel que ces machines interviennent entre l'aéromoteur et l'alternateur d'une boîte de vitesses (boîte de vitesses de levage) pour adapter la vitesse de rotation de l'aéromoteur à celle du générateur (figure I.20- a). À titre d'exemple, une turbine d'une capacité de 1 MW avec un rotor de 52 m de diamètre tourne à une vitesse de 20 tr/min, tandis que le générateur tourne à 1500 tr/min. Le rapport de transmission de la boîte de vitesses est alors égal à 1500/20, soit 75.

Les boîtes de vitesses à roues dentées sont fabriquées de deux manières différentes. Une première possibilité est l'arbre parallèle ou système d'engrenages de train simple (figure I.20-b), et l'autre est le train planétaire ou épicycloïdal (figure I.20-c). Le rapport de transmission procuré par un seul étage est limité, pour que la différence entre les arbres ne soit pas trop défavorable.

Les étages d'engrenages parallèles sont construits avec un rapport de transmission jusqu'à 1:6, et ceux épicycloïdaux de 1:12. Les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance ont généralement besoin de plus d'un étage.

Bien qu'il soit possible d'adapter les boîtes de vitesses d'autres types de machines aux éoliennes, celles-ci sont soumises à des contraintes particulières qui ne sont pas souvent rencontrées dans d'autres applications, de sorte que le dimensionnement spécifique est très souvent utilisé [LOP07].

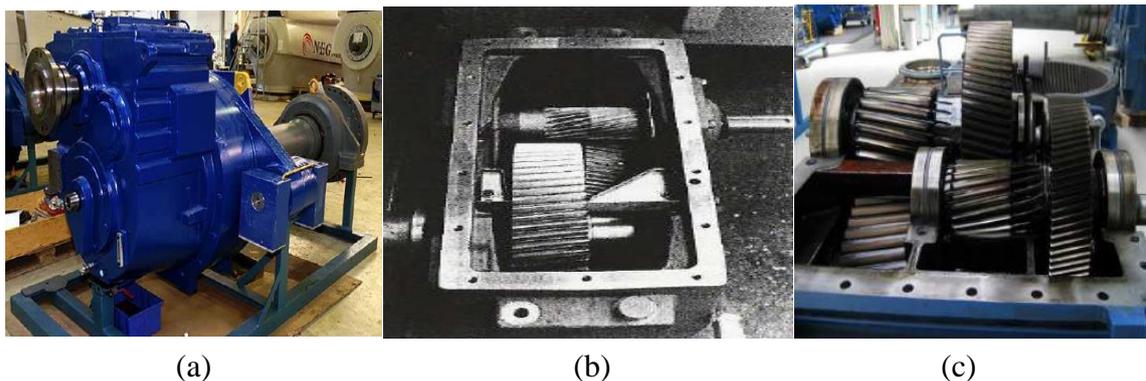


Fig. I. 20. Multiplicateur de vitesse. [HAU06].

➤ *Le système de refroidissement*

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir le générateur et un refroidisseur d'huile pour la boîte de vitesses. Certaines éoliennes sont disponibles avec refroidissement à l'eau [HAS12].

➤ *La génératrice électrique*

C'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [Lis 11].

Il existe trois principaux types d'éoliennes, les principales différences étant la technologie du générateur et la méthode de contrôle utilisée pour prévenir la surcharge à des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. Il convient de noter que selon le type de machine électrique utilisée, les éoliennes sont également classées en deux types, à vitesse fixe et à vitesse variable.

Les différentes technologies des générateurs sont les suivantes :

- Le générateur asynchrone à cage d'écureuil « GAS », en anglais : *Squirrel Cage Induction Generator* « SCIG ».
- Le générateur asynchrone à rotor bobiné à double alimentation « GADA », en anglais : *Doubly Fed Induction Generator* « DFIG ».
- Le générateur synchrone à rotor bobiné « GSRB » et à aimants permanents « GSAP », en anglais : *Synchronous Generator* « SG » et *Permanent Magnet Synchronous Generator* « PMSG ».

➤ *Le système de commande*

Comprend un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple, surchauffe de la boîte de vitesses ou du générateur), le système arrête automatiquement la turbine et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

➤ *L'arbre*

Qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique si nécessaire.

➤ *Le système d'orientation des pâles*

Qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

➤ *Anémomètre*

Sont utilisés par le système de commande de l'éolienne pour démarrer la turbine lorsque la vitesse du vent atteint environ 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrêtera automatiquement la turbine si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s pour protéger la turbine [HAS12].

➤ *Une armoire de commande*

Y compris tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de la puissance, du courant et de la tension et les systèmes d'orientation des lames et des nacelles [HAS12].

➤ *Le rotor*

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3, le rotor à trois pales (concept danois) étant de loin le plus courant car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement des vibrations, la pollution visuelle et le bruit [WINP].

I.10. La Vitesse du rotor

I.10.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (figure I.21).

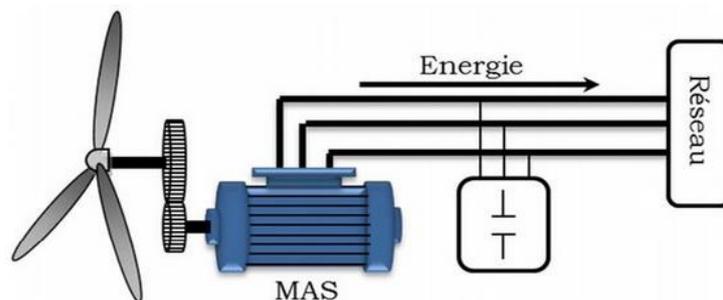


Fig. I. 21. Eolienne directement connectée au réseau.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500 \text{ tr/mn}$, ce qui nécessite l'ajout d'un multiplicateur pour adapter le générateur à la vitesse du rotor de l'éolienne [Les 81]. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

➤ **Les éoliennes à décrochage aérodynamique**

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, l'énergie fournie diminue avec la vitesse du vent (figure I.22) [Mul 02].

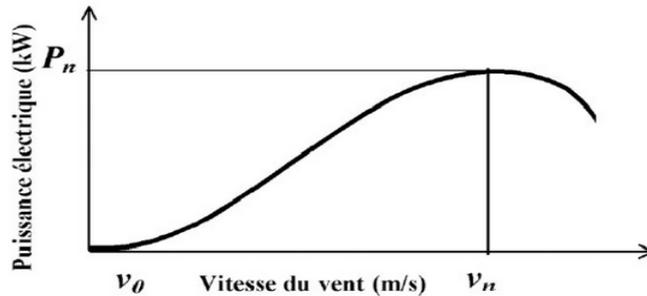


Fig. I. 22. Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique).

- P_n , la puissance nominale de l'éolienne.
- v_0 , la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.
- v_n , la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une diminution soudaine de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être réduite. Au-dessus de cette vitesse du vent, la puissance diminue très rapidement et le fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible.

Le système "Stall actif" est également disponible pour les machines à haute puissance. [Hof 02]

Le décrochage aérodynamique est ensuite réalisé progressivement au moyen d'un dispositif qui permet de dévier les pales contre le vent. Le système mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système d'orientation des pales qui est actuellement introduit.

➤ **Les éoliennes à pales orientables**

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à v_n (figure I.23) [Dei 00].

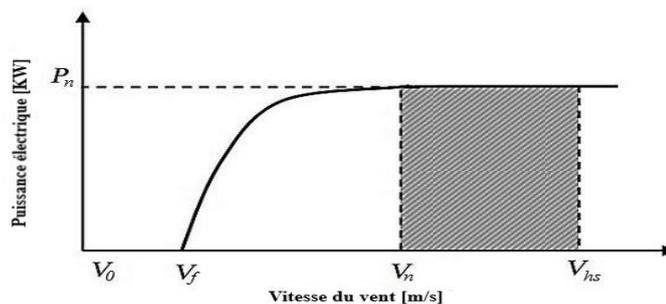


Fig. I. 23. Génération à puissance électrique constante (pâles orientables).

Avec

- v_f , la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.
- v_{hs} , la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

I.10.2. Fonctionnement à vitesse variable :

Ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent. De ces caractéristiques, il est clair que si le générateur est conduit à une vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cette raison, et afin d'optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il est nécessaire d'être en mesure d'ajuster la vitesse de rotation de l'arbre du générateur en fonction de la vitesse du vent [GHE11] (figure I.24).

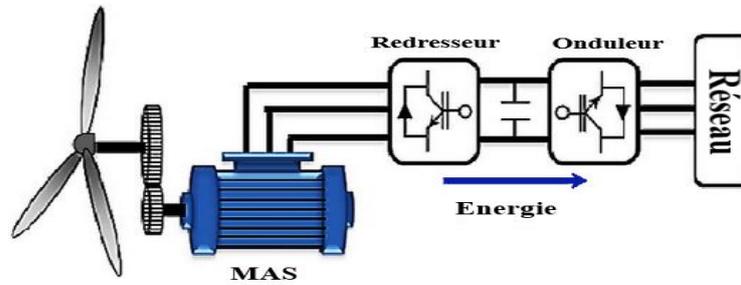


Fig. I. 24. Eolienne à vitesse variable utilisant une MAS.

➤ **Intérêt de la vitesse variable**

Il y a encore quelques années, presque toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Avec une meilleure qualité et des coûts plus bas de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont maintenant plus efficaces. Dans le reste du présent document, nous ne traiterons pas d'éoliennes à vitesse variable. En effet, l'objectif de cette thèse est de développer des systèmes de pilotage ou de commande pour le générateur afin d'augmenter l'efficacité et la qualité de l'énergie produite. Ce pilotage n'est possible qu'avec des éoliennes à vitesse variable, ces dernières :

- Augmente la portée de fonctionnement, en particulier à basse vitesse du vent où la puissance maximale est convertie. Indirectement, la disponibilité et la puissance générée du système sont augmentées;
- Nécessite un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faible vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe;
- Réduit les forces mécaniques ;
- Réduit le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente;
- Permet une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure I.25.

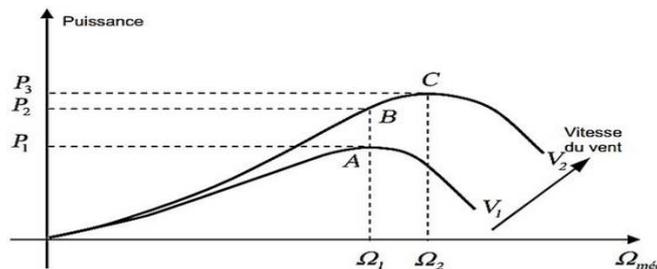


Fig. I. 25. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice ; cela donne une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (pour une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il est donc nécessaire de rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire la puissance maximale générée.

Les techniques d'extraction de puissance maximale consistent à ajuster le couple électromagnétique du générateur pour régler la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

I.11. Générateurs électriques

De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe ou variable. Nous discuterons ici des technologies les plus courantes utilisées dans l'industrie des éoliennes :

- Générateurs asynchrone à cage d'écureuil,
- Générateurs synchrones,
- Générateurs asynchrone à rotor bobiné.

❖ **Générateurs asynchrone à cage d'écureuil**

La machine asynchrone a été le premier type de générateur à être utilisé pour les éoliennes à haute puissance [DAV07], et a des avantages évidents liés à sa conception simple, fabrication à faible coût, robustesse, faible poids et inertie, et le faible entretien (pas de système balais collecteur) qu'elle requiert [MEC14], [BOY06]. En outre, puisque le stator est relié directement au réseau, le besoin d'équipement électronique est réduit.

L'éolienne à vitesse fixe se compose d'une machine asynchrone en cage d'écureuil couplée mécaniquement à la turbine par une boîte de vitesses (figure I.26). Cette machine est entraînée par une boîte de vitesses et sa vitesse est maintenue à

peu près constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme, c'est-à-dire le glissement $g < 0$ pour le fonctionnement en générateur.

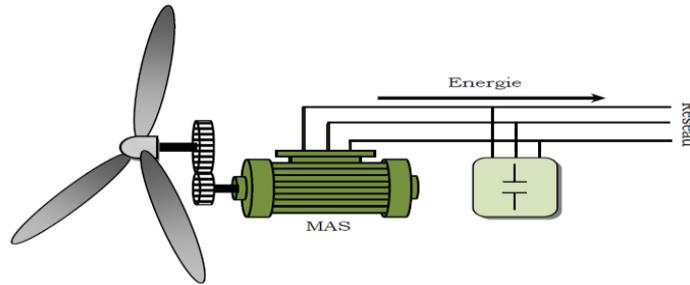


Fig. I. 26. Système éolien à base de machine asynchrone à cage d'écureuil.

❖ Générateur asynchrone à double stator

Cas deux enroulements statoriques, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend sa conception difficile ainsi que son coût de revient est trop important. [ENE09]

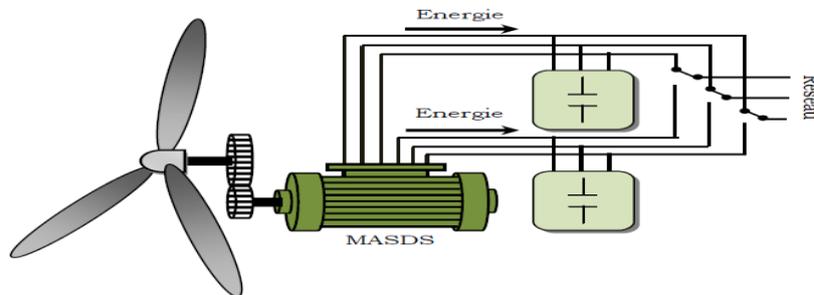


Fig. I. 27. Générateur asynchrone à double stator.

❖ Générateur asynchrone connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance :

Le système permet une opération à vitesse variable, quelle que soit la vitesse du vent, nous aurons une tension de fréquence fixe, en fait la tension produite sera redressée et transformée en tension directe. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et un contrôle adéquat permet de fournir une tension alternée de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. [ENE09]

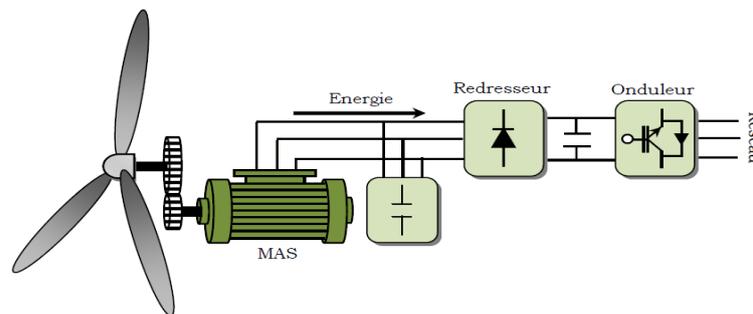


Fig. I. 28. Connexion indirecte d'une machine asynchrone au réseau.

Il se compose d'un rotor de cage d'écureuil et de deux enroulements indépendants en trois phases dans le stator. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, qui a une plus petite section transversale de conducteur et est utilisé pour varier les courants d'excitation de la machine, appelé Bobinage de Commande (BC), est fourni par un convertisseur bidirectionnel. [ENE09]

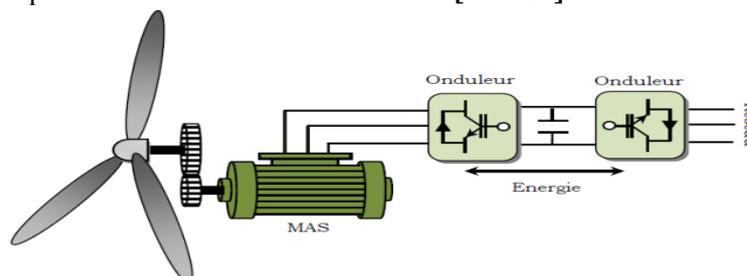


Fig. I. 29. Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs.

❖ **Générateurs asynchrones à double alimentation**

De nos jours, le générateur asynchrone à double alimentation est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans les unités de production au-dessus de 1 MW en raison de ses différentes configurations :

➤ **Générateurs asynchrones à double alimentation à énergie rotorique dissipée**

Cette configuration est représentée sur la figure I.30, où le stator est relié directement au réseau et où le rotor est relié à un redresseur à diode, à la sortie duquel est connecté un hacheur à IGBT qui alimente la charge résistive [HEI98]. L'idée est d'atteindre le fonctionnement à vitesse variable. Ceci est réalisé en variant la puissance de glissement dissipée par les enroulements du rotor. Cette puissance dissipée permet un glissement maximum de 10% [POI03]. La variation de l'énergie du rotor dissipée est obtenue en agissant sur le rapport cyclique de la commande de l'IGBT d'hacheur. Si le glissement devient grand, la puissance extraite du rotor est élevée et est complètement dissipée dans la résistance R, ce qui affecte l'efficacité du système. En outre, cela augmente la puissance qui coule à travers le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

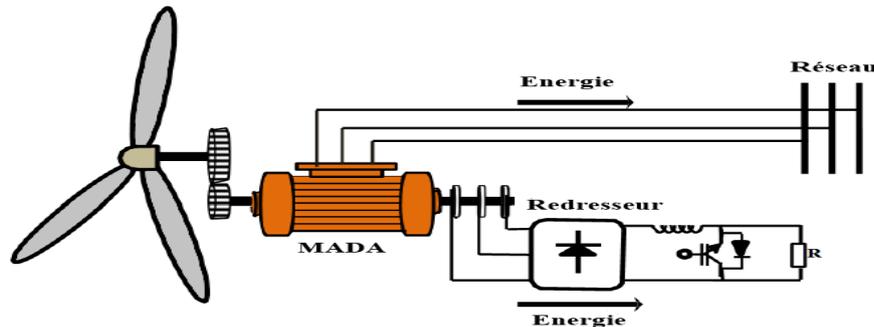


Fig. I.30. Système éolien à base de MADA à énergie rotorique dissipée.

➤ **Générateurs asynchrones à double alimentation à structure de Kramer**

Afin de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement au réseau, la structure dite Kramer est indiquée dans la figure I.31 [REF99].

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux et permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale et est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur est préjudiciable au facteur de puissance, en outre le redresseur est unidirectionnel, le transfert de l'énergie que du rotor de la machine au réseau. Par conséquent, le générateur ne fonctionne qu'en mode hyper synchrone ($g < 0$), de sorte le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle de synchronisme.

De plus cette configuration présente un taux d'harmoniques élevé du courant statorique et rotorique [POI03].

Afin d'assurer le transfert de puissance dans les deux sens, le redresseur à diodes doit être remplacé par un redresseur à thyristors. Cette solution permet un fonctionnement en mode hypo synchrone et hyper synchrone mais présente toujours un taux d'harmoniques de courant élevé [BOL06].

La présence d'une bobine de lissage à haute inductance au stade continu demeure un sérieux inconvénient en termes de coût et de dimensionnement des convertisseurs [DEN10].

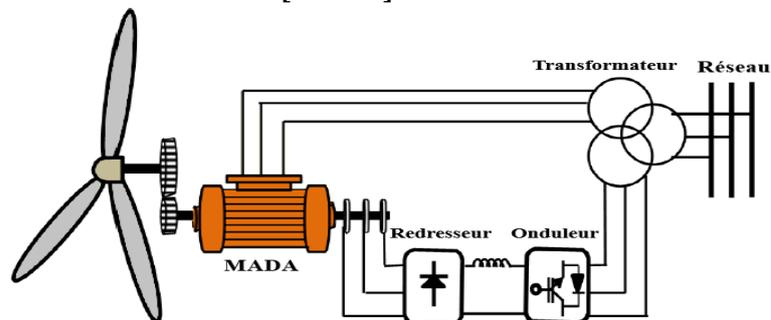


Fig. I. 31. Système éolien à base de MADA structure de Kramer.

➤ **Générateurs asynchrones à double alimentation avec cyclo convertisseur**

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur (figure I.32).

Les variations du glissement doivent rester inférieures à 30% pour maintenir l'efficacité du système, ces variations peuvent être positives pour avoir un fonctionnement en mode hypo synchrone ou négatives pour un fonctionnement en mode hyper synchrone.

Le principe du cyclo convertisseur est de prendre des fractions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une vague de basse fréquence. Son utilisation génère par conséquent d'importantes perturbations harmoniques qui nuisent au facteur de puissance de l'appareil.

De plus, son coût élevé et la complexité du contrôle sont des inconvénients majeurs pour cette configuration [DEL06]. Cependant, les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cyclo convertisseur par une structure avec deux convertisseurs IGBT contrôlés par MLI.

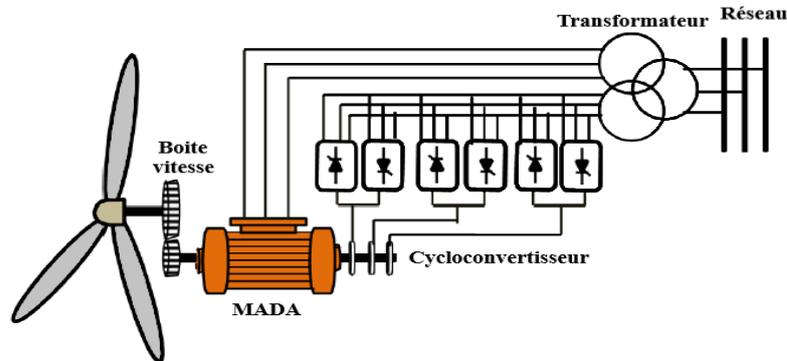


Fig. I. 32. Système éolien à base de MADA avec cyclo convertisseur.

➤ **Générateurs asynchrones à double alimentation à structure scherbius**

Cette configuration est indiquée dans la figure I.33, la structure dite Scherbius a les mêmes caractéristiques que la structure Kramer avec redresseur à thyristor. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (IGBTs) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture, et leur fréquence de commutation est plus élevée, permettant aux harmoniques du courant rotorique d'être décalées vers des fréquences élevées, facilitant ainsi le filtrage.

Malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette configuration est plus conventionnelle et plus simple que les autres [DAT02]. Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles, montrent la fiabilité de ce dispositif dans une éolienne à vitesse variable.

La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hypo synchrone et hyper synchrone et le contrôle du facteur de puissance. Le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau, mais également du rotor vers le réseau.

Ce type de convertisseur est généralement utilisé aujourd'hui dans des éoliennes avec des puissances allant jusqu'à 3 MW. Pour des puissances supérieures, les convertisseurs multi niveaux sont utilisés. Cette configuration constitue une solution pour un fonctionnement à vitesse variable tout en assurant son fonctionnement à une vitesse de synchronisme[BOS06].

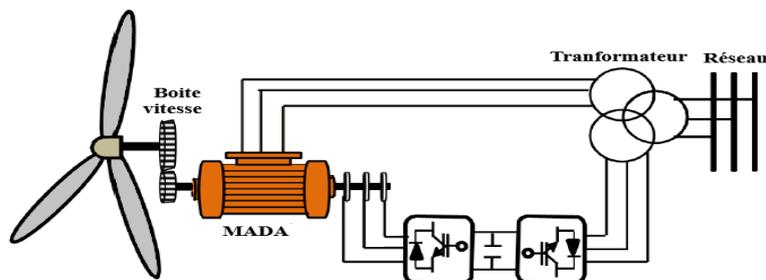


Fig. I. 33. Système éolien à vitesse variable à base de MADA structure Scherbius.

➤ **Générateurs asynchrones à double alimentation avec convertisseur matriciel**

Cette structure, décrite par la figure I.34 est identique à cyclo convertisseur. Toutefois, le convertisseur utilisé ici est direct (sans étage continu). Ce convertisseur est une nouvelle génération de convertisseurs, il se compose de commutateurs bidirectionnels. À l'entrée, un filtre LC passif est connecté afin de filtrer les harmoniques.

Ce convertisseur présente plusieurs avantages par rapport aux convertisseurs présentés ci-dessus : [DEN10]

- L'absence d'éléments de stockage, ce qui augmente la durée de vie,
- Possibilité de fonctionnement en hypo synchrone et hyper synchrone avec un facteur de puissance ajustable, ultra rapide,
- Une fréquence de sortie qui peut être ajustée indépendamment de la fréquence d'entrée.

Malgré ces avantages, cette configuration est peu discutée dans la littérature, où les auteurs intéressés par ce type de convertisseur traitent généralement sa modélisation et son contrôle en association avec la machine asynchrone à cage ou la machine synchrone [LEE06], [WHE02], [WHE04]. Très peu de chercheurs se sont intéressés à l'étude de cette structure MADA avec convertisseur matriciel. [ZHA97], [CHEK06], [ALT13], [DEN10], [CHEM15].

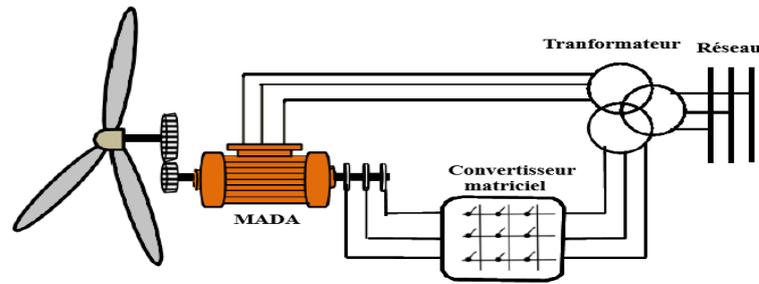


Fig. I. 34. Système éolien à vitesse variable à base de MADA avec convertisseurs matriciel.

❖ Générateurs synchrone

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets Offshore situés en milieu salin. Pour limiter ces inconvénients, certains fabricants ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones avec un grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si, en outre, le générateur est équipé d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure, indiquée dans la figure I.35, est qu'elle nécessite des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale du générateur pour sa connexion au réseau. Cet inconvénient est toutefois un avantage du point de vue de la commande des éoliennes. En effet, l'interface du réseau peut être entièrement contrôlée via le convertisseur connecté au réseau, tandis que le convertisseur connecté au générateur peut contrôler la puissance générée par le générateur en limitant le pitch control à une fonction de sécurité du vent élevé [MOK06].

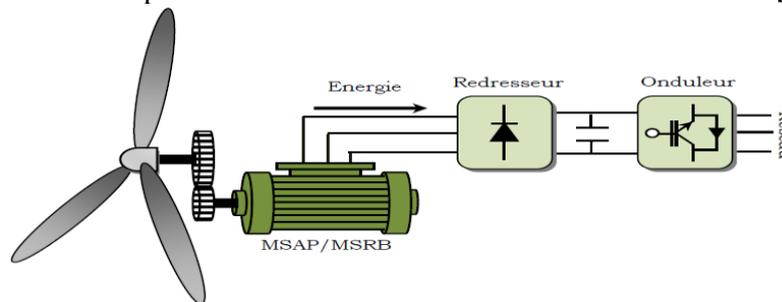


Fig. I. 35. Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

❖ Comparaison des trois générateurs

La machine asynchrone à cage a été en plein essor ces dernières années grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et le fait qu'elle est moins cher que d'autres machines.

Aujourd'hui, il est très demandé dans les applications à vitesse variable. Les principaux inconvénients de cette machine sont le courant de démarrage élevé, les quantités non mesurables au niveau du rotor ce qui nécessite une commande plus compliquée [CAM03] et la limitation dans la plage de variation de la vitesse notamment pour les applications éoliennes.

Cependant, le système utilisant la machine à cage, comme celui à base de la MADA. Par ailleurs, les machines asynchrones à cage sont avantageées par rapport à la MADA vu que celle-ci utilise le système à bagues et balais.

L'un des principaux problèmes actuels dans les chaînes de conversion électromécanique des éoliennes est la comparaison des performances de la topologie à entraînement direct à l'aide de la machine synchrone (MS) et de la topologie à l'aide du générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Les deux solutions techniques diffèrent en termes d'intérêt commercial à long terme ou à court terme.

La topologie basée sur la machine synchrone est très simple car elle ne nécessite pas l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse, mais implique une machine avec un couple élevé et une grande empreinte et des convertisseurs statiques dimensionnés pour permettre le transit de la puissance nominale de l'aérogénérateur. La topologie basée sur la GADA doit utiliser un multiplicateur de vitesse mais elle implique une machine de plus faible couple, donc d'encombrement réduit, avec des convertisseurs statiques dimensionnés pour permettre le transit d'une fraction seulement de la puissance nominale de l'aérogénérateur.

Une comparaison technico-économique entre ces solutions topologiques les plus modernes, basée sur une approche de modélisation simplifiée est présentée dans la référence [VIL06]. De manière générale, par rapport à une topologie utilisant une machine synchrone à aimants permanents, la topologie utilisant la GADA présente un coût initial plus faible. D'autre part, elle a un coût d'entretien plus élevé et une efficacité légèrement inférieure en raison des pertes supplémentaires générées par le multiplicateur de vitesse. Des études statistiques sur la fiabilité des différents composants des éoliennes utilisant la GADA et la machine synchrone et leurs gains d'efficacité respectifs sont disponibles dans les références [VAN07], [GRA96], [KAI13].

❖ *Autres architectures*

✓ Les générateurs à courant continu (CC) ont longtemps été appréciés pour la simplicité de la modélisation, un couple élevé même à basse vitesse, une bonne efficacité, mais surtout pour la facilité de contrôle, en raison du découplage naturel existant entre le couple électromagnétique développé et le flux induit. Cependant, ces types de générateurs sont rarement utilisés de nos jours dus à présence du dispositif ballast collecteur, en raison de son coût élevés, de l'entretien nécessaire et de sa limitation en vitesse et de son inaptitude à fonctionner en atmosphère explosif [CAR95]. Ce type de générateur était commun pour les petites éoliennes, qui fonctionnent avec la banque de batterie. La puissance produite par ce type était directement liée à la vitesse du vent [SUZ82], [GUO].

✓ Les générateurs à réluctance variable (MRV) : Le développement de la MRV a commencé dans les années 1970 avec l'introduction d'une électronique de contrôle efficace. Le MRV a une structure de projection au rotor et un stator où se trouvent les enroulements. Le rotor massif distingue le MRV des machines synchrones et asynchrones.

✓ La MRV a l'avantage d'une construction mécanique très simple, à faible coût, une bonne robustesse et une masse de couple élevé. L'application de la MRV dans les systèmes éoliens est plutôt rare [MAI04], [BOU09].

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art de l'énergie éolienne, décrivant tout d'abord son historique, un bref aperçu sur sa situation actuelle dans le monde entier, ainsi l'analyse et l'évaluation du potentiel éolien dans la région d'Annaba. Nous avons présenté la constitution générale d'un système éolien, suivie d'un état de l'art sur les différents types d'aérogénérateurs les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable et leur principe de fonctionnement dans le cadre de la conversion de l'énergie éolienne. Ensuite, une description des générateurs électriques les plus couramment utilisées été présentée. En fin, Différentes structures utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation ont été décrites et comparées.

I.13. Références bibliographiques

- [ABD07] MOUSSA SIDDO ABDOULAZIZ « étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » diplôme d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique, 2007.
- [AVI99] F. Avia I. Cruz. The development of the wind energy market in Spain. In European Wind Conference Proceedings, Nice, pp. 477-480; 1999.
- [ALT13] H. Altun S. Sunter. Modeling, simulation and control of wind turbine driven doubly fed induction generator with matrix converter on the rotor side. In Electrical Engineering, vol 95 (no.2) : p. 157-170, 2013.
- [BOY06] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [BOUD13] Boudia.S. M. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen (2013).
- [BOUR99] C. Bourillon. Wind energy - clean power for generations. Renewable Energy, Vol. 16, pp. 948-953, 1999.
- [BOUA12] BOUARAKI MOULOUD « étude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : application sur un site à Tindouf » magister, université m'hamed bougara-boumerdes, 2011/2012.
- [BOU09] F. Boumaraf. Commande d'un aérogénérateur apport des techniques de l'intelligence artificielle. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2009.
- [BOL06] I. Boldea. The electric generators handbook: variable speed generators. CRC press Taylor francis group, New York, U.S.A., 2006.
- [BOS06] B. K. Bose. Power electronics and motor drives: advances and trends. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2006.
- [CAMB03] H. Camblong. Minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolienne dans la generation d'électricité par des aerogenerateurs à vitesse variable. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Automatique, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2003.
- [CAR95] J.P. Caron J.P. Hautier. Electrotechnique Modélisation et commande de la machine asynchrone. Presses Universitaires de Strasbourg, 1995.
- [CHEK06] E. Chekhet V. Sobolev I. Shapoval, V. Mikhalsky. Control of the stand-alone doubly fed induction generator supplied by the matrix converter. In Proceeding. Of the International Workshop on Renewable Energy Based Units and Systems. Pp.35-40, Russia, 2006.
- [CHEM15] A. Chemidi. Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Tlemcen, 2015.
- [DAT02] R. Datta V.T. Ranganathan. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine a comparison with alternative schemes. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002.
- [DAV07] A. Davigny. Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertielle d'énergie. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur, Lille1, 2007.
- [Dei 00] M. Deicke, R.W. De Doncker, "Doubly Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines", IEEE Industry Applications Magazine, May - June 2000, 1077-2618/02, pp. 26 - 33.
- [DEN10] A. Dendouga. Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM). Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [DEL06] P. Delarue P. Rombaut, G. Segulier. Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 2 la conversion alternatif-alternatif. 3ème édition, TEC DOC Lavoisier, 2006.
- [ELT08] Y. El Tous, "Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine", American journal of engineering an applied sciences, vol. 1(2), pp. 118-120, 2008.
- [ENER] Energies-Renouvelables.
- [ENE09] « syndicat des énergies renouvelables », France énergie éolienne février 2009.
- [EXT98] M. Etxaide B. Kortabarria. Dosierra : Energia elikoa. In Elhuyar, Vol. 133-134 ; 1998.
- [FER09] KHALED FERKOUS « étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » diplôme de magister, université mentouri constantine, 27 /05 / 2009.
- [GHE11] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [GRA96] A. Grauers. Efficiency of three wind energy generator systems. IEEE Energy Conversion, Vol. 11, No3, pp. 650 - 657. 1996.
- [GUO] Y. Guoliang L. Huiguang. Design and analysis of a newly brushless dc wind generator. In IEEE Confereces Automation Congress (WAC).
- [GWEC] Global Wind Report 2018, April 2019. Global Wind Energy Council.
- [HAU06] E. Hau, « Wind turbines, Fundamentals, Technologies, Applications, Economics »; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [HAS12] HASSAD MOHAMED AMINE « influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. » diplôme de magister, universitesetif 1, 2012.
- [HEI98] S. Heier. Grid integration of wind energy conversion systems. Publications John Wiley Sons, 1998.
- [Hof 02] R. Hoffman, P. Mutschler, "Comparison of wind turbines regarding their energy generation", PESC'02, Cairns, Australia, 23-27 June 2002, CD.
- [KAI13] D. Kairous. Modélisation, simulation et commande d'un système éolien a machine asynchrone à double alimentation. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université d'Oran, 2013.
- [KAS01] Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou., « Cartes Saisonnières du Vent en Algérie ». Journée d'études : Météorologie et Climatologie entre sciences et prise de décision, ONM/Alger, 2001.

- [KOUA] KOUADRA Foued « étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau mt » *diplôme de Magister*, université mentouri de constantine.
- [Les 81] J. Lesenne, F. Notelet, G.S'eguier, "Introduction `a l'electrotechnique approfondie ", Technique et documentation, Paris, 1981, ISBN 2-85206-089-2.
- [LEE06] H. Lee H. M. Nguyen. Direct rotor-flux-oriented control method using matrix converter fed induction motor. In First international Forum on strategic technology IFOST'06, pp.309-313, 2006.
- [Lis 11] M. Liserre, R. Cárdenas, M. Molinas, J. Rodríguez, "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, April 2011.
- [LOP07] M. Lopez, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée »; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France, 2007.
- [MAT06] S. Mathew, « Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics »; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
- [MAI04] A. Mailfert F.M. Sargos. Machines à réluctance variable (MRV). Machines polyphasées. Machines excitées. Techniques de l'Ingénieur, D 3681 15 p, Août 2004.
- [MEC14] A. Mechernene. Apport des techniques de l'intelligence artificielle à la commande sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université d'Oran, 2014.
- [MEM15] Ministère de l'énergie et des mines, Algérie.
- [MEN01] J.L. Menet, L.-C. Valdès, B. Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- σ criterion", *Renewable Energy* 22, 2001, pp. 491-506.
- [MOK06] M. El Mokadem. Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liée aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université du Havre, 2006.
- [MULT] Bernard Multon (sur la base des statistiques annuelles du GWEC).
- [Mul 04] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », *Techniques de l'ingénieur*, D3960, 2004.
- [Mul 02] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore, "Control Strategy for Variable-Speed, Stall-Regulated Wind Turbines", in Proc. 17th American Control Conf., Vol. 3, 1998, pp. 1710 - 1714.
- [NU98] Nations Unies; "Protocole de Kyoto à la Convention – Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques", 1998.
- [Pal 05] B. Paluch, « Introduction à l'énergie éolienne », *Revue REE*, no. 5, pp. 35-50, Mai 2005,
- [POI03] F. Poitiers. Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [REF99] L. Refoufi B.A.T. Alzahawi, A.G. Jack. Analysis and modeling of the steady state behavior of the static kramer induction generator. *EEE Transactions on Energy Conversion*, Volume 14, Issue 3, pp.333-339, 1999.
- [RIO07] E. Riolet, « Le mini-éolien »; Edition Eyrolles, 2007.
- [Rob 06] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ", *Revue J3Ea*, vol. 5, Hors-Série 1, EDP Science, 2006.
- [SAI84] M. Said, A. Ibrahim, « *Energy in the Arab World. Energy* », N° 9-3, pp. 217-38, 1984.
- [SUZ82] T. Suzuki H. Okitsu, T. Kawahito. Characteristics of a small wind-power system with dc generator. *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, 1982.
- [TSOUR09] G. Tsurakis, B. M. Nomikos, "Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on smallsignal stability", elsevier, journal of electric power systems research EPSR, vol. 79, pp. 190-200, 2009.
- [TSOUT09] T. Tsoutsos, "Visual impact evaluation of a wind park in a Greek island", elsevier, journal of applied energy, vol. 86(4), pp. 546-553, 2009.
- [VAN07] G. J. W. Van Bussel. B. Hahn E. Echavarria, T. Tomiyama. How has reliability of technology developed through time. Compte rendu de conférence de la European Wind energy Conference (EWEC), 2007.
- [VIL06] G-J de Vilder P.J. Tavner H. Polinder, F.F.A van der Pijl. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. *IEEE Energy Conversion*, Vol. 21, No 3, pp. 725 - 733. 2006.
- [VRI83] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1983, 15, pp. 77-96.
- [WIN15] The World Wind Energy Association. Consulté le 19- 09-2015.
- [WINP] Site Internet de l'Association Danoise de l'Industrie Eolienne.
- [WHE02] P. W. Wheeler L. Empringham A. Weinstein J. Rodriguez, J. C. Clare. Matrix converters: A technology review. *IEEE Trans. on industrial electronics*, vol. 49, pp.276-288, 2002.
- [WHE04] P. W. Wheeler M. Bland K. G. Kerris J. C. Clare, L. Empringham. Matrix converters: A vector controlled MCT matrix converter induction motor drive with minimized commutation times and enhanced waveform quality. *IEEE industry applications magazine* pp. 59-65, 2004.
- [ZHA97] L. Zhang C. Zathanasarn, W. Shepherd. Application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly fed induction generator. In Proceeding. of 23rd international conference of Industrial Electronics, Control and instrumentation, Vol. 2, pp.906-911, New Orleans, USA, 1997.

CHAPITRE II :

**MODELISATION ET SIMULATION D'UN
SYSTEME EOLIEN.**

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation et la commande d'un système éolien. La première partie est consacrée à la représentation des différentes méthodes de commande d'une éolienne.

La deuxième partie est destinée à la modélisation du système de conversion d'énergie cinétique mécanique (vent, pales, turbine, multiplicateur...). L'ensemble du système sera validé par simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

II.1 Introduction

Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance au cours des dernières années [AIM02]. Parmi ces sources d'énergie, les éoliennes occupent une place particulière. D'une part, l'énergie éolienne devrait se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, due à des variations significatives de la vitesse du vent, peut affecter de manière significative la qualité de la tension et du courant dans le réseau où elle est injectée.

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [MIR05].

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, les domaines aérodynamique, mécanique et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine.

Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée.

II.2. Capacités de réglages des différentes technologies d'éoliennes

La nature imprévisible et très fluctuante du vent limite la participation des éoliennes aux services système (réglages des puissances active et réactive, fréquence, tension, possibilité de fonctionner en îlotage, ...etc. [COU08]. La non-participation aux services du système conduit les éoliennes à se comporter comme des générateurs passifs d'un point de vue électrique [JEN00]. Le contrôle de la tension et de la fréquence est donc déplacé vers les générateurs conventionnels (turbines à gaz, générateurs diesel), ce qui va à l'encontre des motivations écologiques pour le développement de la production d'énergie éolienne.

Par conséquent, le taux de pénétration du vent, c'est-à-dire l'énergie produite par les éoliennes par rapport à l'énergie totale consommée, doit être limité afin de garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables [CRA03], [DAV07]. Cela est particulièrement vrai pour les sources d'énergie renouvelables où la source primaire est difficile à prévoir et très fluctuante, comme c'est le cas pour l'énergie éolienne, où certains commentaires indiquent qu'à des taux de pénétration supérieurs à 20 ou 30%, des problèmes de stabilité peuvent se produire, tels que des baisses de tension ou des variations de la fréquence.

Ces perturbations entraînent souvent une déconnexion de la production lors d'incidents réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre génération-consommation et par effet domino accélérer l'apparition d'un incident majeur sur le réseau. Pour cette raison, des réglementations spécifiques sont prises au sérieux par de nombreux pays, établissant les règles nécessaires à l'insertion des parcs éoliens dans les réseaux électriques. En outre, la surveillance de la puissance de ces fermes semble nécessaire pour les connecter au réseau électrique sans affecter la qualité de l'électricité produite.

À l'avenir, l'ancienne technologie du vent à vitesse fixe sera remplacée progressivement par une technologie à vitesse variable (à base de machine asynchrone à double alimentation ou de machine synchrone) qui semble mieux adaptée au système électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable offrent la meilleure optimisation possible de la production d'énergie grâce à une meilleure efficacité aérodynamique sur l'ensemble de la gamme d'exploitation. En outre, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, qui permettent peu de contrôle et fonctionnent comme générateurs passifs, les éoliennes à vitesse variable sont en mesure de participer à la tension [AHM10] et la fréquence [MAR09] de contrôle en raison de la présence de convertisseurs de puissance électronique.

Cela donne à ce type d'éolienne une plus grande flexibilité dans l'adaptation aux conditions de connexion technique qui ont actuellement tendance à être plus proches des conditions actuelles des ensembles de production conventionnel.

II.3. Conversion de l'énergie éolienne

Les éoliennes produisent de l'électricité en utilisant la puissance du vent pour entraîner un générateur électrique. Le vent passe sur les pales, générant une portance et exerçant une force de rotation. Les lames rotatives font tourner un arbre à l'intérieur de la nacelle qui entre dans une boîte de vitesses. La boîte de vitesses augmente la vitesse de rotation à celle qui convient au générateur, qui utilise des champs magnétiques pour convertir l'énergie de rotation en énergie électrique [ZER14].

II.3.1. Eolienne isolée (autonome)

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissance allant de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de kW pour l'instrumentation électrique ou les dispositifs d'éclairage.

De plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météorologiques. De plus grandes éoliennes sont utilisées pour la production d'électricité pour les villages éloignés.

Les points communs entre toutes ces éoliennes sont leur faible puissance et leur combinaison avec une unité de stockage d'énergie, généralement composée de batteries accumulatives [BOY06], [CHE06].

II.3.2. Eolienne connectée au réseau

Les éoliennes connectées au réseau sont souvent en service pour tester le potentiel éolien du site en question appartenant à des industriels ou des particuliers qui produisent leur propre énergie électrique et revendent l'excédent au distributeur local. Ce type de production est de plus en plus rencontré avec le développement de primes et d'autres incitations à la production décentralisée d'énergie électrique propre. Les capacités de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un opérateur privé ou industriel, de 50kW à 7,5 MW pour les éoliennes les plus récentes de l'accord.

On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, en particulier dans les applications offshore [MUL03], puisque cet environnement se caractérise par une très grande vitesse éolienne. Ces éoliennes fonctionnent en continu et doivent généralement être raccordées à un réseau puissant pour minimiser l'impact des fluctuations de puissance générées par elles.

II.3.3. Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [LEC01].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne,
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales,
- Développer et affiner la modélisation du rotor,
- Évaluer le potentiel d'énergie utilisable,
- Fournir une aide pour l'implantation des machines.

L'éolien est le vecteur d'énergie d'entrée d'une centrale éolienne, ce qui est décisif pour le calcul de la production d'électricité et donc pour la rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont cruciales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie parce que l'énergie éolienne, dans des conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent.

Mathématiquement, la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Cependant, la direction du vecteur de vitesse du vent n'est pas importante pour une turbine à axe vertical. Même pour une petite éolienne à trois pales avec un axe horizontal, cette direction n'est pas prise en compte dans le modèle d'éolienne parce qu'elle est ajustée par la dérive sur la queue de la turbine [TRA10].

L'évolution de la vitesse de vent en fonction du temps est modélisée par une fonction analytique ou générée par une loi statistique à partir des données de mesure pour un site donné.

Dans le cadre de la modélisation théorique, le profil de vent doit satisfaire deux critères :

- 1) La durée du profil doit être limitée pour réduire le temps de simulation ;
- 2) Le profil du vent doit être représentatif des caractéristiques du gisement (intensité, variabilité, distribution statistique...).

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent par une fonction scalaire qui évolue au fil du temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, selon [MIR05], [TRA10] :

$$v(t) = 8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25(100\omega t) \quad (II.1)$$

Avec : $\omega = \frac{2\pi}{10}$

La figure II.1 montre le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 8.2m/s.

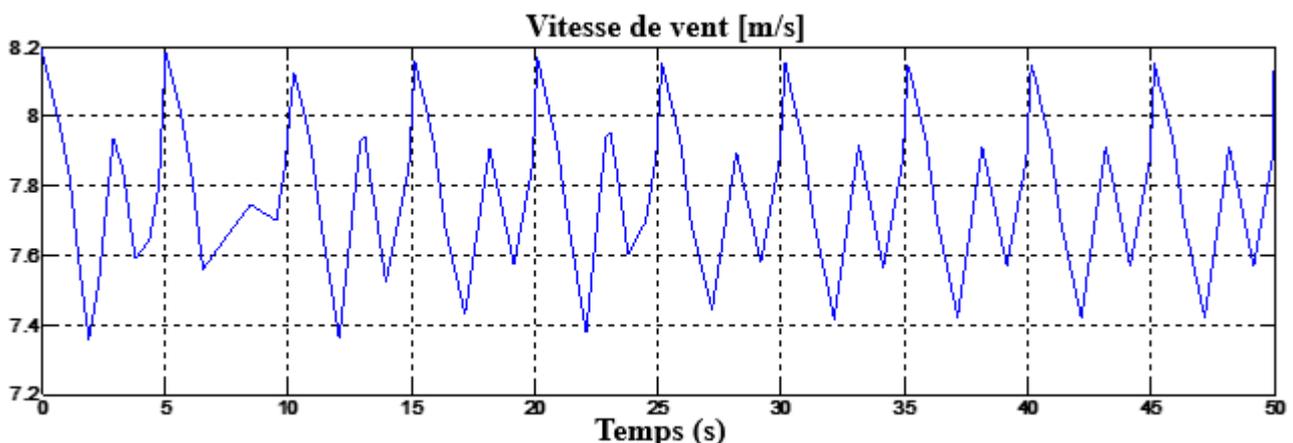


Fig. II. 1. Simulation du profil de la vitesse du vent.

II.3.4. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de masse volumique ρ , animée d'une vitesse V , de longueur d_x , de section S comme indiqué à la figure II.2:

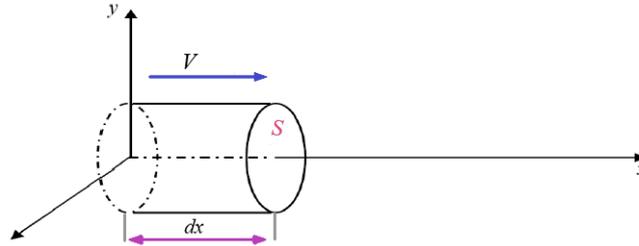


Fig. II. 2. Représentation d'une colonne d'air.

L'énergie cinétique de cette colonne d'air de longueur d_x est donc :

$$dE = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot V^2 \tag{II.2}$$

Avec

$$dm = \rho \cdot S \cdot dl, \text{ masse de cette colonne d'air.}$$

$$\text{Nous savons que : } V = \frac{dl}{dt}$$

D'où

$$dE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot dt \tag{II.3}$$

On déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \tag{II.4}$$

Avec :

- ρ : masse volumique de l'air [kg/m^3],
- V : vitesse instantanée du vent [m/s],
- R : rayon de pale [m],
- E : énergie cinétique [J].

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ($S = \pi \cdot R^2$) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \tag{II.5}$$

II.3.5. Théorie de Betz

La théorie de Betz indique qu'une éolienne ne sera jamais en mesure de convertir plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. C'est l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, a formulé la loi de Betz pour la première fois [CUN01], [GAR01], [GOU82]. Considérons le système de la figure II.3 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne avec axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

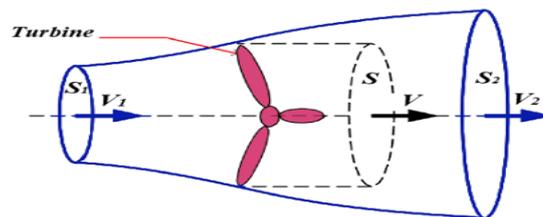


Fig. II. 3. Tube de courant autour d'une turbine éolienne.

La masse d'air en mouvement passant par ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité de l'air, de la superficie et de la vitesse moyenne [LEC01] [GAR01].

$$\text{On considère que la } V \text{ au milieu du courant d'air : } V = \frac{(V_1 + V_2)}{2}$$

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 - V_2)}{2} \tag{II.6}$$

La puissance réelle extraite par les pales du rotor est la différence entre l'énergie éolienne en amont et en aval [LEC01].

$$P_m = \frac{m_0 (V_1^2 - V_2^2)}{2} \tag{II.7}$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans (II.7) :

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) (V_1 - V_2)}{2} \tag{II.8}$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $V_2 = 0$ dans l'expression (II.8) :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{II.9}$$

II.4. Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe en raison de la multiplicité des champs existants, à savoir les champs aérodynamiques, mécaniques et électriques. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, tels que la vitesse du vent, la taille et la forme de l'éolienne.

II.4.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Afin de modéliser la turbine, nous nous appuyerons sur un certain nombre d'hypothèses de simplification, qui sont les plus fréquemment envisagées. Ainsi, nous supposons que [GAI10] :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support ;
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ;
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

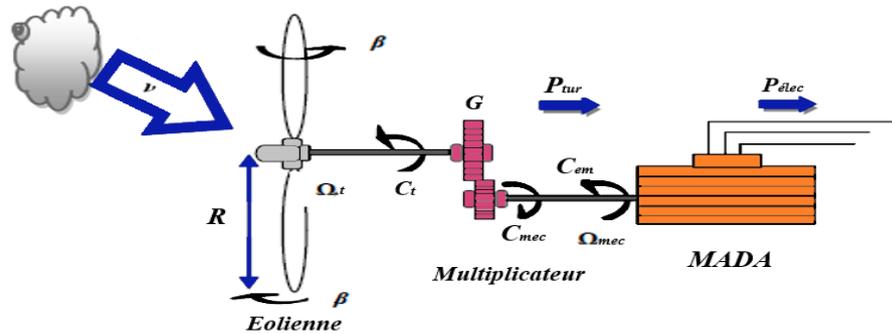


Fig. II. 4. Configuration d'un système de conversion de l'énergie éolienne.

II.4.2. Modèle de la turbine

Les variables d'entrée et de sortie de l'éolienne peuvent être résumées comme suit :

- a) La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'entrée de turbine.
- b) Les quantités spécifiques de la machine, résultant notamment de la géométrie du rotor et de la surface balayée par les pales de la turbine.
- c) La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage. Les quantités de sortie de turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes. [REF06]

II.4.2.1. Puissance mécanique de la turbine

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance disponible (la puissance théorique), due au vent :

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \tag{II.10}$$

S: surface balayée par les pales de la turbine [m^2] ;

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

V : vitesse du vent [m/s] ;

La puissance mécanique de la turbine éolienne est alors :

$$P_{tur} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \tag{II.11}$$

II.4.2.2. Vitesse relative

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine $\Omega_t \cdot R$ et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V} \tag{II.12}$$

λ : qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent ;

Ω_t : vitesse de rotation avant le multiplicateur ;

R : rayon des pales de l'aérogénérateur ;

II.4.2.3. Modèle analytique du coefficient de puissance

Le coefficient de puissance C_p dépend du nombre de pâles du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profil des sections). Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) [BEC13], [BOU06].

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour modéliser le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées [ACK05], [BEC13], [DAV07], [HEI98].

Alors $C_p(\lambda, \beta)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime l'efficacité aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ , qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β .

L'évolution du coefficient de puissance est spécifique à chaque éolienne. D'après les relevés d'éoliennes, l'expression du coefficient de puissance a été approximative, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [AUG10] :

$$C_p^{max}(\lambda, \beta) = \frac{16}{27} \approx 0.593 \tag{II.13}$$

Le coefficient de puissance C_p peut être exprimé comme [GAS12], [COL09]:

$$C_1 \times (C_2 \times \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \times \beta - C_4) \times \exp(-C_5 \times \frac{1}{\lambda_i}) + C_6 \times \lambda \tag{II.14}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{II.15}$$

En augmentant l'angle de calage, le coefficient de puissance et donc le couple diminue de plus le taux de croissance de C_p change de vitesse différente de λ [VEN14].

Où :

$C_1=0.5176, C_2=116, C_3=0.4, C_4=5, C_5=2$ et $C_6=0.0068$.

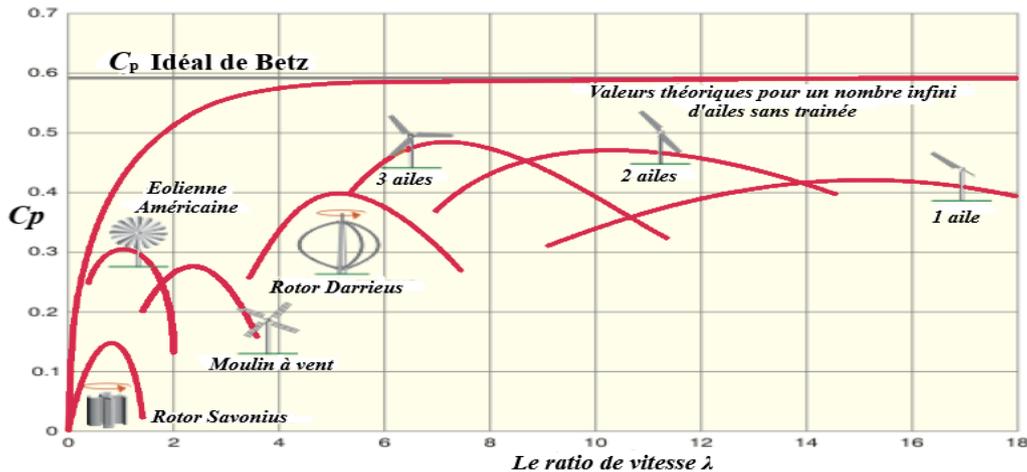


Fig. II. 5. Coefficient de puissance pour différents types d'aérogénérateur.

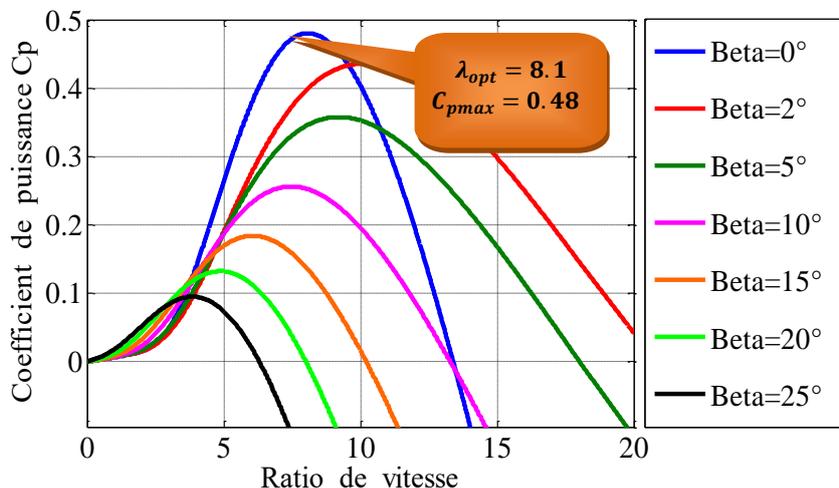


Fig. II. 6. Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.

La figure II.6 montre la fonction du coefficient de puissance C_p par rapport à la vitesse relative λ pour différents angles de réglage β . Il est à noter que le coefficient de puissance passe par un maximum ($C_{pmax}=0.48$), pour un angle de calage $\beta=0^\circ$, une valeur de la vitesse relative λ dite optimale ($\lambda_{opt}= 8.1$).

II.4.2.4. Couple mécanique de la turbine

De l'expression de la puissance produite par la turbine et de la connaissance de la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique s'exprime comme suit :

$$C_{aer} \cdot \frac{P_{disp}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_p(\lambda, \beta) V^3 \frac{1}{\Omega_t} \tag{II.16}$$

C_{aer} : Couple sur l'axe lent (côté turbine).

II.4.2.5. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine se compose de trois pales pivotantes de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , connecté à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur conduit le générateur électrique à une vitesse Ω_g .

➤ **Modèle du multiplicateur**

La boîte de vitesses adapte la vitesse de la turbine (arbre lent) à la vitesse du générateur (arbre rapide). Il est supposé être rigide et modélisé par un simple gain G . L'élasticité et la friction de la boîte de vitesses sont négligées; ainsi, les pertes d'énergie dans la boîte de vitesses sont considérées comme nulles. Le couple aérodynamique de l'éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux relations suivantes :

$$C_r = \frac{C_{aer}}{G} \tag{II.17}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \tag{II.18}$$

Avec: G le gain du multiplicateur de vitesse.

➤ **Modèle de l'arbre mécanique**

La connexion entre la turbine et la partie électrique de l'éolienne est représentée ici par l'équation du mouvement. Plusieurs modèles du comportement mécanique de l'arbre de l'éolienne sont proposés dans la littérature [GAI10], [HEI98], [MAR09]. La masse de l'éolienne est tracée sur l'arbre de la turbine comme J_t l'inertie et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé tient compte de l'inertie totale J consistant en l'inertie de la turbine transférée au rotor du générateur et l'inertie du générateur J_g :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{II.19}$$

Il convient de noter que l'inertie du rotor du générateur est très faible par rapport à l'inertie de la turbine transportée par cet axe. À titre d'illustration, pour une éolienne General Electric de 1,5 MW, le poids du rotor de turbine pèse 23 tonnes [ELA04].

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \times \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{mec} \tag{II.20}$$

La vitesse mécanique est liée à la vitesse de la turbine par le coefficient multiplicateur. Le couple sur l'arbre lent est lié au couple sur l'arbre rapide (côté générateur) par le coefficient du multiplicateur.

Où: J : est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique (C_{em}) produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux (C_{vis}), et le couple (C_r).

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_{vis} \tag{II.21}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \times \Omega_{mec} \tag{II.22}$$

Les équations précédentes permettent d'établir le schéma bloc du modèle de la turbine (figure II.7)

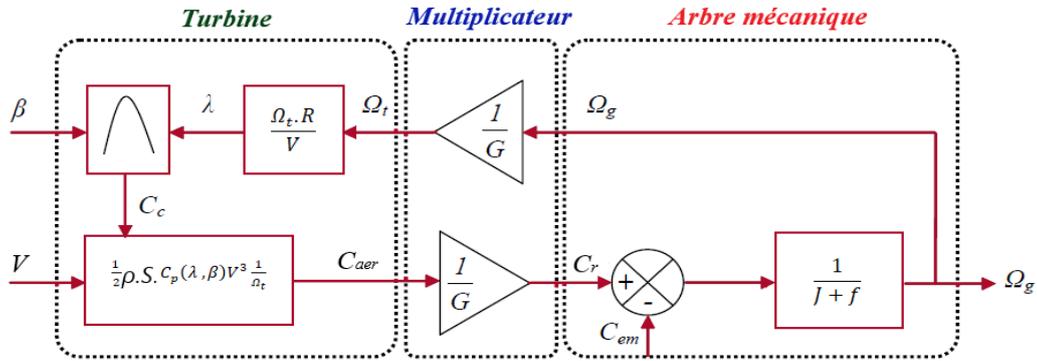


Fig. II. 7. Schéma bloc du modèle de la turbine.

On peut modéliser l'arbre comme suivant :

$$\frac{C_{aer}}{G} - C_{em} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \Omega_g \quad (II.22)$$

C_{aer} et C_{em} : le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_t et J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T et f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_t}{G^2} + J_g = J \quad (II.23)$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \quad (II.24)$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_{aer}}{G} - C_{em} = J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \Omega_g \quad (II.25)$$

II.5. Régulation de la puissance d'une éolienne

II.5.1. Bilan des forces sur une pale

La figure II.8 représente la section longitudinale d'une pale d'éolienne [BER99]. La vitesse du vent entrant devant cette pale est représentée par le vecteur \vec{V} . Le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force qui se décompose en une poussée axiale \vec{F}_{ax} directement par la force mécanique du mât et une poussée dans le sens de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

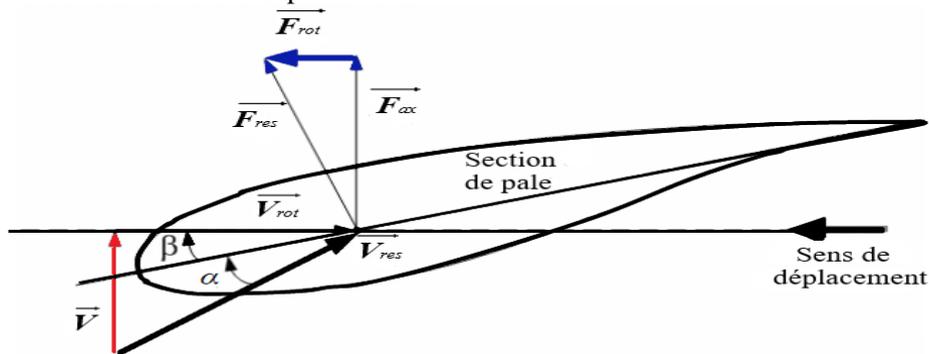


Fig. II. 8. Bilan des forces sur une pale.

Chaque éolienne est ainsi dimensionnée de sorte que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse nominale du vent donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée ou si le générateur nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

II.5.2. Régulation mécanique

Les objectifs de la régulation mécanique sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts d'une part et délimiter la puissance extraite par la turbine éolienne d'autre part. En effet, cette turbine est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nécessaire, dénommée puissance nominale P_n . Cette puissance P_n est obtenue à partir de la vitesse V_n (vitesse nominale) du vent relatif.

Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter sa destruction mécanique, en veillant à ce que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale V_n qui varie entre 11m/s et 15m/s en fonction des technologies, est également spécifié [LOP07]:

- ✓ La vitesse de démarrage V_d (*cut-in*), à laquelle la turbine commence à fournir de l'énergie. Selon le fabricant, V_d varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
- ✓ La vitesse maximale du vent V_m (*cut-off*), pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sécurité opérationnelle. Pour la grande majorité des éoliennes, V_m vaut 25 m/s.

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées (figure II.9):

- **La zone I**, la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est négligeable ($P=0$).
- **La zone II**, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V . Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande sera appliqué pour permettre à la turbine d'extraire la puissance maximale du vent. Pour ce but, l'angle de calage des pales β est maintenu constante à sa valeur minimale (généralement $\beta=0^\circ$). Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- **La zone III**, correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de la turbine est limitée à une valeur maximale pour limiter la puissance P fournie par l'éolienne égale à la puissance nominale P_n , afin d'éviter les dommages. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.
- **La zone IV**, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_m , les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$) pour protéger la partie mécanique de la turbine et prévenir les dommages. Dans ce cas, la turbine s'arrête et la puissance extraite par l'aérogénérateur sera nulle ($P_g=0$).

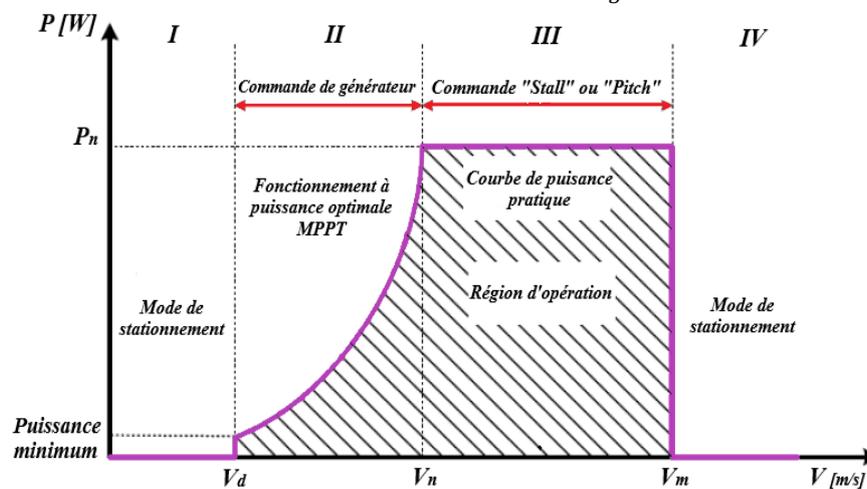


Fig. II. 9. Courbe typique d'une turbine éolienne.

Généralement, il existe quatre systèmes de régulation mécanique pour contrôler la vitesse de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent.

Autrement dit, pour limiter la puissance extraite de la turbine, à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- 1) Le système à calage ou à pas variable « *pitch control* » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance substantiellement constante dans la zone de vitesse III. Cette technique est plus couramment utilisée sur les éoliennes à vitesse variable de moyenne et haute puissance.
- 2) Le système de commande de décrochage aérodynamique passif « *passive stall control* », le plus robuste parce que c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-dessus d'une certaine vitesse du vent, mais la courbe de puissance tombe plus vite: il s'agit donc d'une solution passive. Ce système de commande est généralement destiné aux éoliennes à vitesse fixe.
- 3) Le système à décrochage aérodynamique actif « *active stall control* », n'est qu'une combinaison des deux méthodes mentionnées ci-dessus. Les turbines les plus modernes et de grande capacité utilisent déjà cette technique, comme le proposent certains fabricants danois. Pour les vents faibles et modérés, la commande est de type « *pitch* », et pour le réglage sur la plage à puissance nominale, les pales sont orientées de façon à forcer la perte de portance, ce qui est équivalent à la méthode « *passive stall* ».
- 4) Le système d'orientation « *yaw control* », les vents au-dessus de V_m (vent élevée), un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par la girouette située à l'arrière de la nacelle, ce qui annule toute conversion d'énergie. Ce type de commande est cependant limité aux petites turbines éoliennes parce que cette méthode génère des forces mécaniques importantes sur le mât et les pales. Les grandes éoliennes ne peuvent pas adopter cette méthode de contrôle de la puissance sans causer des forces qui peuvent endommager la turbine.

Les trois premiers systèmes de commande aérodynamiques sont intéressants pour le contrôle des éoliennes de grande puissance, la section suivante explique brièvement ces trois stratégies:

II.5.2.1. Contrôle par angle de calage variable « pitch control » [PAO09]

Principe :

L'angle d'incidence α peut être fortement diminué (ou augmenté) en augmentant (ou en diminuant) l'angle de calage β de quelques dizaines de degrés (20 à 30° généralement). Cela réduit les forces aérodynamiques sur les pales (à la fois pour la portance et pour la traînée) (figure II.10). Le couple est maintenu pratiquement constant et peut être annulé par « mise en drapeau » des pales ($\beta = 90^\circ$) à la vitesse maximale, la puissance est donc limitée. Ce type de contrôle est le plus couramment utilisé pour les éoliennes moyennes et grandes tailles.

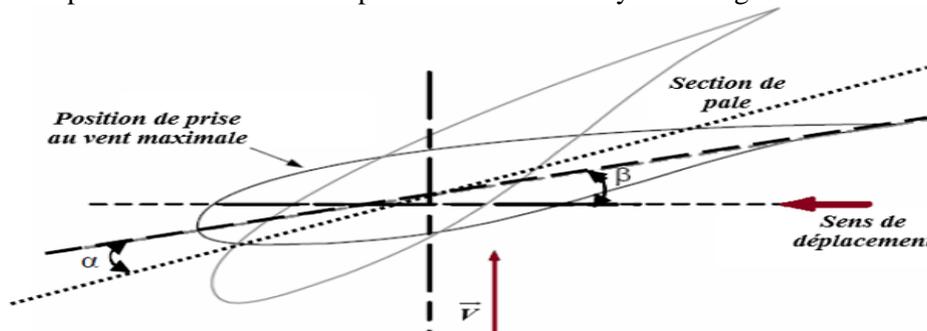


Fig. II. 10. Variation de l'angle de calage d'une pale.

Avantages :

La diminution de l'angle d'incidence α à zéro ou limite négative toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit considérablement les forces à des vitesses de vent élevées. Comme la force de poussée axiale est également réduite, les forces sur la tour sont réduites. Cet avantage est encore amplifié à vitesse variable puisque l'excès d'énergie lors d'une rafale (dont la variation est trop brusque pour que le mécanisme d'orientation puisse compenser les effets) peut être stocké dans l'inertie du rotor en variant sa vitesse (si le générateur l'accepte) tandis que la puissance transmise reste pratiquement constante. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de freins mécaniques puissants pour les arrêts d'urgence, un frein « parking », est suffisant.

Les éoliennes équipées de ce système de commande mécanique peuvent fournir plus d'énergie que les éoliennes à décrochage « stall » dans les mêmes conditions de fonctionnement, même lorsque la densité d'air est faible (sites à haute altitude ou à haute température).

Inconvénients :

Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celles du système « stall ».

L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine; si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien. De plus, le système de commande a besoin d'une sensibilité suffisante pour suivre les variations du vent, ce qui augmente les coûts.

Les deux images suivantes montrent deux types d'actionneurs pour limiter la puissance de l'éolienne, chaque pale a son propre actionneur « pitch control », la figure II.11 montre un dispositif « pitch » utilisant un actionneur hydraulique (figure II.11-a) et trois moteurs électriques (figure II.11-b).



(a) [BUR01]



(b) [PAO09]

Fig. II. 11. Système pitch contrôle, utilisant : (a) un actionneur hydraulique, (b) 3 moteurs électriques placés à l'intérieur du moyeu.

II.5.2.2. Contrôle par décrochage aérodynamique passif « passive stall control »

Principe :

Ce type de commande en boucle ouverte est basé sur une conception appropriée du profil de la pale. Lorsque la vitesse du vent dépasse la valeur nominale, le flux d'air du côté supérieur de la pale commence à perdre de la vitesse, ce qui forme des vortex, ces turbulences causent une perte de sustentation aérodynamique de la pale et permet à l'excès de puissance de se dissiper. Ce contrôle agit uniquement pour limiter la puissance dans les vents violents, régulant la puissance à ou en dessous de sa valeur nominale. Le fonctionnement à des vents faibles reste sans aucun contrôle, de

sorte que la puissance obtenue dépend des caractéristiques mécaniques de la turbine et des caractéristiques électriques de la machine.

Avantages :

Ce concept simple et normalement robuste n'implique aucun système mécanique ou électrique auxiliaire, ce qui facilite la maintenance et réduit les coûts d'entretien et de fabrication.

Inconvénients :

Comme le montre la figure II.12, on peut voir que le contrôle « *passive stall* » ne peut pas garder la puissance capturée P_m à une valeur constante. Elle peut dépasser la puissance nominale à quelques vitesses du vent, ce qui n'est pas une caractéristique souhaitable.

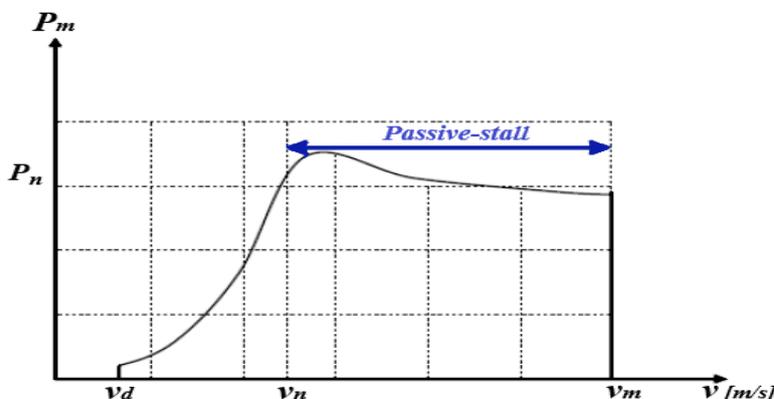


Fig. II. 12. Turbine éolienne commandée par « *passive stall* ».

La puissance captée par la turbine est seulement en fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation. En cas de défaillance sur le réseau, si l'énergie collectée ne peut pas être transmise au réseau, il est nécessaire d'avoir des freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie recueillie lors du freinage, même en cas de problème sur la transmission, qui nécessite un système de freinage sur l'arbre de turbine lui-même (couple de freinage très élevé). En général, les fabricants prévoient de pouvoir utiliser les pointes des pales comme freins à air en les faisant pivoter de 90° en cas d'urgence. Dans ce cas, le système de freinage mécanique peut être monté derrière le multiplicateur de vitesse où le couple est inférieur.

Le freinage d'urgence peut également être assuré par le générateur à condition qu'un circuit électrique de récupération d'énergie résistive connecté soit fourni (freinage dynamique). En outre, pendant le fonctionnement normal, le générateur doit être capable de freiner la turbine et d'imposer un décrochage à mesure que la vitesse du vent augmente, ce qui peut nécessiter une dimension plus grande que celle correspondant aux conditions de conception [LAV05].

Les pales doivent être construites spécialement et une technologie sophistiquée est nécessaire pour cela. En outre, sans analyse aérodynamique minutieuse, des problèmes de vibration peuvent se produire [MAT06].

II.5.2.3. Contrôle par décrochage aérodynamique actif « *active stall control* »

Principe :

L'angle d'incidence α peut être légèrement augmenté (ou diminué) en diminuant (ou en augmentant) l'angle d'incidence β de quelques degrés (habituellement de 3° à 5°). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu presque constant jusqu'à ce que le décrochage complet, à quel point il tombe rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

Avantages :

La turbine peut être adaptée aux conditions de fonctionnement. Les actionneurs électriques ou hydrauliques requis sont petits. Les mouvements de rotation des pales restent de petite amplitude. La possibilité de provoquer délibérément un décrochage facilite les conditions de freinage. Le frein mécanique peut être monté derrière la boîte de vitesses où le couple est plus faible, et n'est utilisé que comme un frein « *parking* ».

Inconvénients :

Parce que ce système mécanique bénéficie des avantages du système « *pitch* », il présente les mêmes inconvénients de ce dernier, à savoir le coût élevé de fabrication et d'entretien ainsi que la difficulté de maintenance.

II.5.3. Régulation électrique (contrôle MPPT)

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent être en mesure de produire la quantité maximale d'énergie à partir de l'énergie disponible dans le vent. C'est pourquoi de nombreux systèmes de contrôle de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (*MPPT en anglais Maximum Power Point*

Tracking). Ces systèmes utilisent différents moyens pour atteindre ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage de la pale, ou la vitesse de l'hélice, ou même de jouer avec la commande du générateur.

La recherche d'une puissance maximale est un processus permanent et l'éolienne s'adapte à chaque variation du vent pour être dans une configuration d'extraction de puissance maximale. Ces systèmes introduisent également des dispositifs de sécurité qui permettent, par exemple, de limiter l'énergie produite lorsque le vent devient trop fort et risque d'endommager l'éolienne [MOU14].

Selon la littérature spécialisée, les éoliennes sont de préférence contrôlées par les moyens mécaniques aérodynamiques décrits ci-dessus. Toutefois, suivant les principes de conversion de l'énergie éolienne, il semble qu'une autre façon de réguler l'énergie produite par l'éolienne est d'agir sur sa vitesse de rotation.

Plusieurs configurations sont réalisables, avec des machines synchrones ou asynchrones et c'est ici que le domaine des asservissements des machines électriques prend sa place. Il y a quelques années, cette discipline a déjà développé différentes formes de contrôle de la vitesse, dont plusieurs sont applicables aux systèmes de conversion de l'énergie éolienne [LOP07].

Les systèmes traditionnels fonctionnent typiquement à fréquence fixe, imposée par le réseau auquel ils sont connectés. Le fait de travailler à fréquence fixe et donc, à vitesse de rotation presque fixe, implique qu'il n'y a qu'une seule vitesse de vent pour laquelle l'énergie disponible est correctement exploitée. Pour les autres vitesses de vent, la capture d'énergie se fait de façon sous-optimale.

Pour donner intérêt à la vitesse variable, on donne l'exemple de la figure II.13; d'où pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 ; on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B).

La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si la puissance maximale doit être extraite, il est nécessaire de régler la vitesse du générateur à une vitesse plus élevée Ω_2 . Il est donc nécessaire de rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

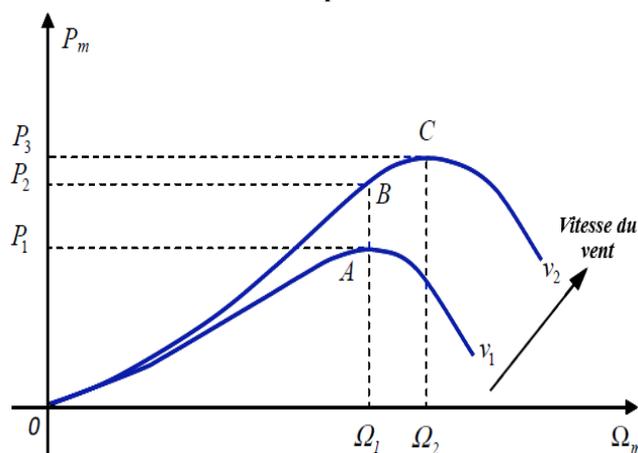


Fig. II. 13. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

De la caractéristique ci-dessus (figure II.13), il est clair que si l'éolienne et, par conséquent, le générateur est actionné à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

Pour cela, et pour pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il est nécessaire d'être en mesure d'ajuster la vitesse de rotation de l'arbre du générateur en fonction de la vitesse du vent.

Le MPPT peut être défini comme une stratégie de gestion pour suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont habituellement associés aux générateurs d'énergie par l'entremise de l'électronique de puissance afin de maximiser l'efficacité énergétique du système grâce à la variation de la vitesse du vent. [TRA10].

Les caractéristiques de la figure II.14 représentent les allures des puissances théoriquement disponibles au niveau d'une turbine éolienne de grande puissance en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice pour différentes vitesses du vent. À partir de ces caractéristiques, il est clair que si l'éolienne et, par conséquent, le générateur est actionné à une vitesse fixe (p. ex. 1900 tr/min à la figure II.14), les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour atteindre ces maxima, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1200 et 2000 tr/min pour cet exemple (courbe de réglage MPPT) [GHE11].

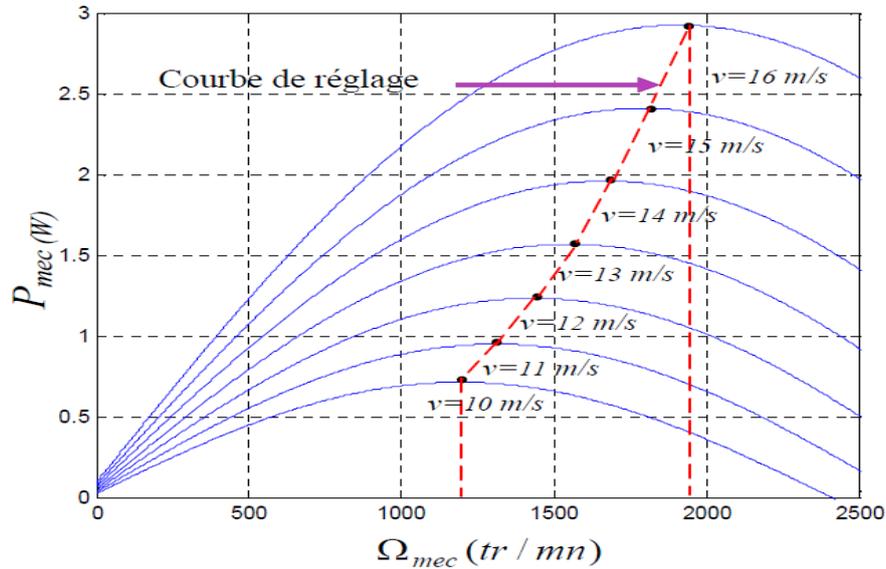


Fig. II. 14. Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Donc, l'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale v_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale v_m qui pourrait endommager la turbine.

II.6. Résultats de Simulations

Ces résultats de simulations sont obtenus pour une éolienne qui présente les paramètres suivants :

Nombre de pale = 3.

Diamètre d'une pale $R = 3$ m.

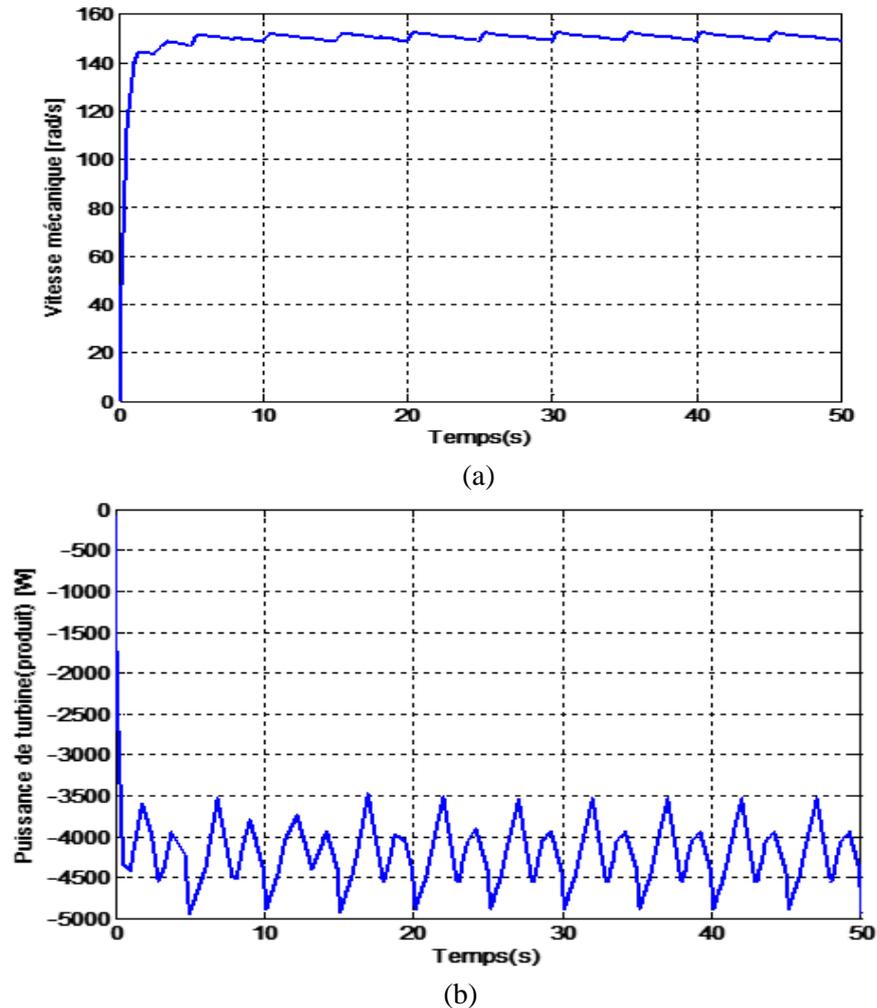


Fig. II. 15. (a) La vitesse mécanique et (b) la puissance produite.

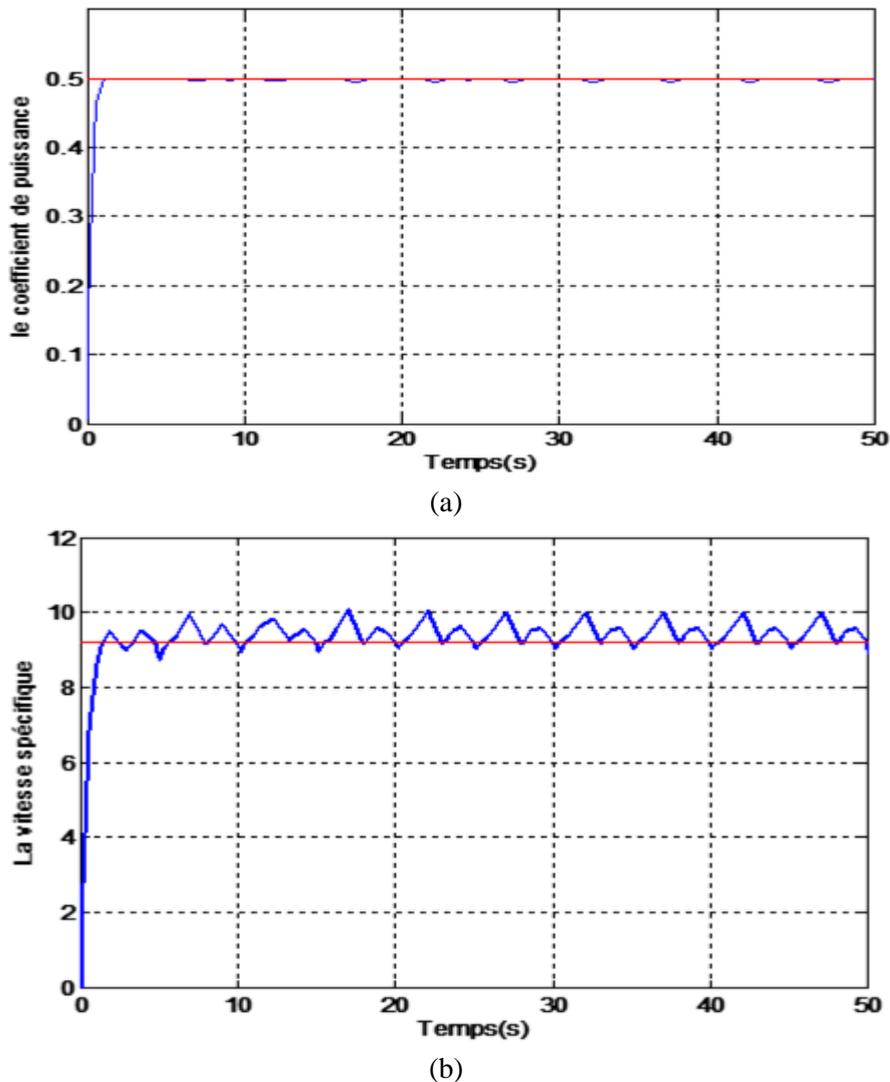


Fig. II. 16. (a) Le coefficient de puissance et (b) La vitesse spécifique.

II.7. Interprétations des résultats

Nous pouvons remarquer que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence, qui est variable en fonction du profil de vent imposé, le coefficient de puissance et la vitesse spécifique sont maintenus à leurs valeurs optimales. Cela permet d'avoir la puissance extractible maximale.

Grâce à l'évolution du coefficient de puissance, on peut voir qu'il est approximativement à sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle fixe β ($\beta = 20$) qui nous donne un λ optimal. Il convient de noter qu'il atteint une valeur maximale de 0,5. Ces résultats de simulation montrent la fiabilité du contrôle de la vitesse du vent.

Les résultats de la simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse du générateur, et ce dernier, est adapté à la variation de la vitesse du vent. Cela montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

II.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation, la simulation et l'analyse d'un système éolien. Nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents constituants du système éolien. En effet, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été mis en place à savoir le profil du vent appliqué, le coefficient de puissance, ainsi que les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés.

Dans la suite de ce chapitre, Nous avons donc centré notre étude sur la commande de la turbine éolienne dans la zone de fonctionnement optimale, une explication des zones de fonctionnement et des différentes stratégies de contrôle de la puissance ont été faites permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent.

II.9. Références bibliographiques

- [ACK05] T. Ackermann, « Wind power in power systems »; John Wiley and Sons, Ltd, Londres, 2005.
- [AIM02] S. El Aimani, 'Modélisation de Générateurs Eoliens à Vitesse Variable Connectés à un Bus Commun', Forum International sur les Energies Renouvelables, Tétouan, Maroc, pp. 356 – 362, 2002.
- [AHM10] A. Ahmidi, « Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques »; Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, Décembre 2010.
- [AUG10] D. Aguglia, P. Viarouge, R. Wamkeue and J. Cros, 'Determination of Fault Operation Dynamical Constraints for the Design of Wind Turbine DFIG Drives', Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 81, N°2, pp. 252 – 262, 2010.
- [BEC13] A. Bechouche, « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : application à une éolienne »; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, Avril 2013.
- [BER99] P. Berlu, « Calcul des Efforts Subis par les Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance »; Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille I, France, 1999.
- [BOU06] B. Boukhezzar, « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable »; Thèse de Doctorat, Université Paris XI, Février 2006.
- [BOY06] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [BUR01] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, « Wind Energy Handbook »; John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [COU08] V. Courteuisse, « supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique »; Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, Novembre 2008.
- [CHE06] E. Chekhet, I. Shapoval, V. Mikhalsky and V. Sobolev, « Control of the stand-alone doubly fed induction generator supplied by the matrix converter »; Proc. of the International Workshop on Renewable Energy Based Units and Systems REBUS'06, pp.35-40, St. Petersburg, Russia, June 2006.
- [COL09] LP Colas, F Francois, B Yong dong Li. A Modified Vector Control Strategy for DFIG Based Wind Turbines to Ride-Through Voltage Dips. Power Electronics and Applications, EPE'09. 2009: 1-10.
- [CRA03] M. Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques »; Hermès, Lavoisier, ISBN 2-7462-0606-4, 2003.
- [CUN01] G. Cuntly. Eoliennes et aerogenerateurs guide de l'énergie éolienne. Edisud, 2001.
- [DAV07] A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie »; Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007.
- [ELA04] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension »; Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.
- [GAR01] Dr. Gary L. Johnson. Wind Energy Systems. Electronic Edition, 2001.
- [GAS12] Robert Gasch, Jochen Twele. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Springer.2012.
- [GAI10] 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 de Henri Poincaré, Nancy I, France, Avril 2010.
- [GHE11] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [GOU82] D. Gourieres. Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations. Eyrolles, 1982.
- [HEI98] S. Heier, « Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems »; Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [JEN00] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, « Embedded generation »; The Institution of Electrical Engineers (IEE), London, 2000.
- [LAV05] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires »; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, Décembre 2005.
- [LEC01] P. Leconte M. Rapin, E. Szechenyi. Eoliennes. Techniques de l'Ingénieur, BM 4640 22p, Janvier 2001.
- [LOP07] M. Lopez, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée »; Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud 11, France, 2007.
- [MAR09] D. Marin, « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires »; Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, Avril 2009.
- [MAT06] S. Mathew, « Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics »; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
- [MIR05] A. Mirecki, 'Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance', Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [MOU14] A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [MUL03] B. Multon, « Production d'énergie électrique par sources renouvelables »; Techniques de L'Ingénieur, référence D4005, Mai 2003.
- [PAO09] L.Y. Pao, K.E. Johnson, « A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms »; American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA June 10-12, 2009.
- [REF06] A.M. El Refaie, T.M. Jahns, D.W. Novotny, « Analysis of Surface Permanent Magne Machines with Fractional Slot Concentrated Windings », IEEE Transactions on Energy Conversion 2006.
- [TRA10] D.H. Tran, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale »; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Septembre 2010.
- [VEN14] G. Venu Madhav, Y. P. Obulesu. A Fuzzy Logic Control Strategy for Doubly Fed Induction Generator for Improved Performance under Faulty Operating Conditions. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 4, No. 4, pp. 419 -429, 2014.
- [ZER14] N.Zerzouri, H.Labar. Active and Reactive Power Control of a Doubly Fed Induction. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 5, pp. 244-251, 2014.

CHAPITRE III :

MODELISATION ET SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la modélisation et la simulation de machine asynchrone à double alimentation dédié à une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable. Ce chapitre est divisé en trois parties :

La première partie est consacrée à la représentation de la MADA.

La deuxième partie est fait l'objet d'une étude de modélisation de la MADA. Des modèles mathématiques de la MADA sera introduit.

Des simulations seront présentées avec interprétation tirant une conclusion dans la troisième partie.

III.1. Introduction

La chaîne de conversion électrique préférée dans ce travail est basée sur l'utilisation d'un générateur électrique à rotor bobiné type de machine asynchrone, communément connu sous le nom d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA), associée à un convertisseur sur le côté de la machine. Ce choix est justifié par le fait que cette machine est actuellement le générateur électrique le plus commun dans les systèmes d'énergie éolienne à haute vitesse variable [NAIT].

La littérature montre le grand intérêt pour la machine à double alimentation (MADA) pour diverses applications : en tant que générateur pour l'énergie éolienne ou comme moteur pour des applications industrielles telles que le laminoir, la traction ferroviaire ou la propulsion marine [CAM03], [ELA04], [KHO06], [SAL07], [VID04] et l'aéronautique [KHA03]. Cet intérêt est essentiellement dû aux degrés de liberté qu'il offre en raison de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de lui fournir un convertisseur sur les côtés stator et rotor.

L'une des solutions les plus intéressantes pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne utilisant la MADA comme générateur consiste à connecter le stator de cette machine directement au réseau, tandis que son rotor est alimenté par une interface composée de deux convertisseurs statiques réversibles MLI à trois phases, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur, (en anglais "back to back mode") [GAI07], [GHE07], [GHE11], [MOU14], [PEN96].

Cette solution est plus attrayante pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de la vitesse de synchronisme puisque cette plage de fonctionnement a un faible glissement, et donc l'onduleur associé au rotor doit traiter seulement une fraction de 20% à 30% de la puissance nominale du système de convertisseur. Cela signifie que les pertes dans le convertisseur sont plus faibles (la puissance fournie au rotor est faible) ainsi que le coût du convertisseur est réduit. C'est la raison pour laquelle cette machine se trouve dans les systèmes de production à haute puissance avec une vitesse variable et une fréquence constante. Une deuxième raison est la possibilité de contrôler la puissance active et réactive dans le stator via le contrôle du convertisseur de puissance.

En fait, à travers ce chapitre la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées seront présentés dans la première partie. Dans une deuxième fois, nous nous souviendrons des différents modèles mathématiques de la MADA. Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique grâce au MADA. L'exploitation de ce dernier sera ensuite brièvement décrite, puis la MADA avec son convertisseur de puissance associé sera modélisée dans le point de repère du Park. Les différents éléments de ce système ont été simulés sous MATLAB/SIMULINK.

III.2. Description du système éolien

Le système de conversion du vent à vitesse variable basé sur la MADA est illustré à la figure III.1. L'éolienne conduit la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesses (BDV). Le stator du MADA est directement relié au réseau électrique, tandis que son rotor est relié au réseau, mais via un filtre à courant en trois phases et deux convertisseurs statiques contrôlés en trois phases de modulation de la largeur des impulsions (MLI) en cascade à travers un bus continu.

L'intérêt majeur de ce système d'énergie éolienne réside dans le fait que le convertisseur du côté rotor ou du côté MADA "CCM" et le convertisseur du côté du réseau "CCR" transférant la puissance de glissement et le routage vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En général, le dimensionnement de la chaîne du rotor est limité jusqu'à 30 % de la puissance nominale du stator de la MADA, ce qui est suffisant pour assurer une variation de 30 % de la plage de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. C'est le principal avantage de cette structure.

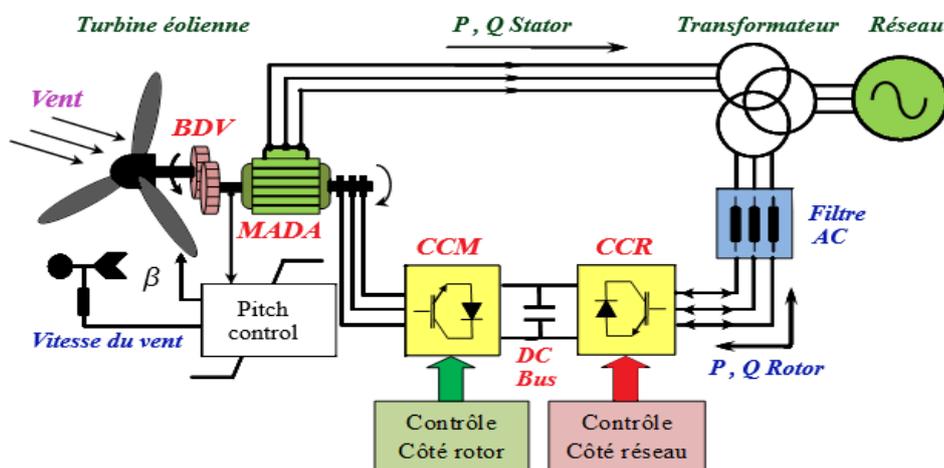


Fig. III.1. Système de conversion éolien à base de la MADA.

III.3. La machine asynchrone à double alimentation (MADA)

III.3.1. Définition

Connue depuis 1899, la *Machine Doublement Alimentée* (MADA) (en anglo-saxon "*Doubly Fed Machine*" – DFM), est une machine en trois phases propulsée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Il a d'abord été conçu pour être utilisé comme un moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilité rencontrés l'ont alors fait abandonner pendant un certain temps. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la technologie des microordinateurs, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles, dont le principal intérêt réside dans les possibilités de contrôle du flux de puissance pour les vitesses caractéristiques hypo et hyper synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation des flux, apparue au début des années 1970 et appliquée avec succès à cette machine, a donné naissance à un outil puissant pour son contrôle [TAP03], [DJE10], [DJE14A], [DRI05], [HOP00], [MER10].

III.3.2. Structure

La machine asynchrone à double alimentation a un stator similaire à celui des machines conventionnelles en trois phases (asynchrones avec cage ou synchrone), le plus souvent composée de tôles magnétiques empilées équipées de fentes dans lesquelles les enroulements sont insérés. L'originalité de cette machine vient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les empilements de tôles, mais il est composé de trois enroulements reliés dans une configuration d'étoile, dont les extrémités sont reliées à des anneaux conducteurs sur lesquels les balais frottent lorsque la machine tourne [POI03].

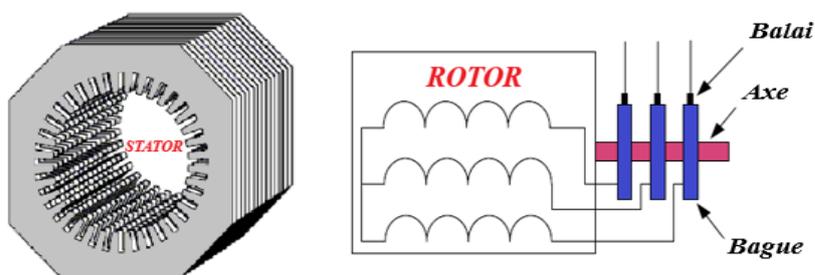


Fig.III. 2. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

III.3.3. Classification des machines asynchrone à double Alimentation

Pour être classée comme une machine à double alimentation, une machine doit avoir des sources actives à la fois sur le stator et le rotor. Dans les systèmes modernes, l'une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être contrôlée pour fournir le fonctionnement à vitesse variable du système, soit comme un moteur ou un générateur. À partir d'une recherche littéraire développée dans la littérature dans le domaine des machines à double alimentation [DEN10], [KHO06], [LIN03], [SAL07], [VID04], nous trouvons :

➤ *Machine à double alimentation à rotor bobiné (simple)*

Il s'agit d'une machine asynchrone avec rotor bobiné occupé par un système balais-bague (*Single Doubly Fed Induction Machine* – SDFIM). La figure III.3 montre le diagramme de principe de cette dernière, de sorte que le stator est alimenté directement à partir du réseau, et le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur AC-AC de sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il convient de noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé d'un redresseur et d'un onduleur ou d'un convertisseur direct (AC/AC) : convertisseur cyclo-convertisseur ou convertisseur matriciel [DEN10], [SAL07].

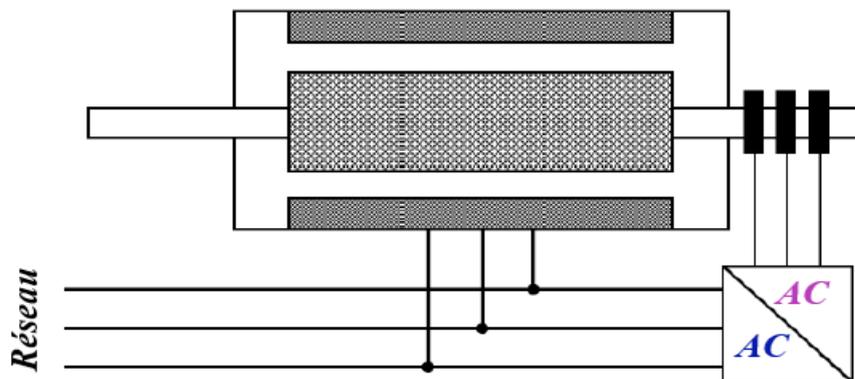


Fig. III. 3. Schéma de principe de la MADA à rotor bobiné simple.

L'avantage de cette machine est que le rotor n'est plus une cage d'écureuil ou composé d'aimants permanents, mais d'enroulement triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques raccordé en étoile et dont

l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague et permet une connexion externe des bobinages au rotor. Cette connexion est une liaison d'alimentation externe qui permet de réaliser un contrôle des grandeurs rotoriques [ROB10] (figure III.4).



Fig.III. 4. Machine asynchrone à rotor bobiné (standard). [AGU10]

➤ **Machine à double alimentation en cascade asynchrone**

La machine à double alimentation en cascade asynchrone (*Cascaded Doubly Fed Induction Machine – CDFIM*) se compose de deux machines asynchrones avec des rotors bobinés reliés mécaniquement et électriquement, comme le montre la figure III.5. Le stator de l'une des deux machines est relié directement au réseau tandis que l'autre est connecté au réseau via un convertisseur de fréquences AC/AC. Il est également possible de contrôler l'ensemble du système à travers le stator fourni par le convertisseur [DEN10], [HOP01].

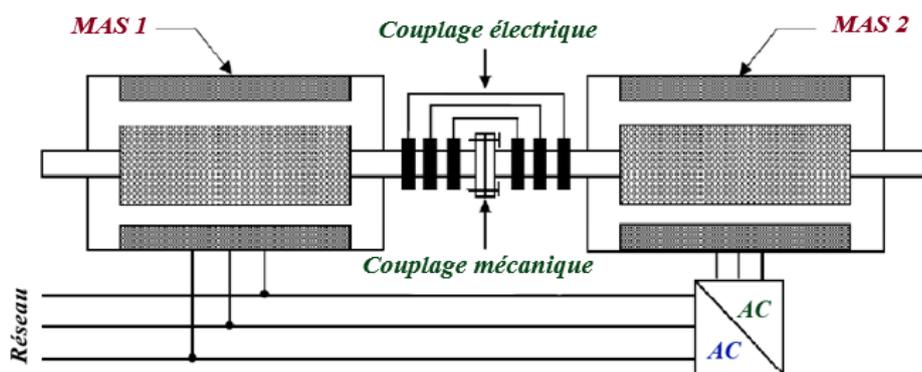


Fig. III. 5. Schéma de principe de la MADA en cascade asynchrone.

Ce type de machine offre la possibilité d'avoir un contrôle de puissance active et réactive découplé semblable à celui de la machine à double alimentation standard [DEN10].

➤ **Machine à double alimentation cascadée à un repère**

Il s'agit de deux machines asynchrone de type cage reliée mécaniquement (*Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine – SFC-DFIM*). La figure III.6 montre le schéma de principe de cette machine, de sorte que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau tandis que l'autre est connecté au réseau via un convertisseur AC-AC.

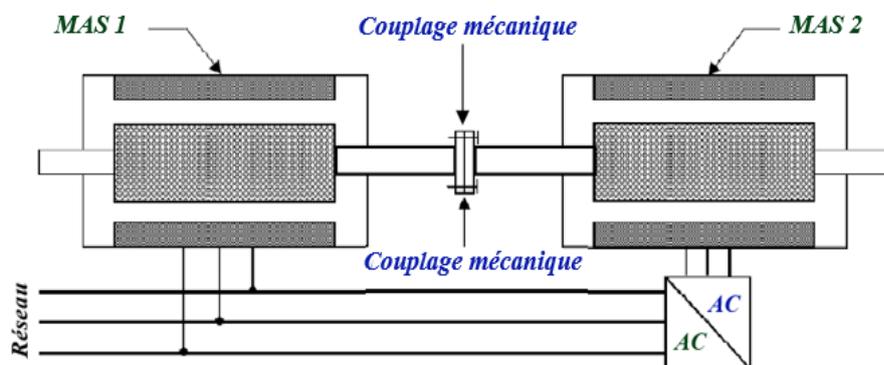


Fig. III. 6. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

➤ **Machine à double alimentation sans balais**

Brushless Doubly Fed Induction Machine (BDFIM), cette machine a la particularité d'avoir deux enroulements en trois phases avec différents nombres de paires de pôles logés dans la même armature stator. L'un des deux enroulements est relié directement au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second enroulement, avec une section

transversale plus petite du conducteur, permet de varier les courants d'excitation de la machine à travers un convertisseur AC/AC (figure III.7). Le rotor de cette machine a une structure spéciale, différente de la cage d'écureuil classique, mais tout aussi robuste: il se compose de plusieurs boucles concentriques de conducteur, où le nombre de paires de pôles est égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

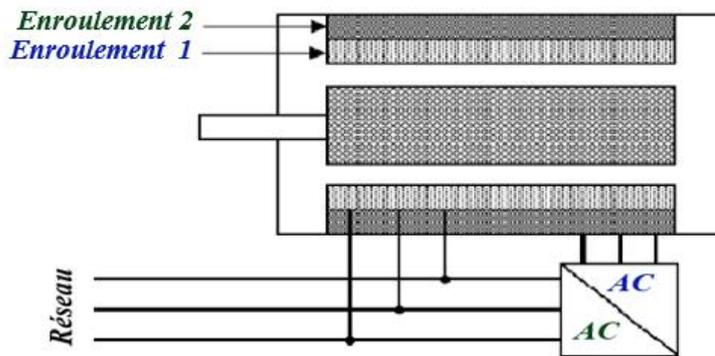


Fig. III. 7. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.

Cette machine a l'avantage de permettre une opération à vitesse variable, d'ailleurs le convertisseur placé entre le stator de faible puissance et le réseau est dimensionné uniquement pour transmettre la puissance destinée à l'aimantation de la machine et est donc moins volumineux et moins cher. La machine n'a pas de contacts glissants, mais a deux stators avec un nombre différent de paires de pôles, ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication.

Parmi les types des machines à double alimentation sans balais qui ont gagné beaucoup d'intérêt ces dernières années, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable (*Doubly Fed Reluctance Machine*) qui se compose d'un stator identique à celle de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable) [DEN10].

III.3.4. Comparaison entre les différentes MADA

Le tableau III.1 donne une brève classification et une comparaison des variantes les plus attrayantes des machines à double alimentation dans la littérature. Dans ce cas, les critères de comparaison sont basés sur : la complexité de la construction de la machine, la puissance traitée par le convertisseur associé à la machine et la stratégie de contrôle [DEN10], [MOU14].

Selon la classification illustrée ci-dessus, on peut voir d'un point de vue technique que toutes les machines à double alimentation doivent fonctionner à une vitesse autour de celle du synchronisme et nécessitent un convertisseur de puissance bidirectionnel pour leur contrôle.

Dans cet état, plus la plage de fonctionnement (qui doit être étroite autour de la vitesse de synchronisme) est étroite, plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite. Même du point de vue de la stratégie de contrôle, il n'y a pas beaucoup de différence entre ces machines [DEN10].

Tableau. III. 1. Classification et comparaison des différentes variantes de la MADA. [DEN10]

Type de la machine à double alimentation	Construction de la machine	Convertisseur de puissance	Méthode de commande
Machine à rotor bobiné	- Etablie	- Dépend de la vitesse opérationnelle	- Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine en cascade asynchrone	- Difficile	- Comme la machine à rotor bobiné	- Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine sans balais	- Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	- Comme la machine à rotor bobiné	- Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la machine à rotor bobiné
Machine à réluctance variable	- Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	- Comme la machine à rotor bobiné	- Comme la machine à rotor bobiné

Du point de vue de la perception visuelle commerciale, il est très difficile de prédire quel type de machine à double alimentation sera finalement couronnée de succès. Cependant, nous pouvons affirmer à partir de la littérature [DEN10]

que la machine à rotor bobiné (simple) et la machine à réluctance variable restent plus attrayants pour une pléthore de chercheurs. D'autre part, il y a actuellement un intérêt croissant pour la machine asynchrone en cascade et la machine sans balais, qui est visuellement perçue comme ayant une plus grande efficacité en raison du courant raccourci dans leurs rotors [HOP01].

Jusqu'à présent, et grâce aux développements récents dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, la machine standard à double alimentation (simple) reste la machine la plus attrayante de l'avis de nombreux chercheurs, car elle est bien adaptée à plusieurs domaines d'application. En effet, elle a une construction établie et simple par rapport à d'autres types. Elle est contrôlée sur la base de convertisseurs de puissance (AC/AC ou AC/DC/AC); ces convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le coût supplémentaire des enroulements du rotor est compensé par les économies réalisées sur le convertisseur. Cette machine fera l'objet de modélisation et de contrôle dans le reste de cette thèse.

III.3.5. Principe et mode de fonctionnement de la MADA

III.3.5.1. Fonctionnement en moteur avec alimentation unique au stator

Le principe de fonctionnement des machines asynchrones est basé sur les lois de l'induction, c'est pourquoi elles sont communément appelées machines à induction dans la littérature scientifique.

Considérons le rotor et ses enroulements court-circuités, un système de tensions sinusoïdales d'amplitude et de fréquence constantes alimentant le circuit statorique. Au moment de la mise en service les enroulements statoriques produisent un champ magnétique tournant à la vitesse dite de synchronisme Ω_s telle que :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{2\pi \cdot f}{p} \tag{III.1}$$

Les conducteurs du rotor sont ensuite balayés par le champ de stator et son siège de $f_{em}(s)$ induit à la fréquence du rotor, ce qui entraîne des courants rotoriques.

Selon la loi de Lenz, ces courants produiront à leur tour un champ magnétique induit qui s'opposera à la cause qui a donné lieu à eux, provoquant la création d'un couple de forces électromagnétiques. Sous l'action de ce couple, la partie tournante entre en rotation afin d'éliminer la différence de vitesse existant avec le champ rotatif et subit une accélération qui ne sera annulée avec l'équilibre des couples moteur et résistant.

Par conséquent, la génération de couple s'accompagne nécessairement d'une déviation entre la vitesse du champ rotatif produit par le stator et la vitesse de rotation du rotor, ce dernier se stabilisant à une valeur Ω proche de la vitesse de synchronisme Ω_s . [LOC]

L'écart de vitesse (ou vitesse de glissement) Ω_r est donné par l'expression :

$$\Omega_r = \Omega_s - \Omega \tag{III.2}$$

Lorsque le rotor tourne à la vitesse Ω , la pulsation rotorique est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p \cdot \Omega \tag{III.3}$$

Il est d'usage de caractériser la différence entre le synchronisme et les vitesses de rotation par une grandeur sans dimension, le glissement.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \tag{III.4}$$

Dans le fonctionnement du moteur, le glissement est égal à 1 à vitesse zéro, puis diminue pendant la phase d'accélération du démarrage, sa valeur étant de quelques % en état stable ($0 \leq g < 1$), et augmente lorsque la charge est augmentée.

La vitesse est alors déterminée par la relation suivante :

$$n = n_s \cdot (1 - g) \tag{III.5}$$

En exprimant l'écart de vitesse par $(n_s - n)$, la fréquence des courants rotoriques peut être déterminée par la relation suivante :

$$f_r = p \cdot (n_s - n) = g \cdot f \tag{III.6}$$

C'est cette différence entre la fréquence du réseau et la vitesse du rotor qui explique le caractère asynchrone de la machine. [LOC]

III.3.5.2. Fonctionnement en générateur avec double alimentation

La machine asynchrone, comme d'autres machines électriques, est réversible et peut fonctionner en mode générateur. La figure III.8 montre l'allure de la caractéristique mécanique couple/vitesse de la machine asynchrone [LEC01].

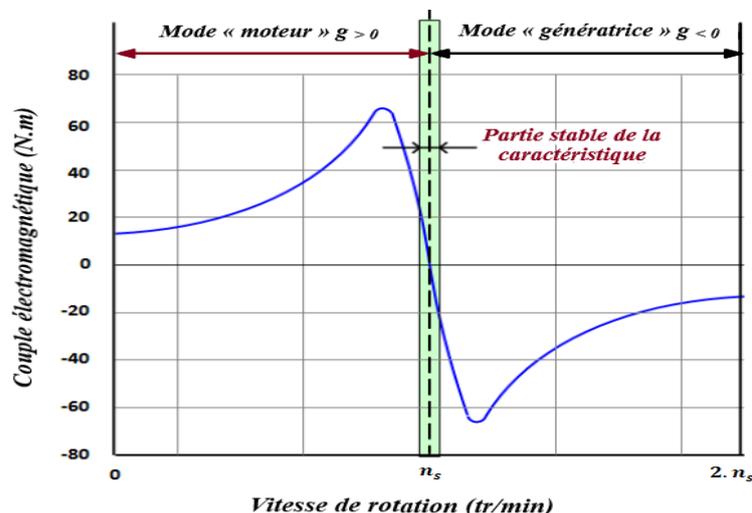


Fig. III. 8. Caractéristique mécanique couple/vitesse de la machine asynchrone.

L’observation de cette caractéristique montre que si la machine est entraînée à une vitesse de synchronisme par un système mécanique auxiliaire, le rotor tourne à la même vitesse que le champ statorique ($g = 0$), il n’y a pas d’induction et donc aucun couple n’est produit, c’est le mode synchrone. D’autre part, afin de garantir un fonctionnement stable, la machine doit maintenir une vitesse de rotation proche du synchronisme ($g \rightarrow 0$).

Enfin, selon que la vitesse de rotation n est inférieure (hypo synchronisme : $g > 0$) ou supérieure (hyper synchronisme : $g < 0$) que la vitesse du champ de rotation n_s , la machine développe respectivement un couple de conduite (fonctionnement moteur) tendant à augmenter la vitesse ou un couple résistant (fonctionnement générateur) tend à la réduire.

Pour le fonctionnement avec double alimentation, le stator est alimenté par une première source de tension triphasée équilibrée de fréquence f , le rotor est lui relié à une seconde source alternative de fréquence f_r . Les courants circulant dans les enroulements statoriques créent un champ tournant à la vitesse synchronisme $\Omega_s = \omega_s/p$; de manière analogue les courants rotoriques produisent un champ rotorique tournant à une vitesse $\Omega_r = \omega_r/p$ par rapport au rotor.

Dans le cas où le champ tournant du rotor tourne dans le même sens de rotation que celui du stator, le glissement est positif et le rotor tournera moins vite que le champ tournant statorique ($\Omega < \Omega_s$) : la machine fonctionne en régime ou mode hypo synchrone. Dans le cas contraire, le champ tournant créé par les enroulements du rotor tourne dans le sens contraire du sens de rotation du champ tournant statorique, le glissement devient négatif et le rotor tourne plus vite que le champ tournant créé par le stator ($\Omega > \Omega_s$) : la machine fonctionne en mode dit hyper synchrone.

Dans la machine à cage asynchrone, un signe positif de glissement correspond au fonctionnement moteur de la machine, tandis qu’un signe négatif indique le fonctionnement du générateur, ce qui peut conduire à la confusion dans la compréhension du principe de fonctionnement de la MADA. Alors que pour la machine asynchrone à double alimentation, le signe de glissement indique un fonctionnement hypo- ou hyper synchrone, et non le mode de fonctionnement de la machine (moteur ou générateur) [BEN11].

Pour le fonctionnement du générateur, la MADA nécessite un couple sur son arbre dans la même direction de rotation que le champ de stator rotatif, ce qui fait que les pôles du rotor se déplacent vers l’avant par rapport aux pôles du stator. Le couple électromagnétique développé par la machine est exercé dans la direction opposée à la direction de rotation de la machine, c’est donc un couple résistant.

La possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme, tant en mode moteur que générateur, est obtenue en contrôlant l’amplitude et la phase des tensions du rotor, qui permettent de contrôler le champ magnétique à l’intérieur de la machine.

La MADA est parfois appelé « machine généralisée » car elle peut gérer toutes les opérations des autres machines (synchrones et asynchrones) en même temps. En fait, sa structure permet de considérer son comportement physique de la même manière qu’une machine "synchrone", à la différence que le rotor n’est plus une roue polaire alimentée par un courant continu ou un aimant permanent, mais se compose d’un « enroulement en trois phases alimenté par courant alternatif ». Cette opération peut éventuellement être résumée par le terme : « machine synchrone avec excitation alternée ». La figure III.9 montre les différents enroulements et les flux présents à l’intérieur des structures d’une machine synchrone et d’une MADA [POI03].

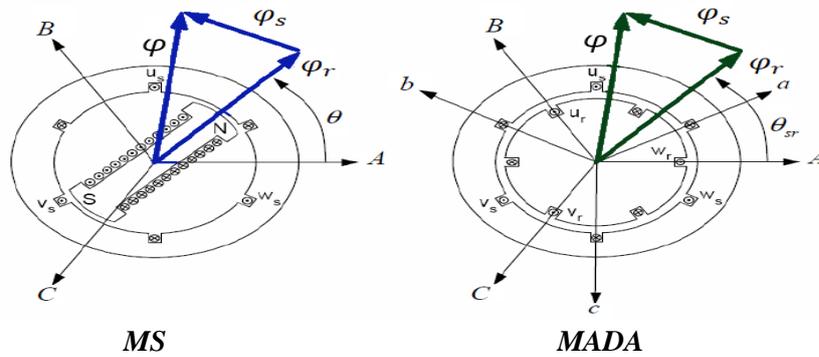


Fig. III. 9. Configuration des enroulements et des flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux φ présent dans l'entrefer de la machine est la résultante du flux créé par les bobinages statoriques φ_s et φ_r du flux rotorique r créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu pour la MS soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés pour la MADA.

L'écart principal entre les deux machines est dû à l'établissement du flux rotorique. En effet, dans une machine synchrone conventionnelle, la phase du flux du rotor dépend directement de la position mécanique de la roue polaire. Son évolution dépend donc de la machine elle-même et de la charge couplée à elle et dépendra donc de la constante de temps mécanique globale du système. En l'absence de pilotage automatique, les performances sont donc limitées et des instabilités de fonctionnement peuvent se produire.

En remplaçant la roue polaire par un circuit triphasé alimenté en alternatif, l'amplitude et la phase du vecteur φ_r sont totalement contrôlables par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux devient indépendante du système mécanique et dépend uniquement de la constante de temps électrique du système.

III.3.5.3. Modes de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA peut fonctionner comme un moteur ou un générateur, mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui dicte le mode de fonctionnement du moteur ou du générateur.

En effet, une machine asynchrone doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être un moteur et au-dessus pour être un générateur. Ici, c'est le contrôle des tensions du rotor qui gère le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypo ou hyper-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

Ainsi, il existe quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe du contrôle de la MADA dans ces modes peut être compris à travers la figure III.10.

On note les puissances mises en jeu par les désignations suivantes :

- P_{res} : la puissance délivrée par le réseau ou fournie par la machine,
- P_s : la puissance transitant le stator,
- P_r : la puissance transitant par le rotor,
- P_{mec} : la puissance mécanique.

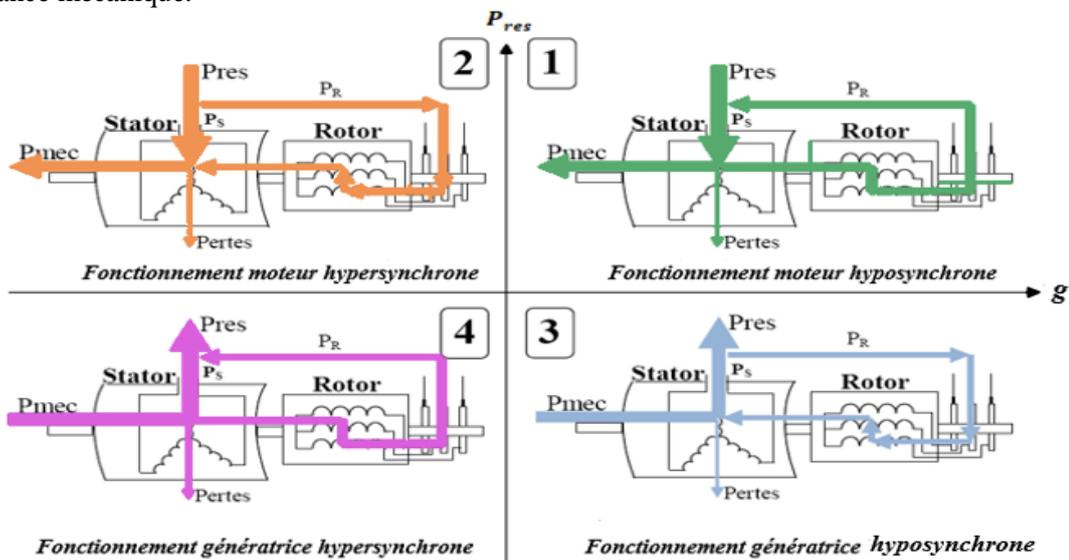


Fig. III. 10. Modes de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [BOY06], [POI03].

➤ **Fonctionnement en moteur hyposynchrone (quadrant 1)**

Ce régime est connu dans la littérature comme une méthode de récupération de l'énergie de glissement. La puissance est fournie à partir du réseau au stator, et la puissance de glissement est retournée du rotor au réseau, c'est le principe de la cascade hyposynchrone. Nous avons donc un fonctionnement moteur inférieur à la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner de cette manière mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes de Joule dans le rotor.

➤ **Fonctionnement en moteur hypersynchrone (quadrant 2)**

En mode hypersynchrone, le système fournit de l'énergie au stator de la MADA et aussi à son rotor. Cela conduit la MADA dans le fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme, le champ rotatif induit par les enroulements du rotor est alors en phase d'opposition à celle du stator. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas fonctionner dans ce régime.

➤ **Fonctionnement en génératrice hyposynchrone (quadrant 3)**

La turbine fournit une puissance mécanique à la machine. Ainsi, la MADA fournit de l'électricité au réseau via le stator. La puissance de glissement absorbée par le rotor est également fournie par le stator, elle est fournie à partir du réseau à travers le convertisseur. Les convertisseurs statiques dans ce cas peuvent fournir jusqu'à 30% de la puissance nominale de la MADA. Nous parlons donc d'un fonctionnement du générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone conventionnelle ne peut pas fournir ce mode de fonctionnement.

➤ **Fonctionnement en génératrice hypersynchrone (quadrant 4)**

La machine est toujours entraînée par la turbine et toute la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau avec un minimum de pertes. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_s$ est transmise par le rotor. Il en résulte un fonctionnement du générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine à cage conventionnelle peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée dans les pertes de Joule dans le rotor.

Pour une utilisation dans un système de vent, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ au-dessous ou au-dessus de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de fournir une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour transmettre uniquement la puissance de glissement, c'est-à-dire un maximum de 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins cher, nécessite un système de refroidissement plus léger et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [POI03].

Le tableau III.2 résume les différents modes et régimes de fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants. Le signe moins (-) attribué à une telle puissance signifie que celle-ci est fournie par la MADA, tandis que le signe plus (+) est attribué dans le cas où la puissance est fournie de l'extérieur à la MADA.

Tableau. III. 2. Modes opérationnels de la MADA.

		Modes	
		Moteur $P_m < 0$	Génératrice $P_m > 0$
Régime	Hyposynchrone	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
	Hypersynchrone	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$

III.3.6. Domaines d'application de la MADA

La première application de la MADA est le fonctionnement en moteur sur un large éventail de variation de vitesse. Dans les machines synchrones et asynchrone à cage d'écureuil conventionnelles, la vitesse de rotation dépend directement de la fréquence des courants de bobinage statorique. La solution conventionnelle pour le fonctionnement à vitesse variable est de varier la fréquence de l'alimentation de la machine. Cela se fait généralement au moyen d'un redresseur, puis d'un onduleur contrôlé. Ces deux convertisseurs sont ensuite dimensionnés pour transmettre la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en variant la vitesse en agissant sur la fréquence d'alimentation des enroulements du rotor [POI03]. Ce dispositif est donc économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il ne consomme pas de puissance réactive et peut même être un fournisseur. Toutes ces fonctionnalités ont permis à la MADA d'être utilisée dans plusieurs applications industrielles telles que :

- ✓ La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines ;
- ✓ La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- ✓ Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge, ...etc.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement du générateur, où l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de livrer une fréquence fixe au stator même lorsque la vitesse varie. Cette opération présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones conventionnelles dans de nombreux systèmes décentralisés de production d'énergie tels que :

- ✓ Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- ✓ Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- ✓ Les éoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- ✓ Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Une troisième application intéressante de la MADA est de l'utiliser comme un moteur à vitesse variable à haute performance avec deux convertisseurs : l'un au rotor et l'autre au stator [VID04].

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante. Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages:

- ✓ La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée ;
- ✓ Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor ;
- ✓ Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine ;
- ✓ Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

III.3.7. Avantages et inconvénients de la MADA

Dans ce paragraphe, nous introduisons brièvement les principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lorsqu'elle est utilisée dans la plage de vitesse variable [DRI05], [HOP01], [SAL07], [VID04] :

❖ *Avantages*

Parmi ses nombreux avantages, on peut citer :

- La possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse ;
- L'accessibilité au stator et au rotor offre la possibilité d'avoir une grande flexibilité et précision dans le contrôle du flux et du couple électromagnétique, et donc de contrôler le transfert de puissance active et réactive ;
- La possibilité d'utiliser la MADA comme filtre actif pour les harmoniques courant grâce au contrôle indirect de la puissance active et réactive par les courants rotoriques ;
- Le convertisseur coté rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la MADA, ce qui divise pratiquement leur prix par 3 par rapport à des convertisseurs dimensionnés pour la puissance nominale, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs sont faibles dans ce cas, le rendement du système de conversion est ainsi amélioré ;
- Dans le fonctionnement du générateur, l'alimentation à fréquence variable du circuit rotorique permet de livrer une fréquence fixe au stator même lorsque la vitesse varie. Cette opération présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones et asynchrones conventionnelles dans de nombreux systèmes décentralisés de production d'électricité [POI03].
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [SAL07] ;
- Une opération en mode dégradé, si l'un des deux onduleurs échoue, plus flexible que la machine à simple alimentation [SAL07], par exemple dans une application ferroviaire, nous pouvons revenir au mode de fonctionnement de la machine asynchrone (avec rotor court-circuité) si une panne se produit sur l'un des bras de l'onduleur ;
- La MADA a une masse de puissance légèrement plus élevée que les autres machines à haute puissance, elle est envisagée pour les hautes puissances (> 1MW) où elle s'avère être un concurrent de la machine à cage asynchrone ;
- La MADA est une "machine généralisée", en effet c'est une machine qui peut "assurer" toutes les opérations d'autres machines. Par extension, cette généralisation nous permet d'envisager le pilotage de cette machine d'une manière plus globale en la consacrant à la gestion de l'optimisation des échanges d'énergie au sein du système dans lequel la MADA est intégré;
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et des rapports de démagnétisation très élevés (de l'ordre de 1 à 6) peuvent être pratiqués [SAL07].

III.3.7.2. Inconvénients

Par rapport à d'autres machines, la MADA présente des inconvénients principalement liés au système bagues-balais tels que :

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente grâce à la présence du système bagues-balais ;
- Le coût supplémentaire de l'entretien dû à l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse et du système bagues-balais de MADA, par rapport à d'autres machines telles que : la machine synchrone à aimant permanent et la machine à réluctance variable;
- L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs (redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire [VID04].

III.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

III.4.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone a déjà été largement discutée dans la littérature [CANU] [CHA90] [HUG05] [IDJ08] [SEY03]. Cependant, malgré sa simplicité de construction, son modèle mathématique est complexe, car les phénomènes impliqués sont de nature électrique, magnétique et mécanique, avec une structure multi-variable non linéaire. Dans le cadre de référence fixe en trois phases lié au stator, le modèle de la machine asynchrone avec laquelle nous nous retrouvons alors l'inconvénient de conduire à des équations différentielles avec des coefficients variables en fonction de la position du rotor, et donc du temps.

Les hypothèses simplificatrices suivantes sont les plus couramment considérées dans la littérature scientifique :

- La machine présente une parfaite symétrie, tant au stator et qu'au rotor ;
- Le circuit magnétique est considéré non-saturé ;
- La distribution spatiale des forces magnétomotrices dans l'entrefer est sinusoïdale ;
- Les pertes fer dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligées ;
- L'effet d'encoche est également négligé ;
- L'influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte ;
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

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

La représentation schématique d'une machine triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure III.11 [YAM10] [PIN04].

Les trois enroulements (bobinages) du stator sont représentés schématiquement sur leurs axes magnétiques respectifs $S_a S_b$ et S_c qui sont décalés de 120° , ainsi que les trois enroulements du rotor sur leurs axes magnétiques respectifs $R_a R_b$ et R_c .

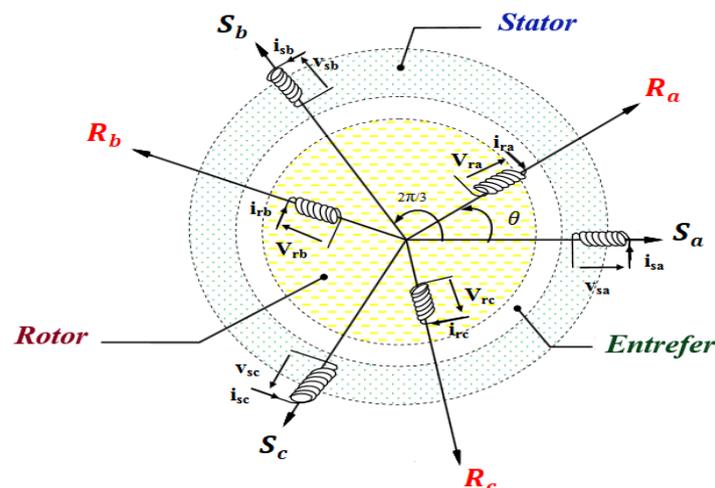


Fig. III. 11. Représentation spatiale des enroulements de la MADA.

Où :

$(V_{sa} V_{sb} V_{sc})$ et $(V_{ra} V_{rb} V_{rc})$ - Les tensions instantanées aux bornes des phases statoriques et rotoriques.

$(I_{sa} I_{sb} I_{sc})$ et $(I_{ra} I_{rb} I_{rc})$ - Les courants instantanés circulant dans les phases.

θ - L'angle électrique entre le repère statorique S_a et le repère rotorique R_a .

III.4.2. La mise en équation de la MADA

III.4.2.1. Représentation de la MADA dans le système triphasé (a, b, c)

⌘ Equations électriques

Chaque enroulement peut être représenté par un circuit électrique équivalent suivant le schéma de la figure III.12. Au stator, le circuit électrique se compose simplement d'une inductance en série avec une résistance [SMA13].

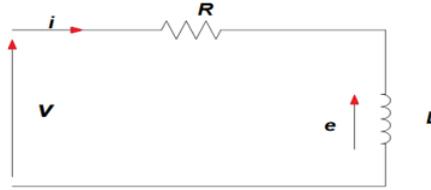


Fig. III. 12. Modèle électrique d'une phase.

La relation entre le flux et la force électromotrice développée au niveau de l'inductance est donnée par la loi de Faraday :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (III.7)$$

$$V = Ri + e \quad (III.8)$$

De la même manière en appliquant la loi des mailles aux trois enroulements du stator, on obtient:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \varphi_{sa} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \varphi_{sb} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \varphi_{sc} \end{cases} \quad (III.9)$$

En matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (III.11)$$

Et pour le rotor, nous avons le même système

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \varphi_{ra} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \varphi_{rb} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \varphi_{rc} \end{cases} \quad (III.12)$$

En matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (III.14)$$

Où:

$(\varphi_{sa} \varphi_{sb} \varphi_{sc})$ et $(\varphi_{ra} \varphi_{rb} \varphi_{rc})$ - Les flux statoriques et rotoriques.

R_s, R_r : Représentent, respectivement, la résistance d'une phase statorique et rotorique.

⌘ L'équations magnétiques

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme [CHA89]:

$$\begin{cases} \varphi_{sa} = L_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{aa} I_{ra} + M_{ab} I_{rb} + M_{ac} I_{rc} \\ \varphi_{sb} = L_s I_{sb} + M_s I_{sa} + M_s I_{sc} + M_{ba} I_{ra} + M_{bb} I_{rb} + M_{bc} I_{rc} \\ \varphi_{sc} = L_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_{ca} I_{ra} + M_{cb} I_{rb} + M_{cc} I_{rc} \end{cases} \quad (III.15)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ra} = L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{aa} I_{sa} + M_{ab} I_{sb} + M_{ac} I_{sc} \\ \varphi_{rb} = L_r I_{rb} + M_r I_{ra} + M_r I_{rc} + M_{ba} I_{sa} + M_{bb} I_{sb} + M_{bc} I_{sc} \\ \varphi_{rc} = L_r I_{rc} + M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_{ca} I_{sa} + M_{cb} I_{sb} + M_{cc} I_{sc} \end{cases} \quad (III.16)$$

Où :

$$M_{aa} = M_{sr} \cos(\theta)$$

$$M_{ab} = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3)$$

$$M_{ac} = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3)$$

Comme état général, on constate que :

$$M = M_{sr} \cos[\theta + (r - s) 2\pi/3]$$

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

M_{sr} : Le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

Les équations de flux sous forme matricielles sont les suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

En posant :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad M_{sr} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Les équations des flux statoriques s'écrivent sous une forme condensée :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{III.18})$$

En suivant les mêmes étapes, les flux rotoriques s'expriment sous la forme condensée :

$$[\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{III.19})$$

Avec :

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques ;

$[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotoriques ;

En substituant les équations des flux (III-18) et (III-19) dans les équations des tensions (III-11) et (III-14), on obtient :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \} \quad (\text{III.20})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \} \quad (\text{III.21})$$

III.4.2.2. Utilisation de la transformée de PARK à la MADA

La machine asynchrone est une machine très couplée, sa représentation dans le système en trois phases est donc particulièrement complexe. Afin de mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire d'utiliser un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle en deux phases (d, q) donné par la transformation du Park est ensuite utilisé.

La transformation du Park est ancienne (1929) et résulte de la diagonalisation des matrices d'inductance du stator et du rotor [CHA89]. Cette transformation représente la projection des trois phases des enroulements (a,b,c) de la machine asynchrone sur les deux axes avec deux enroulements orthogonaux en deux phases (d,q,o). Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations de courant, de flux et de tension par la matrice du Park qui s'exprime comme [SMA13] [CHA89] :

$$[\mathbf{P}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Et

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

Le facteur 2/3 a été choisi pour obtenir des relations simples lorsqu'il exprime des magnitudes dans des valeurs réduites. Les valeurs de l'index 0 n'existent qu'en présence de composants homopolaires, c'est-à-dire dans le cas d'un fonctionnement de machine asymétrique. Les quantités d et q peuvent être considérées comme les projections sur les deux axes de quadrature de ceux des axes a, b, c [SMA13].

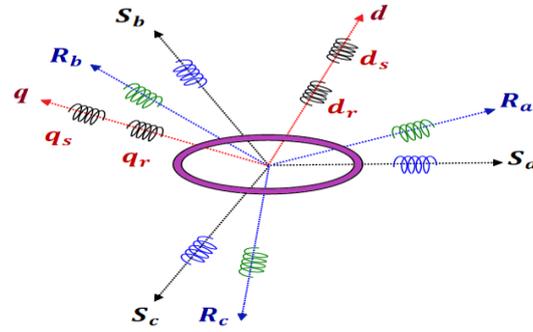


Fig. III. 13. Représentation de la MADA dans le système biphasé et triphasé.

A partir de cette figure, on peut distinguer :

- L'axe direct (indice d) ;
- L'axe en quadrature (indice q).

Dans le cas de la figure III.13, on ne peut pas distinguer la composante homopolaire (o) car nous considérons que le système est équilibré, dont l'axe peut être choisi orthogonal au plan (od, oq).

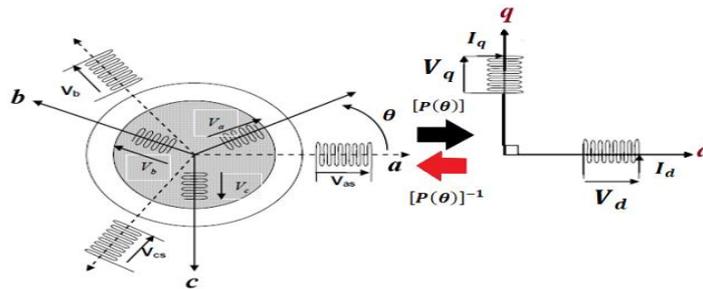


Fig. III. 14. Passage du triphasé au biphasé et l'inverse.

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

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}_y = [P(\theta_y)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}_y \quad (III.24)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}_y \quad (III.25)$$

Où :

$y = s$ ou r (s : stator, r : rotor);

x : peut-être tension, courant ou flux.

III.4.2.3. Modèle de MADA dans le référentiel (d, q)

Pour mieux représenter le comportement d'un générateur à induction doublement alimenté, il est nécessaire d'utiliser un modèle spécifique et simple. Les modèles biphasés (d, q) donnés par la transformation de Park sont utilisés [LAM16].

Le générateur choisi pour le système d'énergie éolienne est la MADA. En outre, la MADA contrôlé par des onduleurs via son rotor fonctionne sur une plage de variation de 30% autour de la vitesse de synchronisme. Ce choix permet aux convertisseurs dimensionnés de transiter 30% de la puissance nominale. Ce sera donc économique [POI09]. Le modèle MADA est exprimé dans le cadre de référence (d, q) par les équations suivantes [BEK13] [REK14] [BOY06].

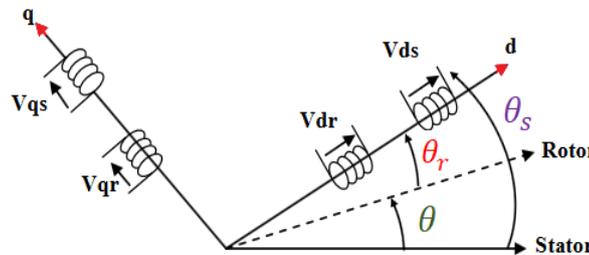


Fig. III. 15. Repère (d, q) de la machine MADA.

Nous remarquons sur la figure III.15 que θ_s et θ_r sont liés naturellement à θ par la relation rigide :

On a :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta = \theta_s - \theta_r$$

Alors :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$\Rightarrow \omega = \omega_s - \omega_r$$

Avec :

ω_s, ω_r et ω représentent respectivement : les vitesses de pulsation statorique, rotorique et de glissement de la MADA.

Donc suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la MADA, nous trouvons trois choix utiles de l'orientation du repère de Park qui dépendent des objectifs de l'application voulue:

- **Référentiel lié au rotor ($\theta = \theta_r$)** : ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.
- **Référentiel lié au stator ($\theta = 0$)** : c'est le repère naturel ou stationnaire ($\alpha-\beta$) de la MADA. Ce choix permet de simplifier la transformation de Park en celle de Clarke dans le cas de non conservation de puissance ou celle de Concordia dans le cas contraire. Le changement de repère triphasé/biphasé (a-b-c) / ($\alpha-\beta$) peut être réalisé par la transformation de Clarke (tableau III.3). Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.

Tableau. III. 3. La transformation de Concordia et de Clarke.

Transformation directe de Concordia	Transformation directe de Clarke
Passage du système triphasé (a, b, c) vers le système biphasé (α, β)	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C_{32}} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{c-à-d} \quad \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{32} [x_{abc}]^T$	
Avec : $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	Avec : $C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

- a) **Référentiel lié au champ tournant statorique ($\theta = \theta_s$)** : ce choix permet d'avoir une pulsation de glissement et s'adapte parfaitement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique que nous présenterons ultérieurement. Les axes sont désignés par (d-q).

Les équations de la machine asynchrone dans le repère (d, q) lié au champ tournant prennent la forme suivante:

⚡ Equations électriques

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{(III.26)}$$

Avec respectivement :

V_{sd}, V_{sq}, V_{rd} et V_{rq} sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.
 ω_r et ω_s sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

⚡ L'équation magnétique

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad \text{(III.27)}$$

Avec:

$\varphi_{sq}, \varphi_{sd}, \varphi_{rq}$ et φ_{rd} : sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé

$L_s = l_s - M_s$: L'inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M$: L'inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

L'avantage d'utiliser ce cadre de référence est d'avoir des quantités constantes à l'état stable. Il est alors plus facile de réguler ces quantités.

⚡ Equations de la puissance et du couple

Selon Park, la puissance électrique statorique instantanée s'écrit :

$$P_{abc} = (V_s)^T \cdot (I_s) = V_{sa} \cdot I_{sa} + V_{sb} \cdot I_{sb} + V_{sc} \cdot I_{sc} = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq}) \quad \text{(III.28)}$$

Dans un cadre de référence lié au champ rotatif, les équations de tension stator sont données par (III.26). La relation précédente devient [CHA89]:

$$P_{abc} = \frac{3}{2} \left[R_s I_{sd}^2 + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} I_{sd} + R_s I_{sq}^2 + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} I_{sq} \right] \quad (\text{III.29})$$

$$P_{abc} = \frac{3}{2} R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + \frac{3}{2} \left(\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} \right) + \frac{3}{2} \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III.30})$$

$$P_{abc} = P_j + P_r + P_{el} \quad (\text{III.31})$$

$$\rightarrow \begin{cases} P_j = \frac{3}{2} R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) \\ P_r = \frac{3}{2} \left(\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} \right) \\ P_{el} = \frac{3}{2} \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

P_j : Représente la puissance perdue par effet joule au stator.

P_r : Représente la puissance électromagnétique stockée dans le champ.

P_{el} : Représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

Donc la puissance électrique peut se mettre sous la forme :

$$P_{el} = C_{em} \cdot \Omega_s = \frac{3}{2} \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III.33})$$

On distingue l'expression du couple

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\Omega_s} (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) = \frac{3}{2} p (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{III.34})$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantané en utilisant les expressions des flux statoriques (III.27) [DJE09]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \left((L_s I_{sd} + M I_{rd}) I_{sq} - (L_s I_{sq} + M I_{rd}) I_{sd} \right) = \frac{3}{2} p \cdot M (I_{rd} I_{sq} - I_{rd} I_{sd}) \quad (\text{III.35})$$

Ou bien encore en faisant appel aux flux rotoriques :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \quad (\text{III.36})$$

Avec :

p : Est le nombre de paires de pôles de la MADA.

⚡ Equation mécanique

$$C_{em} = C_r + f_g \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.37})$$

Avec respectivement :

C_{em} : Le couple électromagnétique ;

C_r : Le couple résistant ;

f_g : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA.

J : L'inertie des parties tournantes ;

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA.

⚡ Les puissances actives et réactives

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

$$\begin{cases} P_r = V_{rq} I_{rq} + V_{rd} I_{rd} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

III.4.2.4. Référentiel lié au stator (α, β)

Il est la référence la plus appropriée pour travailler avec des tailles instantanées, il a des tensions et des courants réels et peuvent être utilisés pour étudier les régimes de démarrage et de freinage machines à courants alternatifs [QUA95].

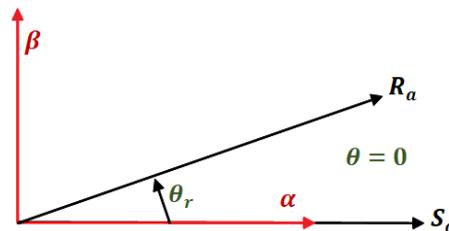


Fig.III. 16. Définition des axes réels de la MADA par rapport au référentiel (α, β).

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s I_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_s I_{s\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = R_r I_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} - \omega_r \varphi_{s\beta} \\ V_{r\beta} = R_r I_{r\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} - \omega_r \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

III.4.2.5. Représentation d'état dans le référentiel de Park

Le formalisme d'état qui utilise le calcul matriciel comme outil de calcul se prête bien à la description des systèmes linéaires ou non linéaire, mono ou multivariable, tel que la machine asynchrone qui est un exemple typique d'un système multivariable non linéaire [CAR95].

$$\frac{dx}{dt} = AX + BU \quad (III.41)$$

Avec :

X : vecteur d'état (les quatre courants et la vitesse).

U : vecteur d'entrée (les quatre tensions et le couple de charge).

Ce nouveau vecteur d'état nous amène à la représentation suivante, [Sal07]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 I_{sd} (a\omega + \omega_s) I_{sq} + a_3 I_{rd} + a_5 \omega I_{rq} \\ -(a\omega + \omega_s) I_{sd} - a_1 I_{sq} - a_5 \omega I_{rd} + a_3 I_{rq} \\ a_4 I_{sd} - a_6 \omega I_{sq} - a_5 \omega I_{rd} + \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}\right) I_{rq} \\ -a_6 \omega I_{sd} - a_4 I_{sq} - \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma}\right) I_{rd} - a_5 \omega I_{rq} \\ m_1 (I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq}) - m_2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & -b_3 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & -b_3 & 0 \\ -b_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \\ C_r \end{bmatrix} \quad (III.42)$$

En définissant les coefficients suivant :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1-\sigma}{\sigma} & a_1 &= \frac{R_s}{\sigma L_s} & a_2 &= \frac{R_r}{\sigma L_r} & a_3 &= \frac{R_r M}{\sigma L_r L_s} & a_4 &= \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} \\ a_5 &= \frac{M}{\sigma L_s} & a_6 &= \frac{M}{\sigma L_r} & b_1 &= \frac{1}{\sigma L_s} & b_2 &= \frac{1}{\sigma L_r} & b_3 &= \frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ m_1 &= \frac{p^2 M}{J} & m_2 &= \frac{f}{J} & m_3 &= \frac{p}{J} & \sigma &= 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \end{aligned}$$

σ : Coefficient de dispersion ;

p : nombre de pair de pôles ;

f : coefficient de frottement visqueux ;

J : inertie du moteur chargé.

Le produit des variables d'états σ dans le système d'équations montre la nature non linéaire du modèle régissant la dynamique de la machine asynchrone à rotor bobiné.

III.5. Modélisation des convertisseurs statiques

III.5.1. Structure du convertisseur côté machine

La figure III.17 montre la structure du convertisseur du côté de la machine asynchrone à double alimentation, le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié à un onduleur de tension, ce dernier est fourni par une source de courant continu.

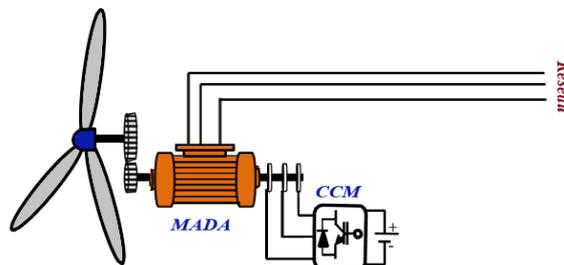


Fig. III. 17. Structure de la MADA avec un convertisseur côté machine CCM.

III.5.2. Modélisation du convertisseur côté rotor « CCM »

Aujourd'hui, l'onduleur de tension est un composant essentiel dans les systèmes suivants à l'interface avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'elle permet, entre autres, de contrôler la puissance active et réactive échangée avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

Pour obtenir une tension alternative, la tension continue d'entrée doit être désactivée et appliquée à la charge dans les deux sens. L'onduleur fourni par une source de tension parfaite impose à sa sortie, en ouvrant et en fermant les interrupteurs, une tension alternée formée par une succession de fentes rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est définie par le contrôle des commutateurs.

Le système en trois phases obtenu à la sortie du convertisseur est un système équilibré à tension qui ne contient que des harmoniques impaires différentes de trois, des harmoniques de rang trois et des multiples de trois étant éliminés. [LOC]

La figure III.18 représente le schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé.

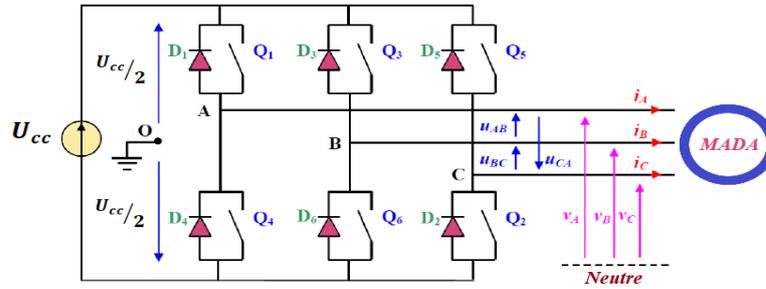


Fig. III. 18. Schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé.

Afin d'éviter de court-circuiter la source de tension continue d'arrêt, les commandes d'interrupteur sur le même bras sont complémentaires.

Un convertisseur idéal est considéré, d'où les hypothèses suivantes:

- ❖ La commutation des composants est instantanée,
- ❖ Les chutes de tension à leurs bornes sont négligeables,
- ❖ Les temps morts négligés,
- ❖ La charge est triphasée équilibrée et couplée en étoile avec point neutre isolé.

Les tensions composées sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} u_{AB} = v_{AO} - v_{BO} \\ u_{BC} = v_{BO} - v_{CO} \\ u_{CA} = v_{CO} - v_{AO} \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

Au niveau de la charge, les relations donnant les tensions simples sont :

$$\begin{cases} u_{AB} = v_A - v_B \\ u_{BC} = v_B - v_C \\ u_{CA} = v_C - v_A \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

En effectuant les différences membre à membre, on obtient :

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 2 \cdot v_A - (v_B + v_C) \\ u_{BC} - u_{AB} = 2 \cdot v_B - (v_A + v_C) \\ u_{CA} - u_{BC} = 2 \cdot v_C - (v_A + v_B) \end{cases} \quad (\text{III.45})$$

Sachant que les tensions v_A, v_B, v_C forment un système triphasé équilibré, on peut écrire :

$$\begin{cases} u_{AB} - u_{CA} = 3 \cdot v_A \\ u_{BC} - u_{AB} = 3 \cdot v_B \\ u_{CA} - u_{BC} = 3 \cdot v_C \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

D'où les nouvelles expressions des tensions simples :

$$\begin{cases} v_A = \frac{1}{3} \cdot (u_{AB} - u_{CA}) \\ v_B = \frac{1}{3} \cdot (u_{BC} - u_{AB}) \\ v_C = \frac{1}{3} \cdot (u_{CA} - u_{BC}) \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

On obtient enfin sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{III.48})$$

Chaque bras de l'onduleur se compose de deux commutateurs soi-disant parfaits fonctionnant de manière complémentaire, il est donc possible d'associer à chacun d'eux une valeur de contrôle binaire S_i , avec ($i = A, B, C$) et de tels que :

- $S_i = +1$, si l'interrupteur du haut est fermé et l'interrupteur du bas ouvert ;
- $S_i = -1$, si l'interrupteur du haut est ouvert et l'interrupteur du bas fermé.

Ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} v_{AO} \\ v_{BO} \\ v_{CO} \end{bmatrix} = \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.49})$$

Enfin le convertisseur est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \frac{U_{cc}}{2} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{III.50})$$

Les tensions uniques fournies par l'onduleur seront obtenues directement à partir des états des variables de contrôle S_A , S_B et S_C , qui représentent les signaux de commande des commutateurs. Les états de ces variables sont également déterminés par la stratégie de contrôle.

Comme la configuration de puissance reste la même pour le fonctionnement de l'onduleur et du redresseur, le modèle mathématique obtenu reste valable pour les deux modes de fonctionnement.

III.5.3. Choix de structure des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs les plus couramment utilisés pour fabriquer des interrupteurs sont les transistors de puissance (MOSFET, IGBT, Bipolaires) et les thyristors rapides (principalement GTO).

Les progrès technologiques dans le domaine des transistors à haute puissance permettent désormais de produire des onduleurs à haute tension et à très haute tension.

L'expérience a montré que l'utilisation de transistors pour la commutation de haute puissance est assez facile. Cependant, pour un thyristor, un circuit auxiliaire peut avoir des conséquences néfastes, surtout s'il a lui-même un thyristor dans le circuit de contrôle :

- Faible vitesse de commutation ;
- Pertes calorifiques élevées ;
- Bruits acoustiques générés sur l'inductance de commutation ;
- Encombrement.

Le transistor évite bien ces inconvénients, en plus de sa capacité à fonctionner à des fréquences de commutation élevées. Toutefois, pour les puissances faibles et moyennes, il est préférable de considérer la technologie du transistor plutôt que la technologie du thyristor malgré toutes les contraintes qui peuvent survenir (fréquence de commutation, circuit d'aide à la commutation, résistance à la tension, etc.), avec quelques précautions; dans ce cas, le contrôle des pertes de puissance dans les transistors à la fois dans la conduction et la commutation et s'assurer qu'ils sont refroidis correctement.

Alors que pour les puissances supérieures, le thyristor GTO semble être mieux adapté, si l'on considère certaines analogies avec le transistor, qui favorise, par rapport au thyristor classique, l'élimination des circuits de turn-off forcés [DJE09].

III.6. Simulation de la machine asynchrone double alimentation

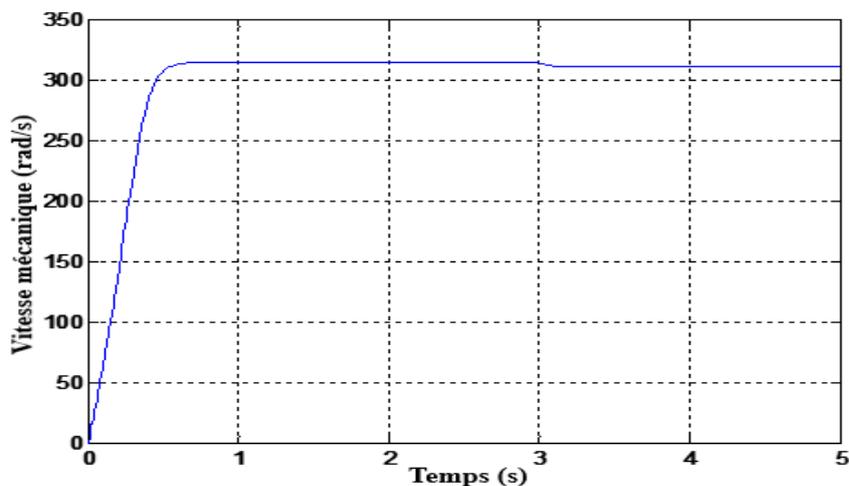
À l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour le fonctionnement moteur a été effectuée. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation du Park (Plan (d, q) liées aux champs rotatifs. Les résultats indiqués dans les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine à puissance 4KW.

III.6.1. Résultats de simulation de la MADA

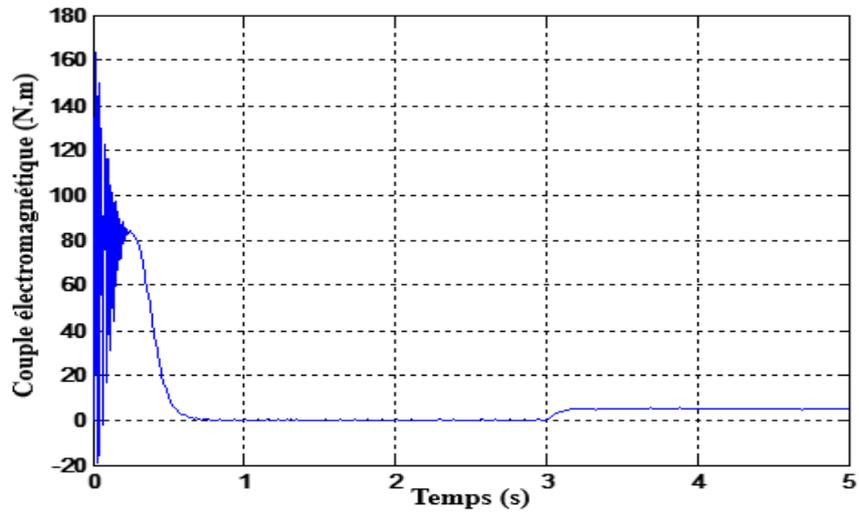
La tension d'attaque de la MADA à $t=0$ coté stator c'est la tension de réseau électrique à fréquence et tension constantes ($V=220v$; $f=50Hz$).

✓ La simulation de la vitesse mécanique et du couple électromagnétique

La figure (III.19) représente respectivement la simulation de la vitesse mécanique et du couple électromagnétique



(a)

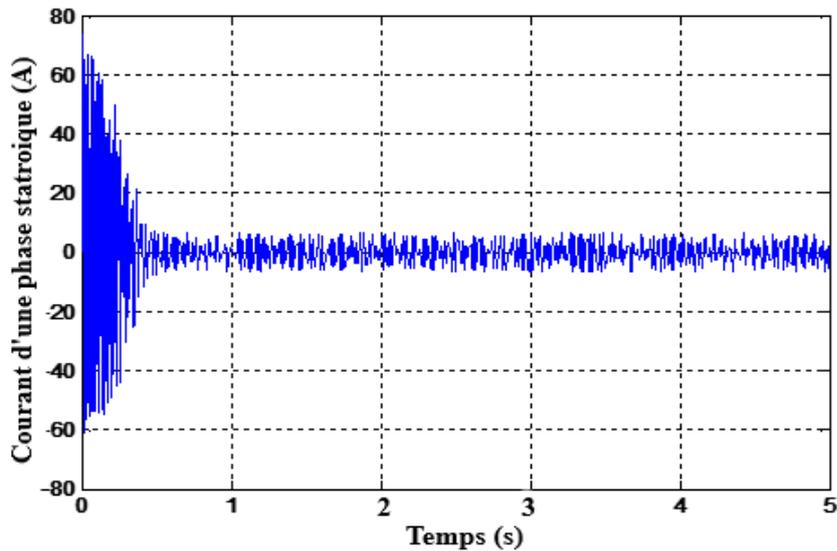


(b)

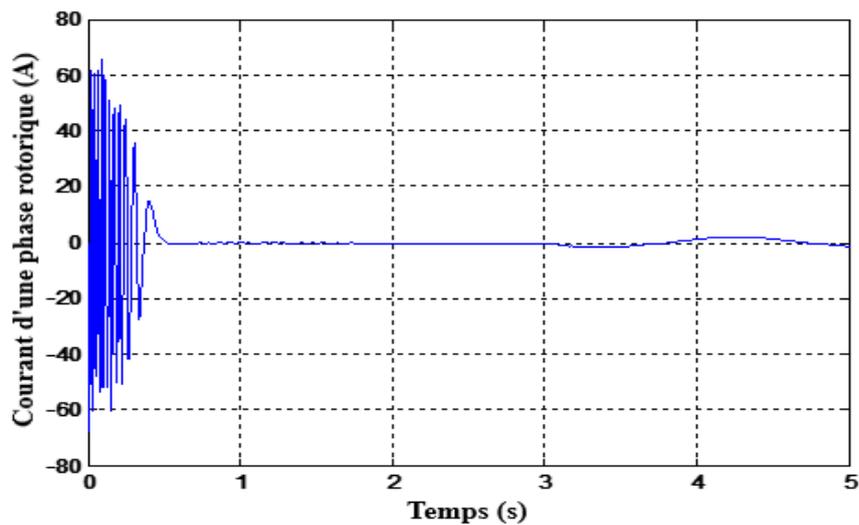
Fig. III. 19.(a) La vitesse mécanique et (b)le couple électromagnétique.

✓ *La simulation des courants statoriques et rotoriques d'une phase*

La figure (III.20) représente respectivement la simulation des courants statoriques et rotoriques d'une phase (I_{sa} et I_{ra}).



(a) Le courant I_{sa}

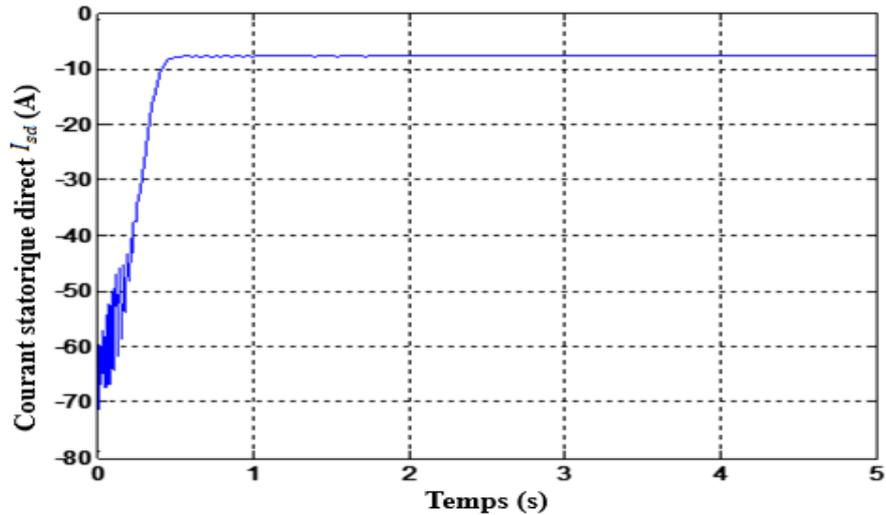


(b) Le courant I_{ra}

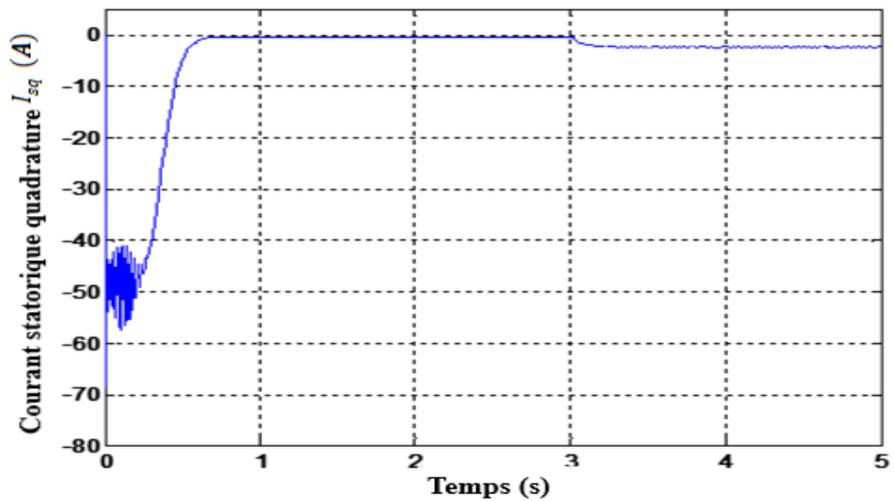
Fig. III. 20. Les courants statoriques et rotoriques d'une phase (I_{sa} et I_{ra}).

✓ *La simulation des courants statoriques suivant le repère (d,q)*

La figure (III.21) représente respectivement la simulation des courants statoriques selon le repère (d,q) (I_{sd} et I_{sq}).



(a) Le courant I_{sd}

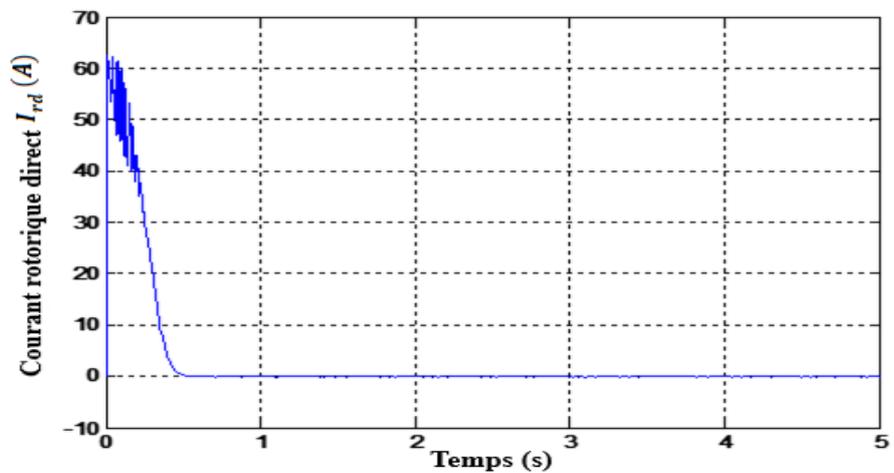


(b) Le courant I_{sq}

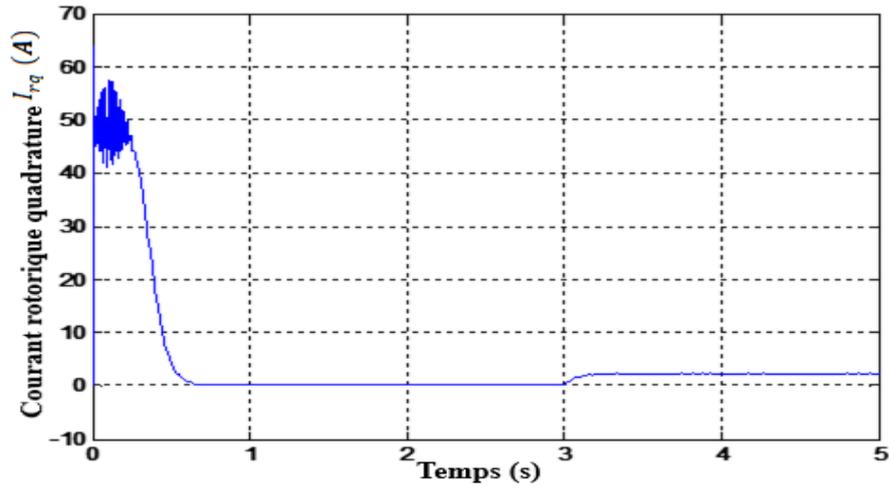
Fig. III. 21. Les composantes des courants statoriques (I_{sd} et I_{sq}) selon le repère (d,q).

✓ *La simulation des courants rotorique suivant le repère (d,q)*

La figure (III.22) représente respectivement la simulation des courants rotoriques selon le repère (d,q) (I_{rd} et I_{rq}).



(a) Le courant I_{rd}

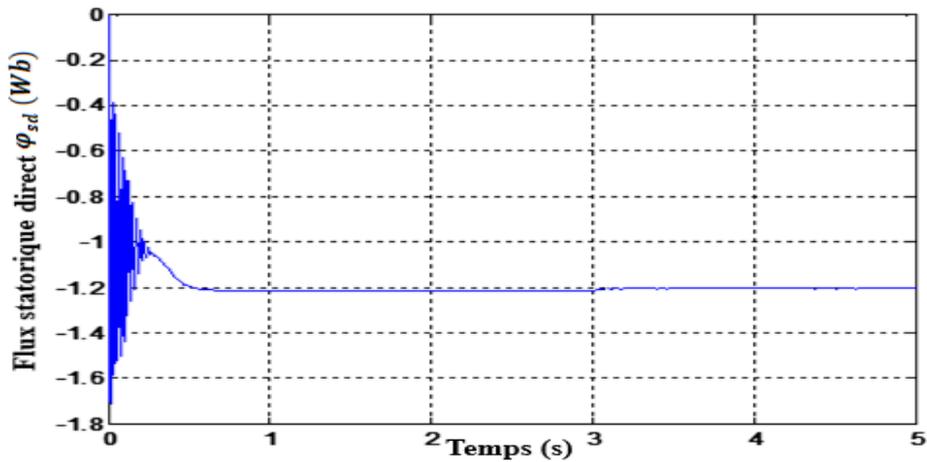


(b) Le courant I_{rq}

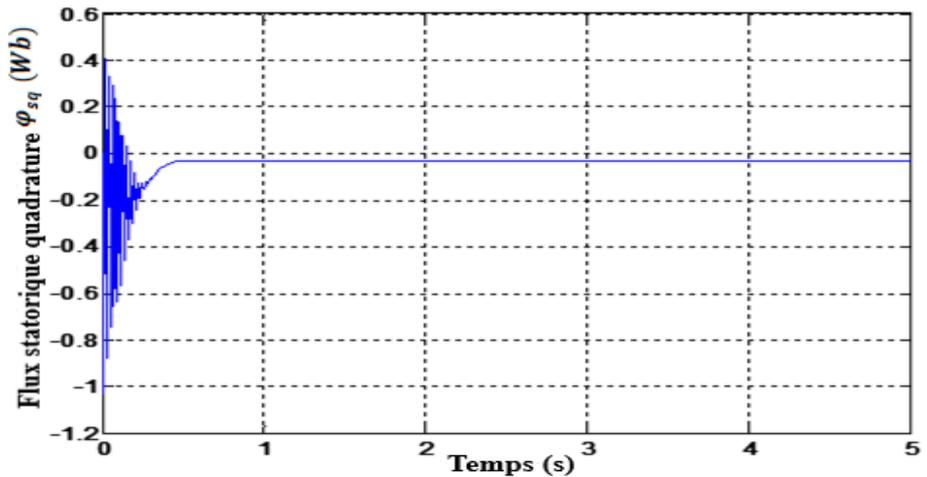
Fig. III. 22. Les composantes des courants rotoriques (I_{rd} et I_{rq}) suivant le repère (d,q) .

✓ **La simulation des flux statoriques suivant le repère (d,q)**

La figure (III.23) représente respectivement la simulation des flux statoriques selon le repère (d,q) (φ_{sd} et φ_{sq}).



(a) Le flux φ_{sd}

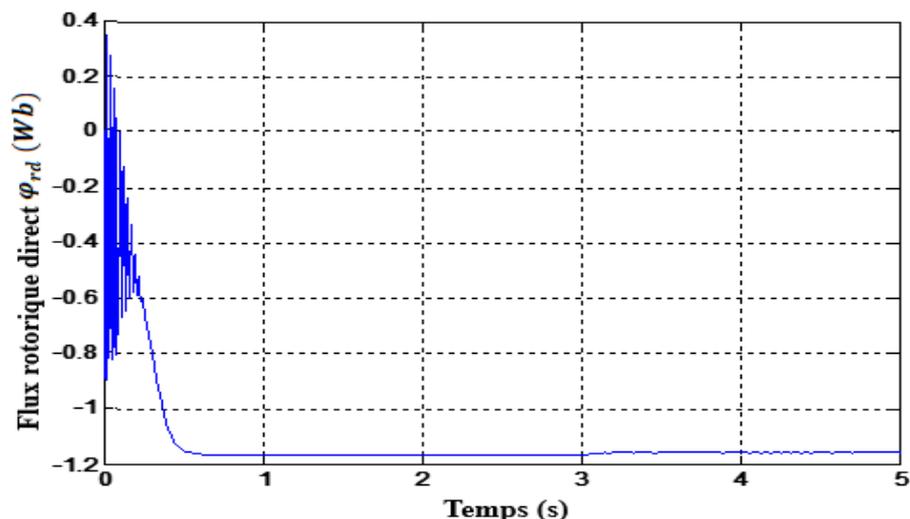


(b) Le flux φ_{sq}

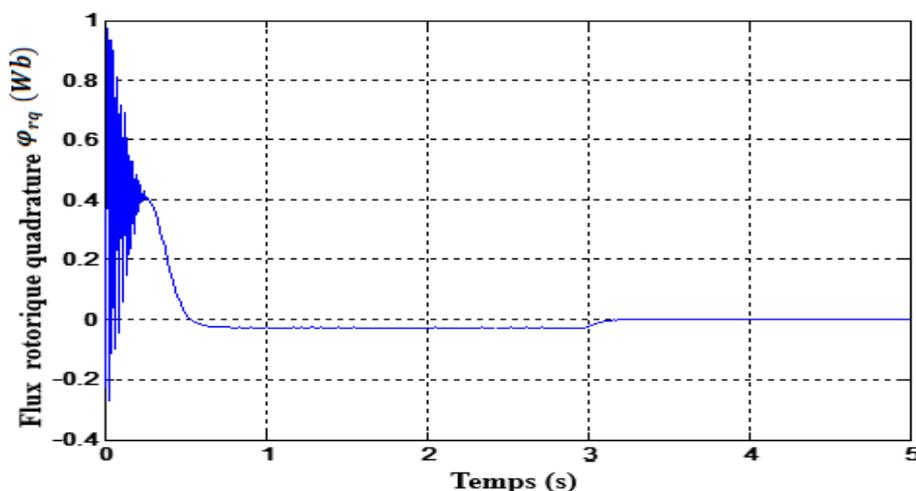
Fig. III. 23. Les composantes des flux statoriques (φ_{sd} et φ_{sq}) selon le repère (d,q) .

✓ **La simulation des flux rotoriques suivant le repère (d,q)**

La figure (III.24) représente respectivement la simulation des flux rotoriques selon le repère (d,q) (φ_{rd} et φ_{rq}).



(a) Le flux φ_{rd}



(b) Le flux φ_{rq}

Fig. III. 24. Les composantes des flux rotoriques (φ_{rd} et φ_{rq}) selon le repère(d,q) .

- ✓ Les figures (III.19) (III.20) (III.21) (III.22) (III.23) (III.24) représentent le fonctionnement de la MADA à vide. (Fonctionnement en simple alimentation MAS).
- ✓ D'après la première analyse on peut voir que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant que l'état stable soit établi, caractérisé par une vitesse proche du synchronisme (Figure (III.19) (III.20)) et une fréquence de courant rotorique proche de zéro (Figure (III.22)) (glissement très faible). En outre, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche de zéro (figure (III.19) (III.20)) (présence de friction visqueuse).
- ✓ L'application du couple résistif entraîne une augmentation du couple électromagnétique, une augmentation de l'amplitude des courants statoriques (III.21) et une diminution de la vitesse due à un glissement plus important qui se reflète dans les courants du rotor.

✓ **La simulation de la MADA pour différentes alimentations**

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation pour des différentes alimentations.

a) Pour l'alimentation $V_r = 0 V$:

Les résultats de simulation de la MADA présentée sur les figures (III.25), (III.26), (III.27), (III.28) concernant respectivement la vitesse mécanique, le courant statorique et rotorique et le couple électromagnétique pour une alimentation de ($V_r = 0 V ; f_r = 50 \text{ HZ} ; C_r = 9 \text{ N.m}$) .

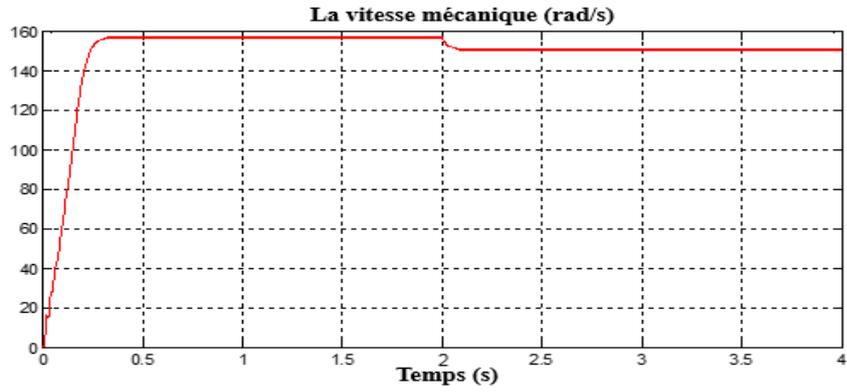


Fig. III. 25. La vitesse mécanique.

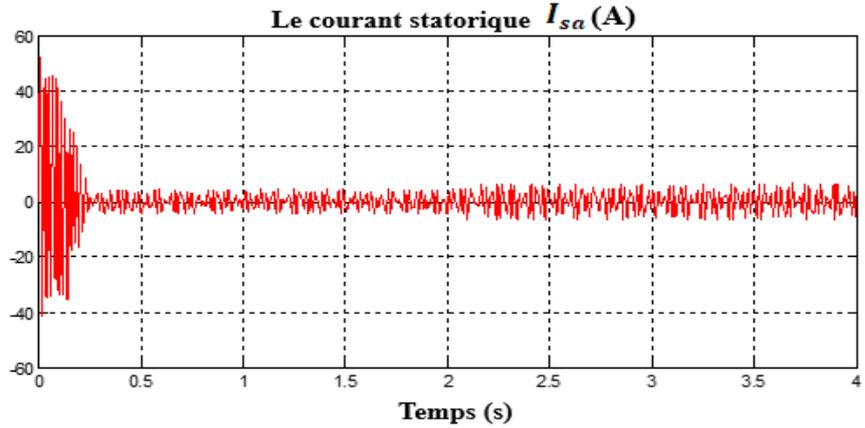


Fig.III. 26. Le courant statorique I_{sa} .

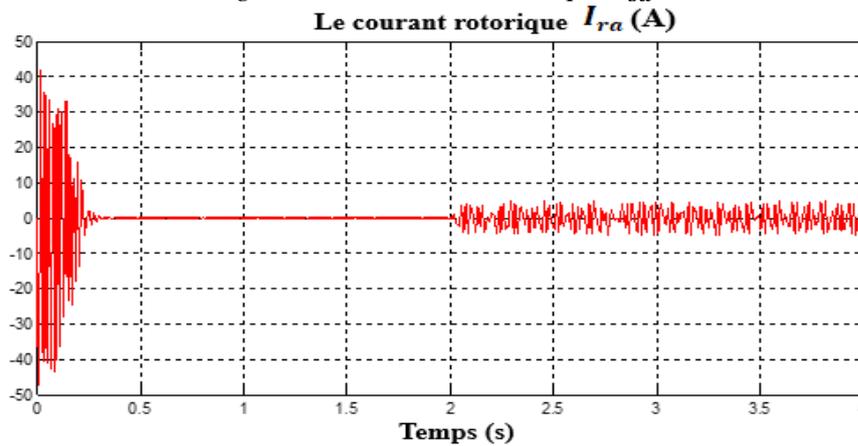


Fig. III. 27. Le courant rotorique I_{ra} .

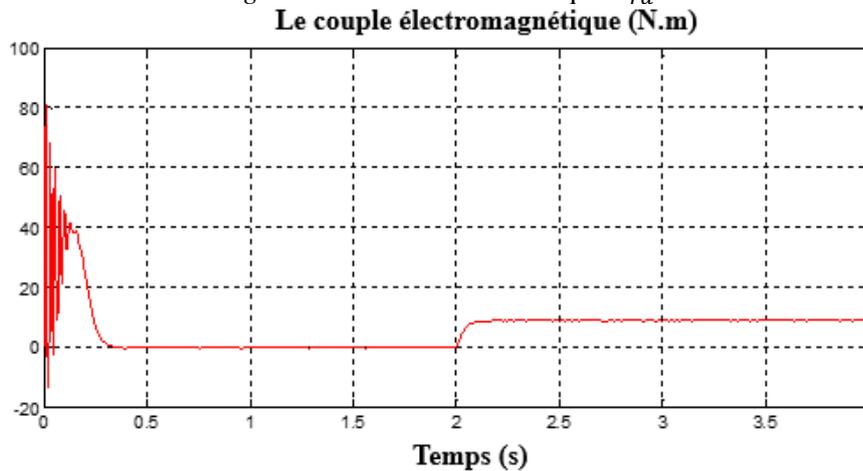


Fig. III. 28. Le couple électromagnétique (N.m).

- ✓ Les figures (III.25), (III.26), (III.27), (III.28) représentent le fonctionnement de la MADA en charge. (Fonctionnement en simple alimentation MAS).

b) Pour l'alimentation $V_r = 12 V$:

Les résultats de simulation de la MADA présentée sur les figures (III.29), (III.30), (III.31), (III.32) pour une alimentation de ($V_r = 12 V ; f_r = 5HZ ; C_r = 9N.m$) .

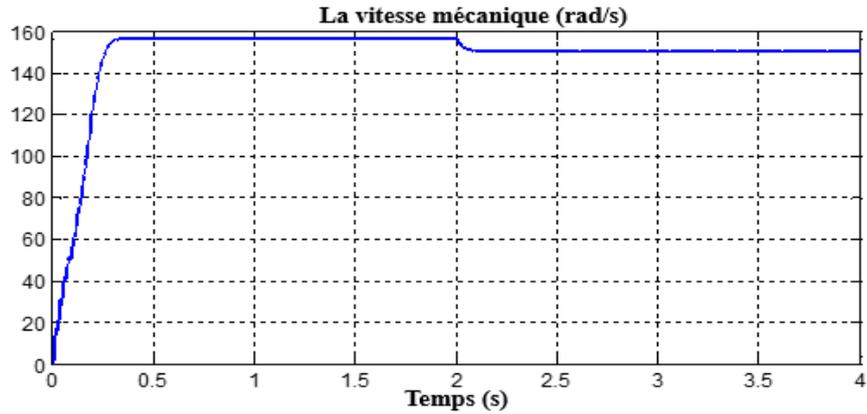


Fig. III. 29. La vitesse mécanique.

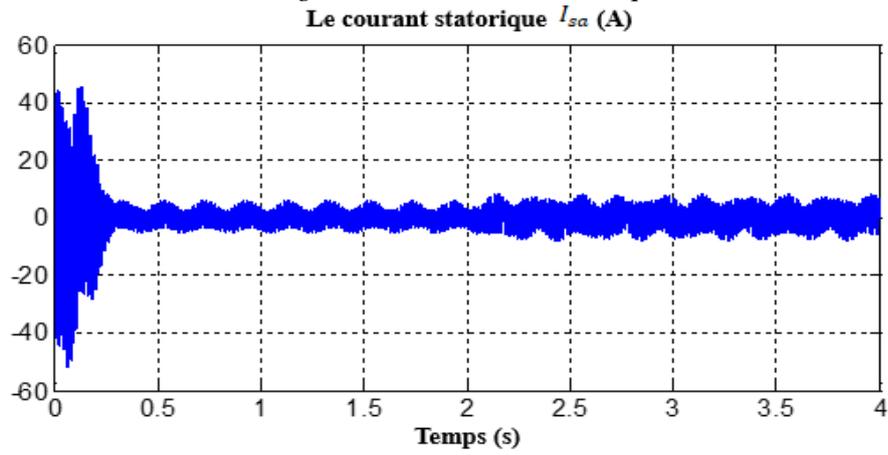


Fig. III. 30. Le courant statorique I_{sa} .

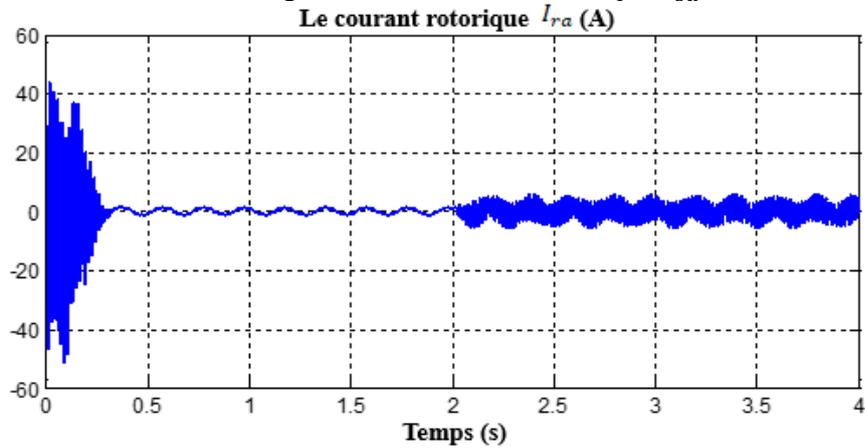


Fig. III. 31. Le courant rotorique I_{ra} .

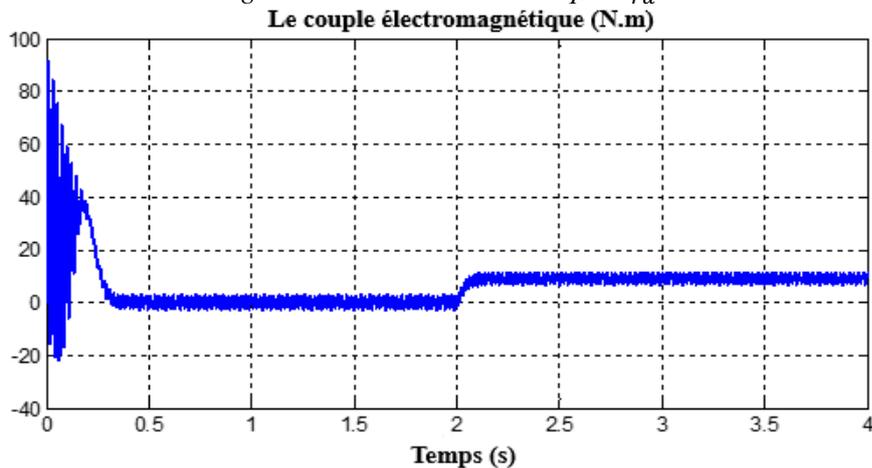


Fig. III. 32. Le couple électromagnétique.

c) Pour l'alimentation $V_r = 30 V$:

La simulation de la MADA présentée sur les figures (III.33), (III.34), (III.35), (III.36) pour une alimentation de ($V_r = 30 V$; $f_r = 50 HZ$; $C_r = 18 N.m$).

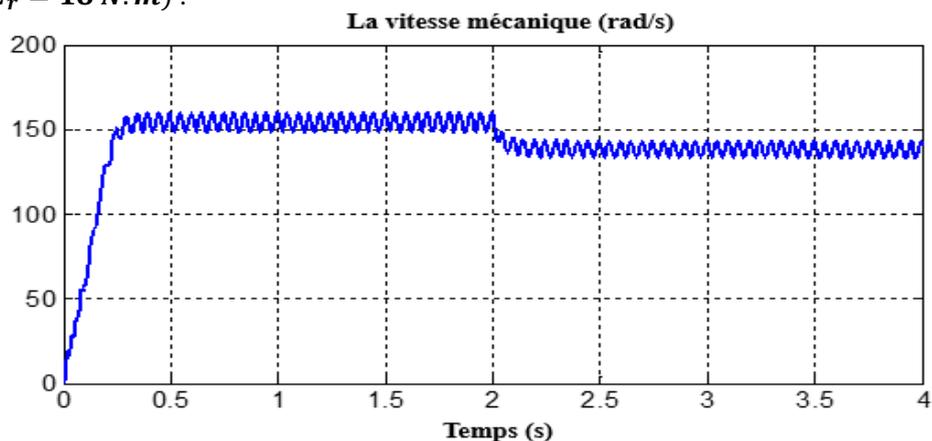


Fig. III. 33. La vitesse mécanique.

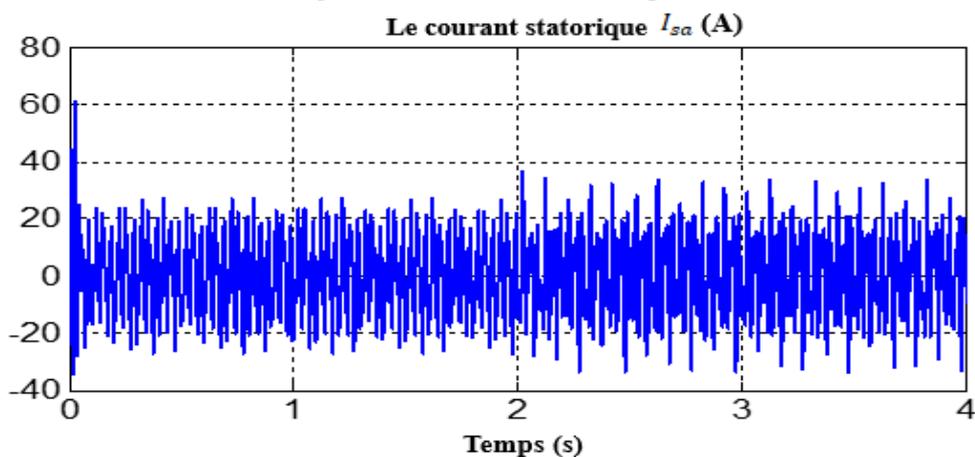


Fig. III. 34. Le courant statorique I_{sa} .

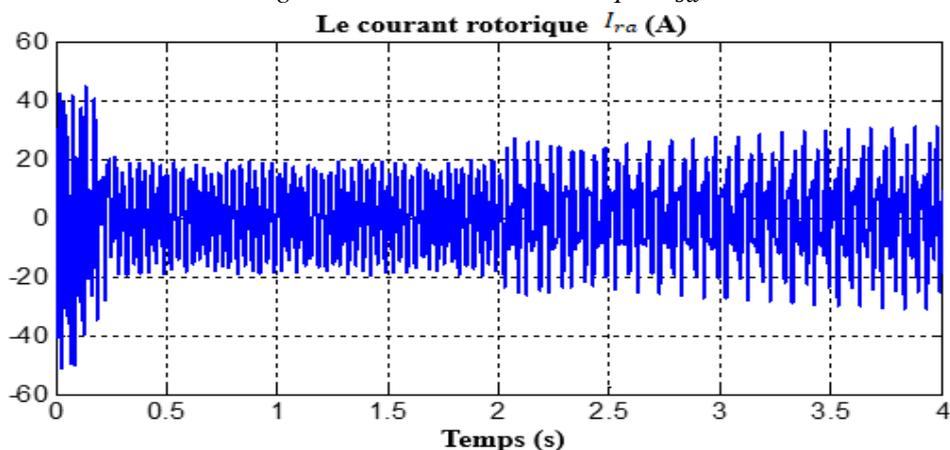


Fig. III. 35. Le courant rotorique I_{ra} .

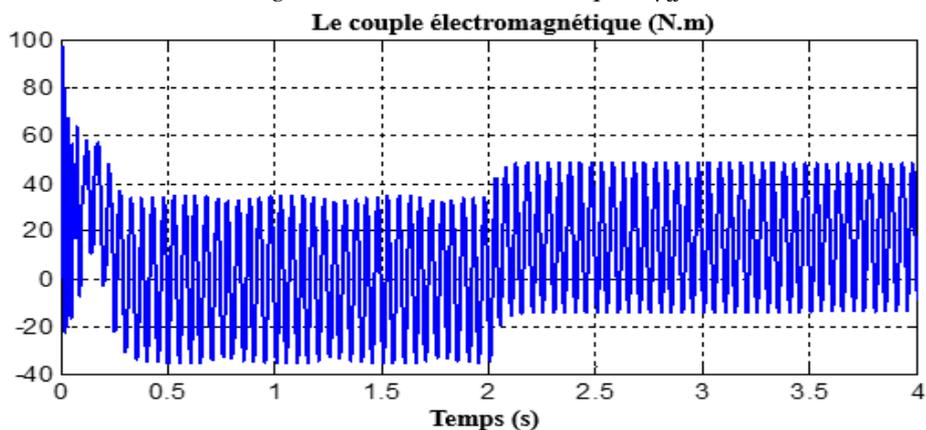


Fig. III. 36. Le couple électromagnétique.

D'après les résultats de simulation obtenus, on observe que toute variation au niveau de la fréquence rotorique ou tension rotorique a une influence directe sur la vitesse et le couple.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, une brève étude de la machine asynchrone à double alimentation, de sa structure, de son principe de fonctionnement, de ses avantages et de ses champs d'application ont été présentés.

On a aussi étudié le modèle de la MADA qui a été établi en passant du système réel triphasé du modèle vers un système biphasé de Park pour le rendre linéaire et plus adaptée au contrôle. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone doublement alimentée ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple et de la vitesse pour différentes valeurs de fréquence et de tension rotorique.

III.9. Références bibliographiques

- [AGU10] D. AGUGLIA, « Conception Globale des générateurs asynchrones à double alimentation pour éoliennes »; Thèse Doctorale en Génie Electrique, Université Laval, Québec, Canada, Décembre 2010.
- [BEK13] H. Bekka, S. Taraft, D. Rekioua, and S. Bacha, "Power control of a wind generator connected to the grid in front of strong winds," *Journal of Electrical Systems*, vol. 3, no. 9, pp. 267– 278, 2013.
- [BEN11] H. Bennani. Machine asynchrone à double alimentation : Les lois de commande en régime permanent. Thèse présenté pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Laval, Québec, 2011.
- [BOY06] A. Boyette, P. Poure, and S. Saadate, "Direct and indirect control of a doubly fed induction generator wind turbine including a storage unit," in 32th edition of *Industrial Electronics Conference IECON'2006*, IEEE, Paris, France, November 6-10 2006, pp. 2517–2522.
- [BOY06] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [CAM03] H. Camblong, « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable »; Thèse de Doctorat, ENSAM, Bordeaux, France, Décembre 2003.
- [CANU] C. Canudas de Wit. Commande des moteurs asynchrone, Modélisation contrôle vectoriel et DTC. vol.1, Lavoisier, Paris, 2000.
- [CAR95] J.P. Caron J.P. Hautier. Electrotechnique Modélisation et commande de la machine asynchrone. Presses Universitaires de Strasbourg, 1995.
- [CHA89] J. Chatelain, *Machines électriques*vol. 10: PPUR Presses polytechniques, 1989.
- [CHA90] J. Chatelain. *Machines Electriques*. 1990.
- [DEN10] A. Dendouga, « Contrôle des puissances actives et réactive de la machine asynchrone à double alimentation (DFIM) »; Thèse De Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, Février 2010.
- [DJE09] Y. Djeriri, "Commande Vectorielle d'une MADA Intégrée à un Système Eolien'," *Mémoire de magister*, 2009.
- [DJE10] Y. Djeriri, A. Meroufel, « Field Oriented Control for Doubly Fed Induction Generator using an Artificial Neural Networks dedicated for Wind Energy Conversion Systems »; *International Conference on Power Electronics and Electrical Drives, ICPEED'2010*, Oran, 26-27 October 2010.
- [DJE14A] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum and Z. Boudjema, « A comparative study between field oriented control strategy and direct power control strategy for DFIG »; *Journal of Electrical Engineering, JEE*, Romania, ISSN 1582-4594, Vol.14, No.2, pp.169-168, June 2014.
- [DRI05] S. DRID, « Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie & Expérimentation » ; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, LSP-IE, Université de Batna, Algérie, Novembre 2005.
- [ELA04] S. El Aïmani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension »; Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.
- [GAI07] A. Gaillard, S. Karimi, P. Poure, S. Saadate, « Fault Tolerant Back-to-Back Converter Topology for Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator »; *International Review of Electrical Engineering*, pp.629-636, August 2007.
- [GHE07] T. Ghennam, E.M. Berkouk, B. Francois, « Three level inverter controlled by means of hysteresis current control. Application to back to back structure »; *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2007)*, Vigo, Spain, 04-07 June 2007.
- [GHE11] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [HOP00] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, R.A. Lakin, « Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine with and without position encoder »; *IEE Proc., Elec. Power Appl.*, Vol.147, No.4, pp.241-250, July 2000.
- [HOP01] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson, « Doubly-fed a.c machines: classification and comparison »; *European conf. Power Electronics and Applications (EPE)*, pp.1-17, Graz, 2001.
- [HUG05] A. Hughes. *Electric Motors and Drives Fundamentals, Types and Applications*. 2005.
- [IDJ08] K. Idjdarene A. Tounzi D. Rekioua, T. Rekioua. Vector control of autonomous induction generator taking saturation effect into account. *Energy Conversion and Management*, 2008.
- [KHA03] F. Khatounian, et al., « Control of a doubly-fed induction generator for aircraft application »; *Records of IEEE IECON 2003*, Roanoke, USA, pp.2709-2714, 2003.
- [KHO06] S. Khojet El Khil, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre.
- [LAM16] M.Lamnadi, M.Trihi, B.Bossoufi and A.Boulezhar. Modeling and Control of a Doubly-Fed Induction Generator for Wind Turbine-Generator Systems, *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Vol. 7, No. 3, pp. 982-995, 2016.
- [LEC01] P. Leconte M. Rapin, E. Szechenyi. *Eoliennes. Techniques de l'Ingénieur*, BM 4640 22p, Janvier 2001.
- [LIN 03] Lindholm M., "Doubly fed drives for variable speed wind turbines", Thèse de doctorat, Université Technique de Denmark, 2003, Denmark.
- [LOC] LOUCIF MOURAD, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur »; Thèse De Doctorat en Génie Electrique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE, Algérie, Mai 2016.
- [MER10] A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum et A. Hammoumi « Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien »; *Revue des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, Algérie*, Vol.13, No.4, pp. 669-682, 2010.

- [MOU14] A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [NAIT] A. Nait-Kaci A. Yousif M.L. Doumbia, K. Agbossou. Active and reactive power control of a doubly fed induction generator for wind applications. In Proceedings of the IEEE EUROCON.
- [PEN96] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, « A Doubly Fed Induction Generator Using Back to Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine »; IEE Proceedings on Electrical Power Applications, Vol.143, No.5, pp.380-387, September 1996.
- [PIN04] M. Pinard, Commande électronique des moteurs électriques: Dunod, 2004.
- [POI03] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Polytechnique de Nantes, France, Décembre 2003.
- [POI09] F. Poitiers, B. Toufik, and A. Machmoum, "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion," Electric Power Systems Research, no. 79, pp. 1085–1096, 2009.
- [QUA95] N. P. Quang et J-A. Dittrich, « Vector Control of Three-Phase AC Machines », Springer, 2008.
- [REK14] D. Rekioua, "Wind power electric systems: Modeling, simulation and control, green energy and technology," Springer, 2014.
- [ROB10] B. Robyns, B. François, Ph. Degobert et J-P. Hautier, « Commande vectoriel de la Machine asynchrone »; Edition Technip, Paris, 2007.
- [SAL07] G. SALLOUM, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Mars 2007.
- [SEY03] D. Seyoum C. Grantham, M.F. Rahman. The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003.
- [SMA13] M. Smaili, "Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération," Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [TAP03] A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, J. R. Saenz, « Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator »; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.18, No.2, pp.194-204, June 2003.
- [VID04] P. E. VIDAL, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2004.
- [YAM10] Z. Yamina, "Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone," Electrotechnique, Universite Ferhat Abbas de Setif, 2010.

CHAPITRE IV :

LES STRATEGIES DE COMMANDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE CONNECTEE AU RESEAU.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes stratégies de commandes d'une chaîne de conversion éolienne couplée à une MADA et connectée au réseau électrique. Ce chapitre est subdivisé en quatre parties : La première partie est consacrée à la représentation de la commande vectorielle de la MADA. En deuxième temps une commande par modulation de largeur d'impulsion est étudiée. La troisième partie est consacré à une bref étude de la logique floue et la comparaison entre les différentes stratégies de commande. La quatrième partie a fait l'objet d'une étude du fonctionnement d'une ferme éolienne basé sur la machine asynchrone fonctionnant à vitesse variable intégrée dans le réseau électrique.

IV.1. Introduction

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit des chercheurs en génie électrique à mener des enquêtes afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce contexte que cette thèse décrit une étude sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA dans un système d'énergie éolienne.

Actuellement, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est déplacé vers des puissances supérieures à 1MW, notamment pour tirer le meilleur parti du parc éolien du site. Ces générateurs utilisent souvent la machine asynchrone à double puissance (MADA) comme générateur étant donné ses avantages.

Dans ce chapitre, nous présenterons la régulation des puissances du MADA associé à un onduleur de tension pour le contrôle de la puissance statorique injectée au réseau électrique. Après avoir donné le modèle mathématique simplifié de la machine dans le troisième chapitre, un contrôle adéquat est nécessaire afin de contrôler correctement les puissances statoriques pour permettre un bon fonctionnement de la MADA.

Dans cette perspective, une comparaison entre les différents types de commandes de la machine asynchrone à double alimentation est donc nécessaire. Ces différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler les puissances active et réactive de cette dernière. Quelques résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'amélioration des performances de la chaîne de conversion éolienne.

IV.2. La commande vectorielle de la MADA

A l'heure actuelle, dans les applications à vitesse variable, la machine asynchrone, en raison de sa construction simple, robustesse et faible coût, remplace progressivement la machine DC et en concurrence avec son homologue synchrone couvrant une large gamme de puissance de quelques watts à quelques mégawatts.

Une association « convertisseur statique-machine asynchrone » nécessite un processus de contrôle efficace et performant. Le contrôle de haute performance d'une machine asynchrone est devenu très complexe, mais sa réalisation n'est plus un problème, puisque les possibilités des techniques numériques modernes ouvrent des perspectives de plus en plus compétitives tout en respectant l'aspect économique de cette réalisation [PIE92]. Malgré le fait que la machine DC a plusieurs inconvénients en termes de construction et d'entretien, elle est toujours utilisée dans certains domaines. Le principal avantage de la machine DC est son fonctionnement simple.

Depuis plusieurs années, plusieurs recherches académiques et industrielles ont été menées et proposées pour remédier au problème de contrôle de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. En effet, la difficulté de contrôler une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrée et de sortie et les variables internes de la machine telles que le flux, le couple et la vitesse; et les techniques de contrôle conventionnelles deviennent insuffisantes, en particulier dans les applications industrielles nécessitant un couple élevé à basse vitesse (traction, positionnement) [CAPO], [CAR00].

Afin de surmonter ces difficultés et d'obtenir une situation équivalente à celle de la machine DC, Blaschke et Hasse ont proposé une technique de contrôle connue sous le nom commande vectorielle en anglais (*field oriented control*) ou la commande par orientation du flux.

Aujourd'hui, grâce à cette technologie de contrôle et au développement des systèmes numériques, plusieurs entraînements à courant continu sont remplacés par des machines à courant alternatif, ce qui permet un contrôle de vitesse plus efficace en termes de vitesse et de précision. L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attrayante pour obtenir de meilleures performances dans les applications de production d'énergie dans une plage de vitesse limitée [PER03] [DRI05] et est actuellement un domaine de recherche.

Dans cette première partie et pour établir la commande vectorielle de la génératrice, nous considérons l'hypothèse de simplification que les enroulements de stator ou de rotor de la machine sont supposés être équilibrés en trois phases, donc tous les composants homopolaires sont nuls. Ensuite, nous calculons le régulateur requis pour le contrôle, et finalement nous terminons avec les résultats de la simulation qui signifie la validation du contrôle.

IV.2.1. But et principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) consiste à rendre le comportement du moteur asynchrone identique à celui de la machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la variable de contrôle du flux (le courant d'excitation) et la variable de contrôle du couple (le courant d'induit). Ce découplage se traduit par une réponse de couple très rapide, une large plage de contrôle de vitesse et une grande efficacité sur une large plage de charge à l'état stable.

Dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ rotatif du stator et celui du rotor varie en fonction de la charge (différente de 90°), ce qui entraîne des interactions complexes et des réponses oscillatoires dynamiques. Afin d'atteindre

une situation équivalente à celle de la machine DC, la technique de contrôle vectoriel est introduite. L'idée proposée par Blaschke [BLA71] et Hasse au début des années 1970 est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composants, l'un produit le flux et l'autre produit le couple. Cela permet d'avoir un angle de 90° entre les deux flux de la machine, et une caractéristique similaire à celle de la machine à courant direct séparément excitée est obtenue.

La figure IV.1 illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA.

Pour une MCC, le courant d'induit i_a est la grandeur génératrice du couple et le courant d'excitation i_f est la grandeur génératrice du flux. Ainsi, dans une machine à courant continu tout se passe comme si les variables de commandes i_a et i_f étaient orthogonales. C'est à dire que le flux commandé par le courant i_f et le couple par le courant i_a . On dit que l'induit et l'inducteur sont découplés.

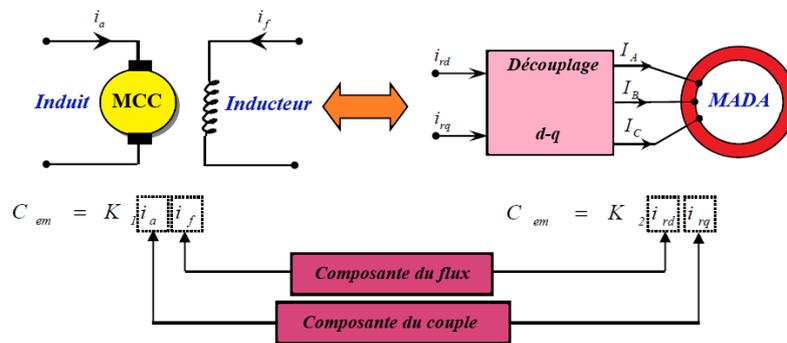


Fig. IV. 1 . Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la MCC.

En effet, le cadre de référence lié au champ rotatif peut être orienté de sorte que l'axe d de ce cadre de référence coïncide avec l'un des flux de la machine (statorique, rotorique ou entrefer) [CAR95]. Ces différentes orientations nous permettent d'obtenir plusieurs façons pour contrôler la machine asynchrone via des convertisseurs.

Il y a deux façons d'effectuer le contrôle de puissance de cette machine [BOY06], [POI03]:

- ❖ La première méthode consiste à négliger les termes du couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode sera appelée la méthode directe parce que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions du rotor de la machine.
- ❖ La deuxième méthode consiste à prendre en compte les termes du couplage et à les compenser en effectuant un système avec deux boucles pour contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode est appelée méthode indirecte.

L'intérêt de la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, d'autre part la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants du rotor qui permettra de protéger la machine en limitant ces courants ou d'ajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner le MADA comme un filtre actif, mais il est complexe à mettre en œuvre.

Selon le choix du système de référence, les conditions d'orientation sont exprimées par :

➤ L'orientation du flux rotorique suivant l'axe d :

$$\varphi_{rq} = 0 \Rightarrow \varphi_r = \varphi_{rd} \tag{IV.1}$$

➤ L'orientation du flux statorique suivant l'axe d :

$$\varphi_{sq} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sd} \tag{IV.2}$$

➤ L'orientation du flux statorique suivant l'axe q :

$$\varphi_{sd} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sq} \tag{IV.3}$$

Les équations des tensions, des flux et du couple électromagnétique de la machine asynchrone peuvent donc être simplifiées en modifiant le cadre de référence. Par exemple, en alignant le flux statorique sur un axe de la référence, son composant sur l'autre axe est annulé.

IV.2.2. Orientation du flux statorique

Dans le cadre de ce travail, nous avons envisagé d'établir une commande vectorielle par orientation du flux statorique sur l'axe d.

Le couple électromagnétique dans n'importe quel état transitoire est exprimé dans le repère (d-q) comme un produit entre les flux de stator et les courants de rotor.

Compte tenu de l'écriture suivante:

$$C_{em} = p \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} (\varphi_{sq} I_{rd} - \varphi_{sd} I_{rq}) \quad (IV.4)$$

Nous notons que si nous éliminons le premier produit ($\varphi_{sq} I_{rd}$), alors cette expression prend la forme du couple d'une machine DC, pour laquelle les deux grandeurs, le couple et le flux, sont naturellement découplés par la construction.

$$\varphi_{sq} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sd}$$

L'expression du couple s'écrit alors :

$$C_{em} = -p \cdot \frac{M_{sr}}{L_r} (\varphi_{sd} I_{rq}) \quad (IV.5)$$

Ainsi, on peut voir que le couple électromagnétique ne dépend plus que du composant quadrature du courant rotorique I_{rq} et du problème du couplage entre les deux axes directs d et l'axe de quadrature q est éliminé [POI03].

Dans la référence en trois phases (ABC), la tension à travers une phase i du stator est exprimée par la relation générale :

$$V_{si} = R_s I_{si} + \frac{d}{dt} \varphi_{si}, i = 1, 2, 3 \quad (IV.6)$$

En négligeant la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui correspond à une hypothèse réaliste par rapport aux pertes dans le cas des machines de puissance moyenne et élevée généralement utilisées dans la conversion d'énergie éolienne, cette relation peut être réécrite comme [POI03]:

$$V_{si} = \frac{d\varphi_{si}}{dt} \quad (IV.7)$$

Cette dernière relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de $\pi/2$ sur ce même vecteur.

En supposant que les tensions du réseau électrique sont stables, le flux statorique sera également constant. Nous pouvons alors écrire sous l'hypothèse d'un flux de statorique constant :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (IV.8)$$

La figure IV.2 illustre le principe de l'orientation du flux statorique.

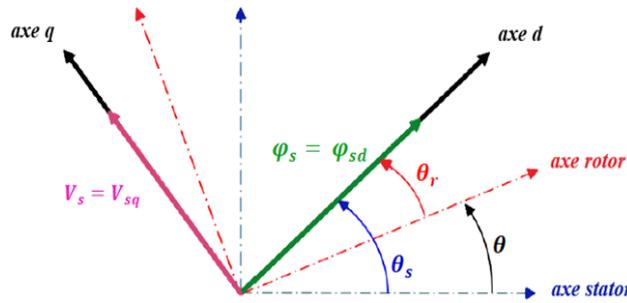


Fig. IV. 2. Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique.

❖ Relation entre le courant statorique et le courant rotorique :

Prenant les équations (III.27) du modèle dynamique MADA précédemment défini, et en tenant compte de la relation (IV.2) le système suivant est obtenu :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (IV.9)$$

À partir des équations des composants directs et quadrature du flux statorique, nous obtenons les relations reliant les courants statoriques à ceux du rotor :

$$I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \quad (IV.10)$$

$$I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \quad (IV.11)$$

❖ Relation entre les puissances statoriques et courants rotoriques

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

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} I_{sd} - V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (IV.12)$$

En remplaçant I_{sd} et I_{sq} par leurs expressions (IV.10) et (IV.11) et sachant que $V_{sd} = 0$, les puissances active et réactive statoriques sont exprimées par les relations

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \rightarrow \varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (IV.13)$$

Compte tenu de la mutuelle constante, le système résultant relie proportionnellement la puissance active au courant du rotor de l'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante.

$\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ Prés imposée par le réseau.

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique fournit le découplage efficace des quantités réelles (couple, vitesse) de la MADA, on considère les tensions rotoriques V_{rd} et V_{rq} comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques I_{rd} et I_{rq} comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne P_{ref} et Q_{ref} .



Fig. IV. 3. Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases}$$

❖ Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (IV.14)$$

A partir du système d'équation (IV.14) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad (IV.15)$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques (III.26) :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_r (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \omega_r \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.16)$$

La pulsation rotorique ω_r est :

$$\omega_r = g \cdot \omega_s$$

Où g est le glissement de la machine asynchrone.

Les termes impliquant des dérivés des courants rotoriques à deux phases disparaissent à l'état stable, de sorte que les relations donnant les tensions du rotor deviennent :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - \omega_r (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \omega_r (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (IV.17)$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations (III.26), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = [R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) p] I_{rd} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = [R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) p] I_{rq} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (IV.18)$$

V_{rd} et V_{rq} : Les composants décalés de phase des tensions du rotor doivent-ils être imposés à la machine pour obtenir les courants de rotor souhaités.

$(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ Est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M}{L_s}$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

À partir des systèmes d'équations (III.6) et (IV.13), nous pouvons élaborer le modèle de contrôle de la puissance tel que présenté par le diagramme de bloc ci-dessous. (Figure IV.4)

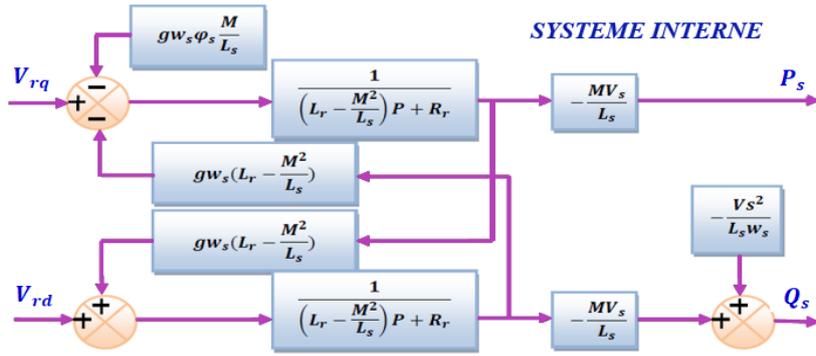


Fig. IV. 4. Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Dans ce diagramme, nous avons montré des fonctions de transfert de premier ordre pour les deux axes reliant les tensions du rotor aux puissances de stator actives et réactives, ce qui nous permet de mettre en œuvre la commande vectorielle, puisque l'influence du couplage est minimale, chaque axe peut être contrôlé indépendamment avec son propre régulateur. Les variables de référence pour ces contrôleurs sont : puissance active pour l'axe q du rotor et puissance réactive pour l'axe d du rotor. Le point de puissance réactive sera maintenu à zéro afin d'assurer un facteur de puissance unitaire du côté stator afin d'optimiser la qualité de l'énergie retournée au réseau. Le point de puissance active devra maintenir le transfert d'énergie optimal de l'éolienne.

IV.2.2.1. Commande directe des puissances active et réactive :

La première méthode consiste à négliger les termes du couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe parce que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions du rotor du générateur [BOY06].

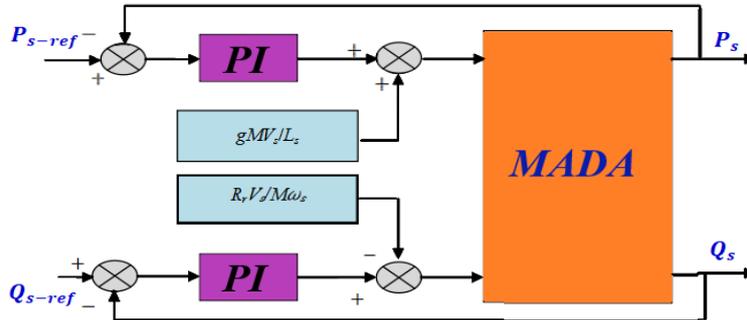


Fig. IV. 5. Schéma bloc de la commande directe.

IV.2.2.2. Commande indirecte des puissances active et réactive :

Cette deuxième méthode consiste à prendre en compte les termes du couplage et à les compenser en effectuant un système avec deux boucles pour contrôler la puissance du rotor et les courants. Cette méthode est appelée méthode indirecte et est directement dérivée des équations (IV.13) et (IV.16).

La méthode indirecte consiste à reproduire, dans l'ordre inverse, le diagramme de bloc du système à régler [SAE01], [BOY06], [POI03]. Le diagramme de bloc du système est ainsi reproduit dans la direction opposée, résultant en un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre direction et qui contient tous les éléments du schéma bloc MADA.

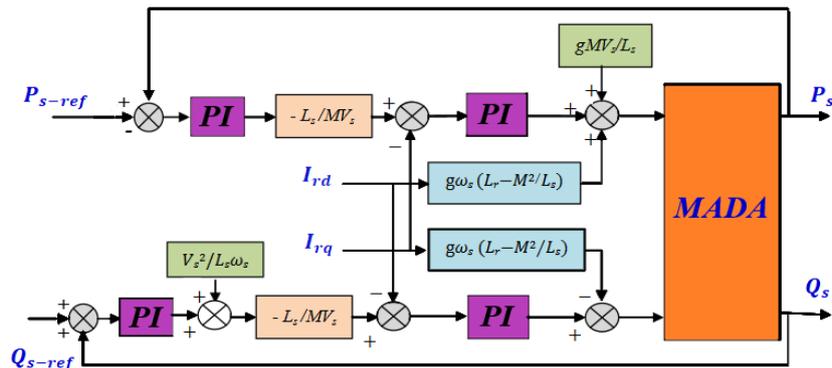


Fig. IV. 6. Schéma bloc de la commande indirecte.

A. Commande en boucle ouverte

Le contrôle en boucle ouverte est essentiellement basé sur l'hypothèse d'un réseau stable de tension et de fréquence. Il consiste à contrôler les courants du rotor plutôt que les puissances, en n'utilisant pas les puissances mesurées comme retour sur comparateur, mais plutôt indirectement les courants rotor de l'axe d et q [BEN12].

À partir des expressions de la puissance statorique active et réactive du système (IV.13), les références des courants rotoriques directs et quadrature sont déduites selon les relations suivantes.

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s-ref} \\ I_{rd-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s-ref} + \frac{V_s}{M.\omega_s} \end{cases} \quad (IV.19)$$

Ces courants seront utilisés comme références au lieu des références de puissance active et réactive, ce qui donnera lieu au diagramme de bloc ci-dessous.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. L'instabilité du réseau provoquera donc une erreur dans la surveillance des points de puissance actives et réactives.

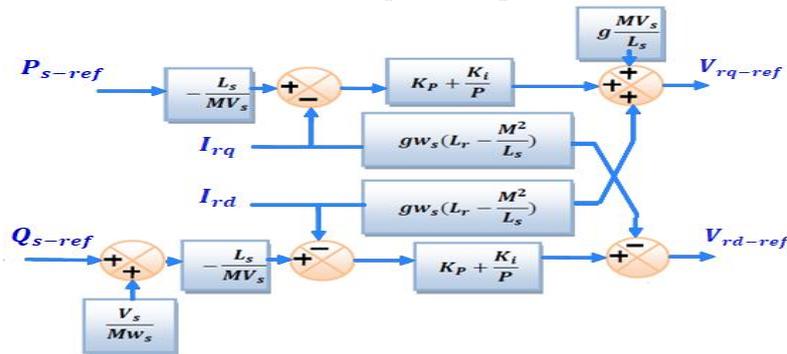


Fig. IV. 7. Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

B. Commande en boucle fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous mettons en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacun, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les conditions de perturbation et de couplage apparaissant sur le diagramme de bloc du modèle MADA. Nous obtenons ainsi la structure de contrôle indiquée dans la figure suivante :

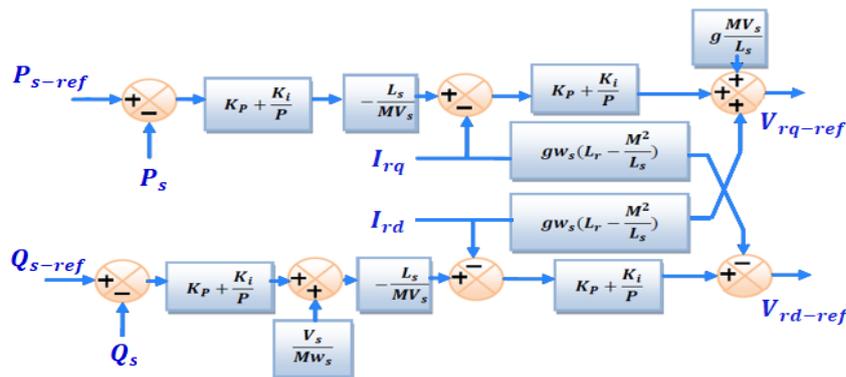


Fig. IV. 8. Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Ce contrôle est donc plus efficace que le contrôle direct, qui a plus de perturbations entre les deux puissances. Le contrôle indirect avec bouclage de puissance exige six capteurs de courant, trois pour surveiller les courants de rotor et trois combinés avec trois capteurs de tension pour mesurer les puissances de stator. Ces puissances seront également utilisées pour le contrôle général de l'éolienne afin de déterminer les références de puissance.

Cette structure se traduit par un système de contrôle plus complexe. Cependant, il offre une meilleure robustesse contre les instabilités possibles sur le réseau électrique.

IV.2.2.3. Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral PI, utilisé pour contrôler MADA dans les générateurs, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en fournissant des performances acceptables [DJE09]. Aussi Nous avons utilisé ce type de régulateur en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul et la simplicité à mettre en œuvre.

La synthèse d'un régulateur proportionnel - intégral est effectuée. Ce type de contrôleur reste le plus couramment utilisé pour le contrôle de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Ce type de régulateur résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions.

- Une action proportionnelle qui est utilisée pour réguler la vitesse de la dynamique du système.
- Une action intégrale qui permet d'éliminer la différence entre la variable de référence et celle à contrôler (erreur statique).

La figure IV.9 montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$ correspondant aux régulateurs utilisés dans la (Figure IV.7) et (Figure IV.8).

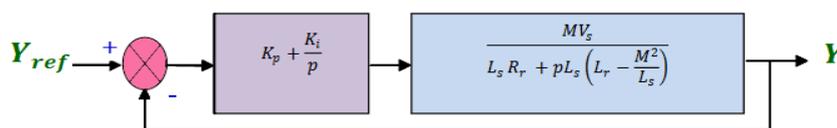


Fig. IV. 9. Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs est écrite comme suit :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (IV.20)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (IV.21)$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (IV.22)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + pT_r} ; T_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}$$

Avec :

K_p, K_i Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur PI,

T_r Est le temps de réponse du système.

IV.2.3. Résultats de simulation de la MADA

✓ Résultats de simulation de la MADA avec la commande vectorielle

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois actives et réactives de contrôle de puissance que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation,

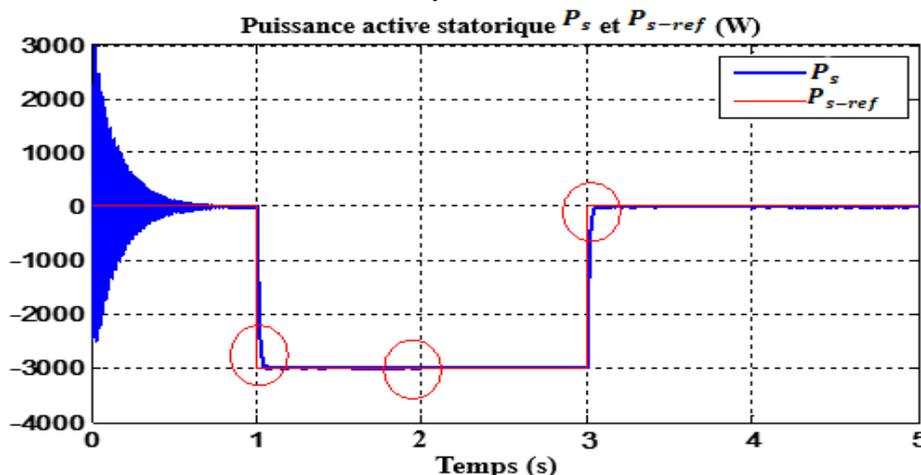


Fig. IV. 10. La puissance active statorique et sa référence.

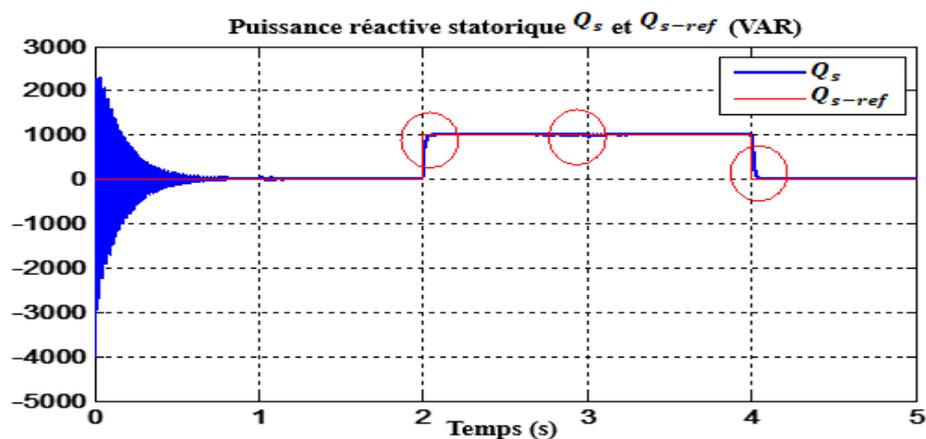


Fig. IV. 11. La puissance réactive statorique et ses références.

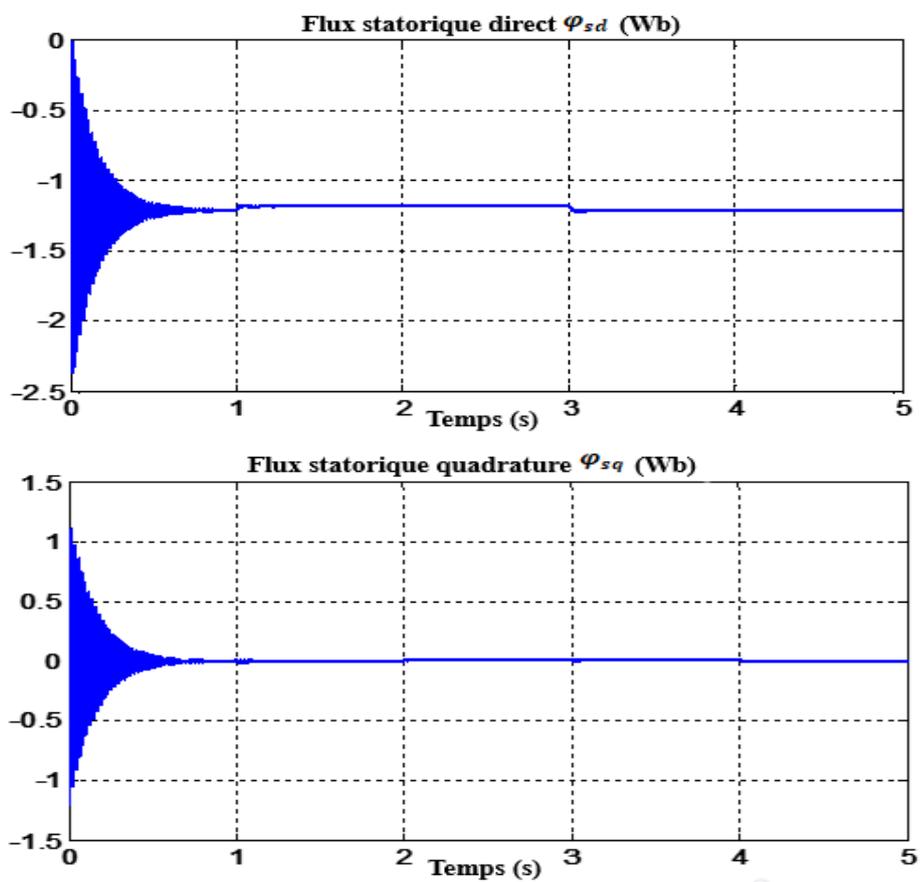
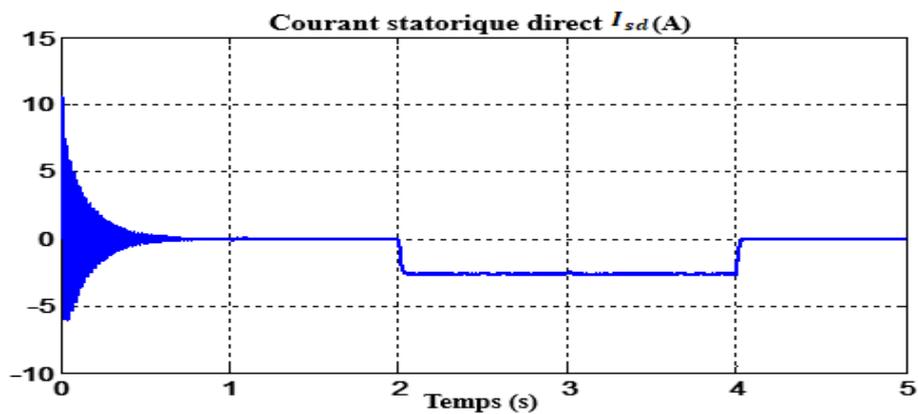


Fig. IV. 12. Les flux statoriques selon l'axe d et q.



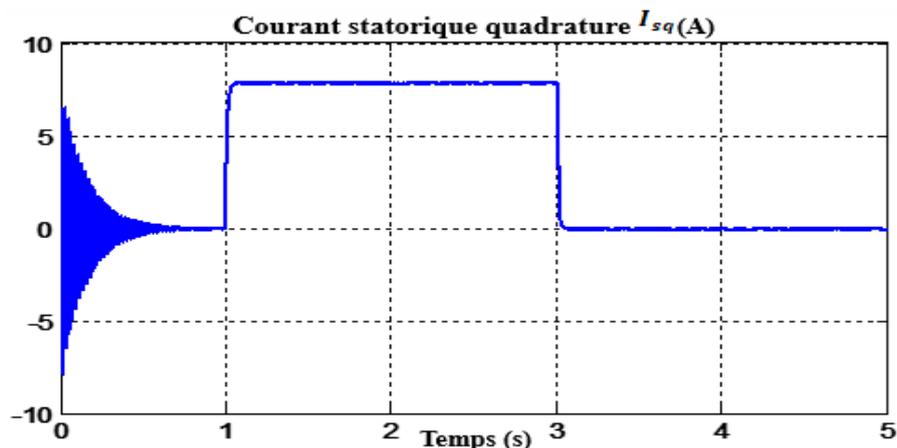


Fig. IV. 13. Les courants statoriques selon l'axe d et q.

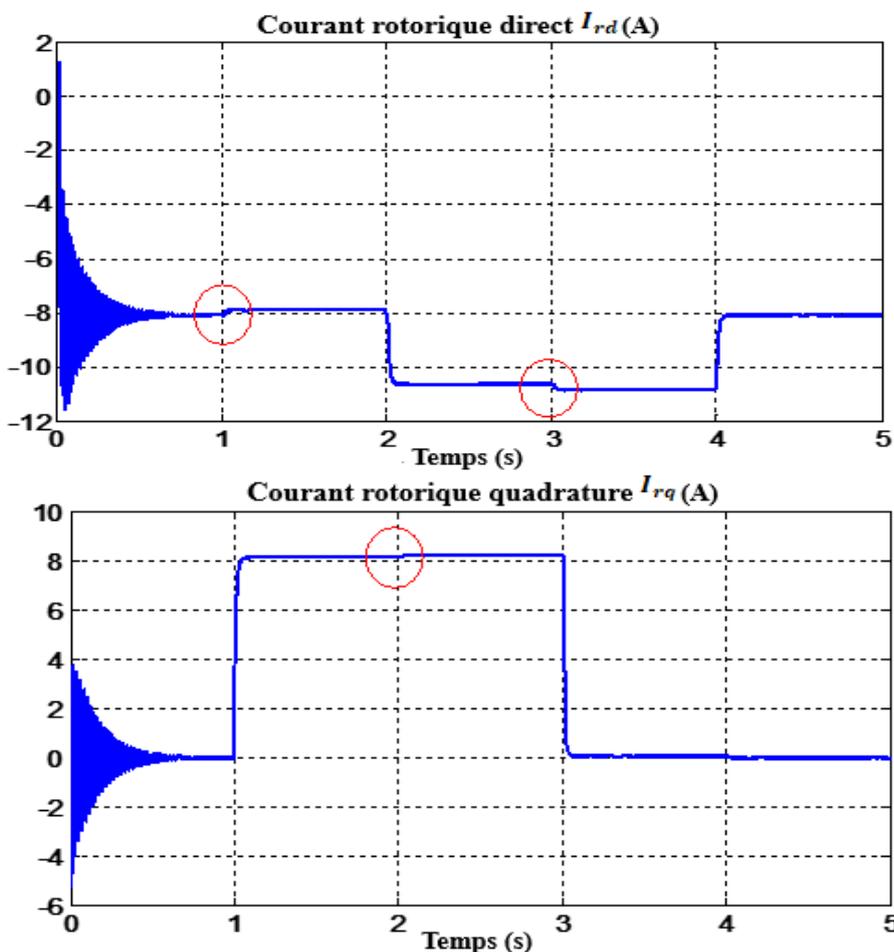


Fig. IV. 14. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.

La simulation de la machine, de la partie électrique et du contrôle direct et indirect a été mise en œuvre dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer des tests de contrôle.

Les figures (IV.10, IV.11, IV.12, IV.13, IV.14) montrent que les puissances actives et réactives délivrés par la MADA suivent les références correspondantes avec les courants rotoriques et statoriques plus les flux statoriques. Les variables contrôlées suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépasser les puissances actives et réactives et sans erreur statique à l'état stable. Au démarrage, l'appelle du courant statorique en trois phases est plus faible et sinusoïdal à l'état stable.

- ✓ **Résultats de simulation cas de vitesse du vent fixe 12.15 m/s**
- a. La commande vectorielle direct (CVD)**

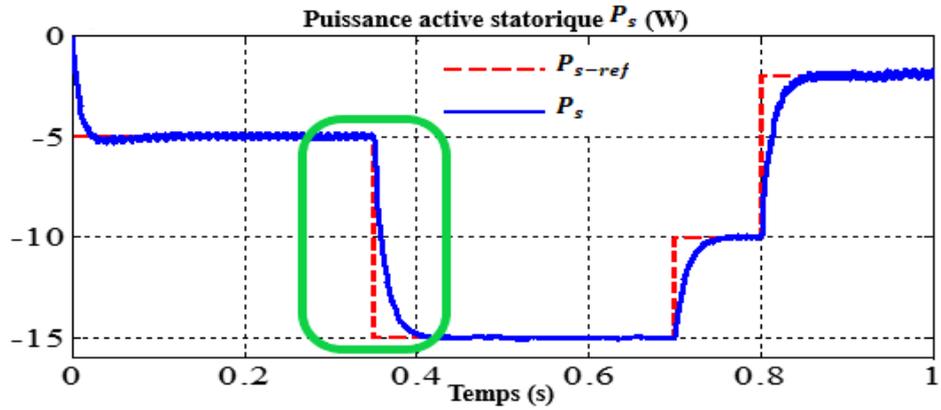


Fig. IV. 15. Puissance active statorique.

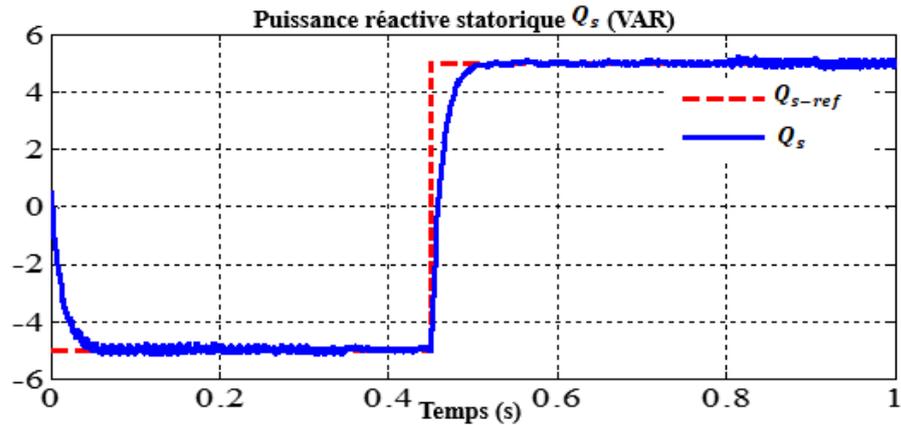


Fig. IV. 16. Puissance réactive statorique.

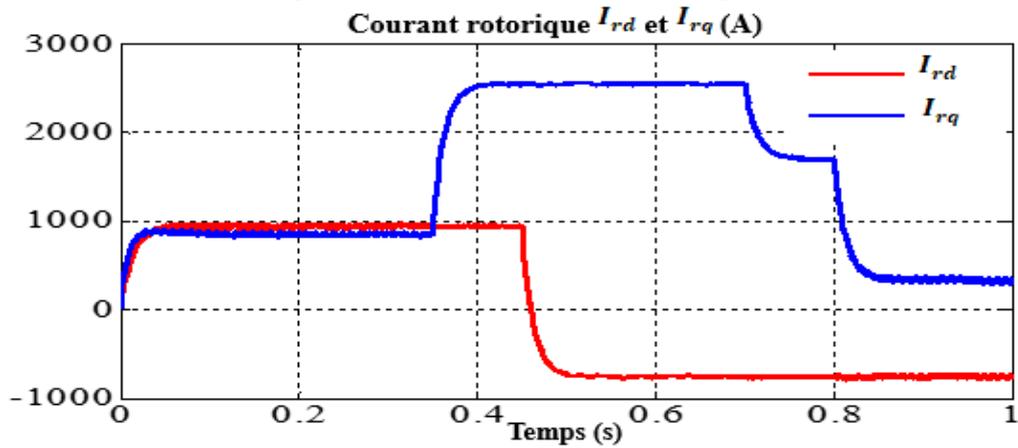


Fig. IV. 17. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.

b. La commande vectorielle indirect (CVI)

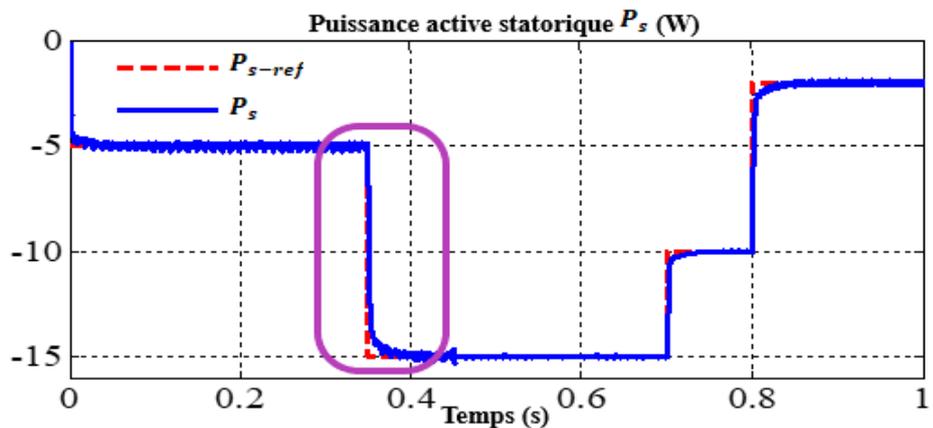


Fig. IV. 18. Puissance active statorique.

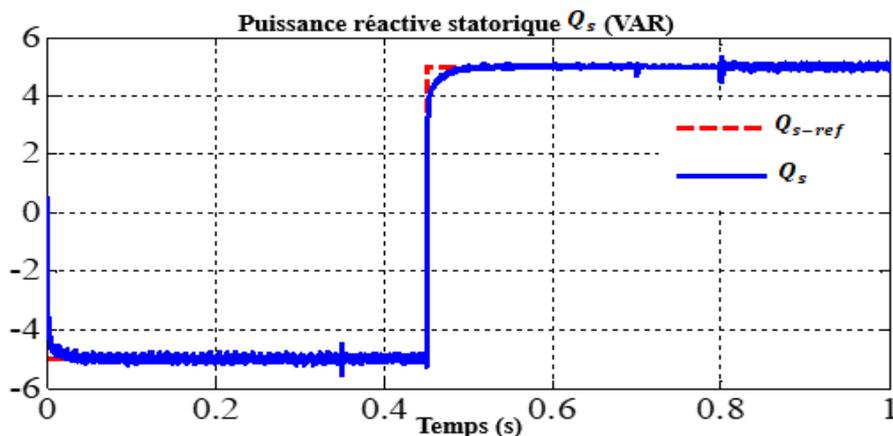


Fig. IV. 19. Puissance réactive statorique.

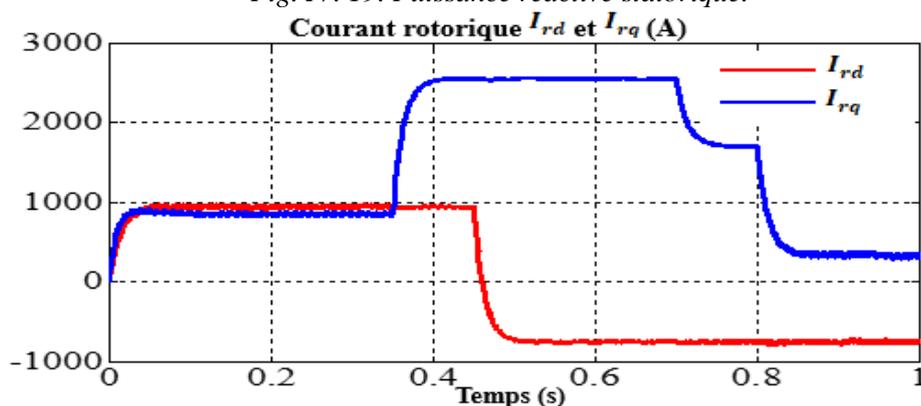


Fig. IV. 20. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.

Les figures (IV.15, IV.16, IV.17, IV.18, IV.19, IV.20) représentent successivement, les résultats obtenus de la simulation des deux méthodes directe et indirecte de commande en puissances de la MADA cas de vitesse du vent fixe. Sur la base de ces résultats, il peut être vu pour les deux méthodes de contrôle que les paramètres de puissance sont bien suivis par la MADA pour la puissance active et réactive avec un bon rejet de perturbation. Toutefois, pour le contrôle indirect, l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) est observé parce qu'un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de petites oscillations sur la seconde. D'autre part, l'effet de cette variation est négligeable pour la méthode directe parce que le modèle de la MADA a été simplifié en négligeant les termes de couplage. Le fonctionnement de la commande de puissance réactive nous a permis d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif). D'autre part, la puissance active est toujours maintenue négative, ce qui signifie que la MADA fonctionne en mode générateur.

Nous constatons aussi que les composantes directes du courant statorique et du courant rotorique ainsi que les composantes en quadratiques de ces courants présentent les mêmes allures, ce qui reflète le modèle mathématique de la MADA Figure (IV.17 et IV.20). Donc, la puissance active est contrôlée par la composante en quadratique du courant, tandis que la puissance réactive est contrôlée par la composante directe de celui-ci.

✓ **Résultats de simulation cas de vitesse du vent variable (MPPT)**

a. La commande vectorielle direct (CVD)

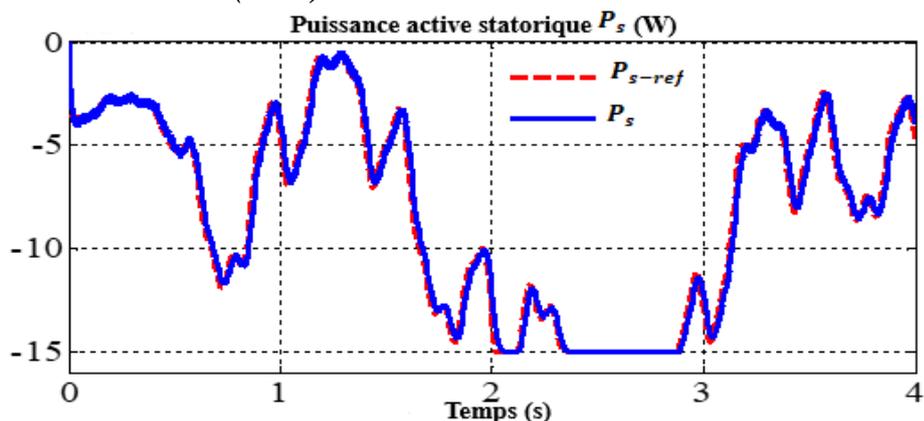


Fig. IV. 21. Puissance active statorique.

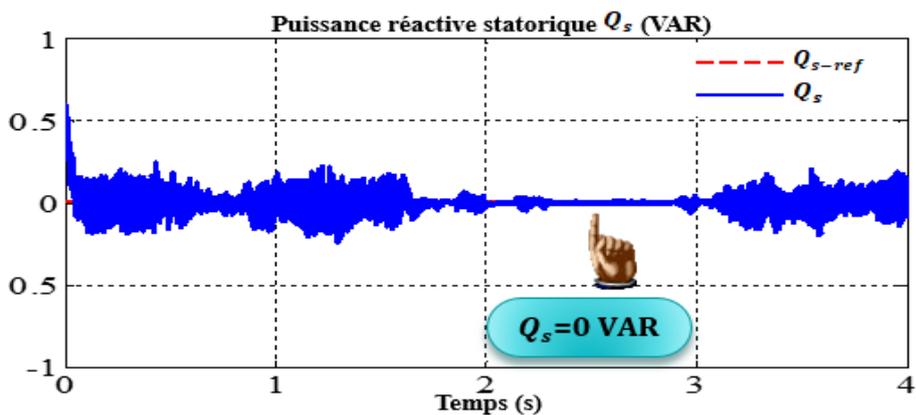


Fig. IV. 22. Puissance réactive statorique.

b. La commande vectorielle indirect (CVI)

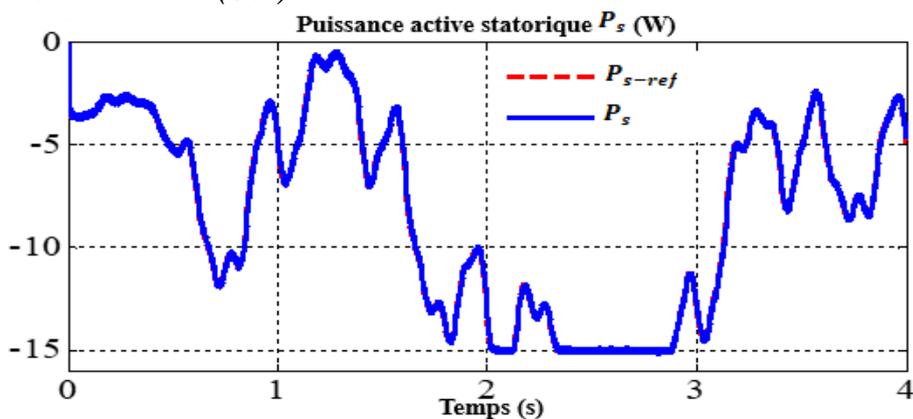


Fig. IV. 23. Les courants rotoriques selon l'axe d et q.

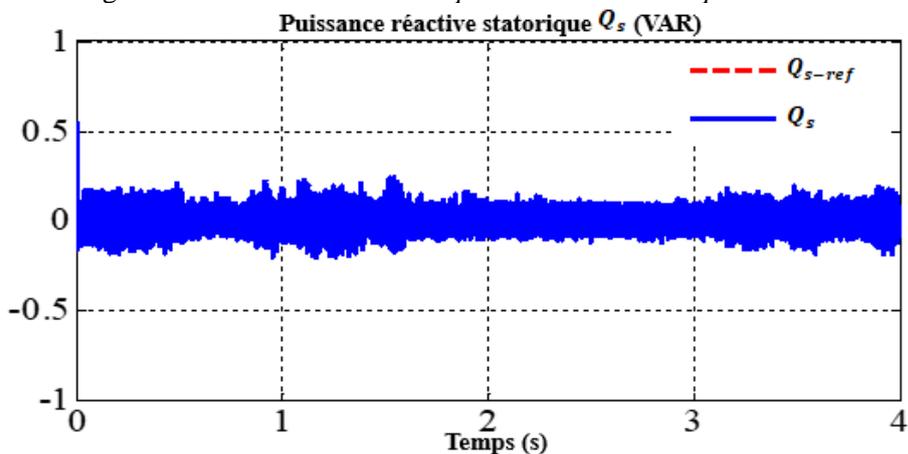
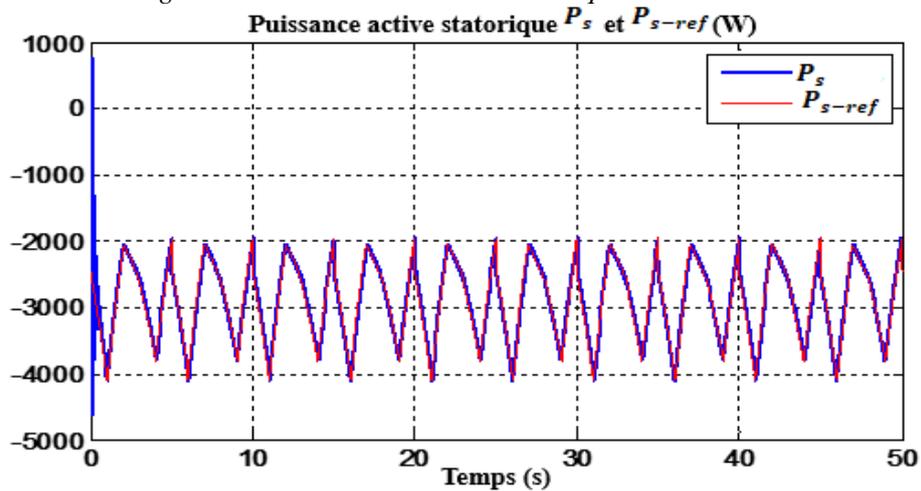


Fig. IV. 24. Puissance réactive statorique.



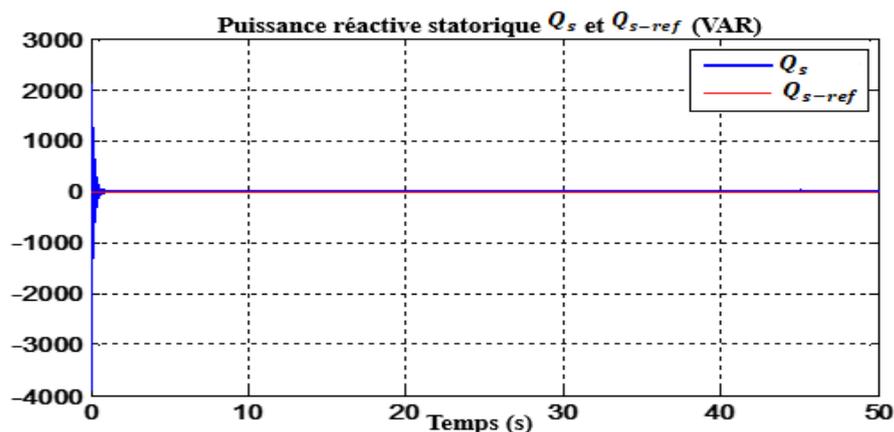


Fig. IV. 25. Zoom sur les puissances active et réactive statorique et ses references.

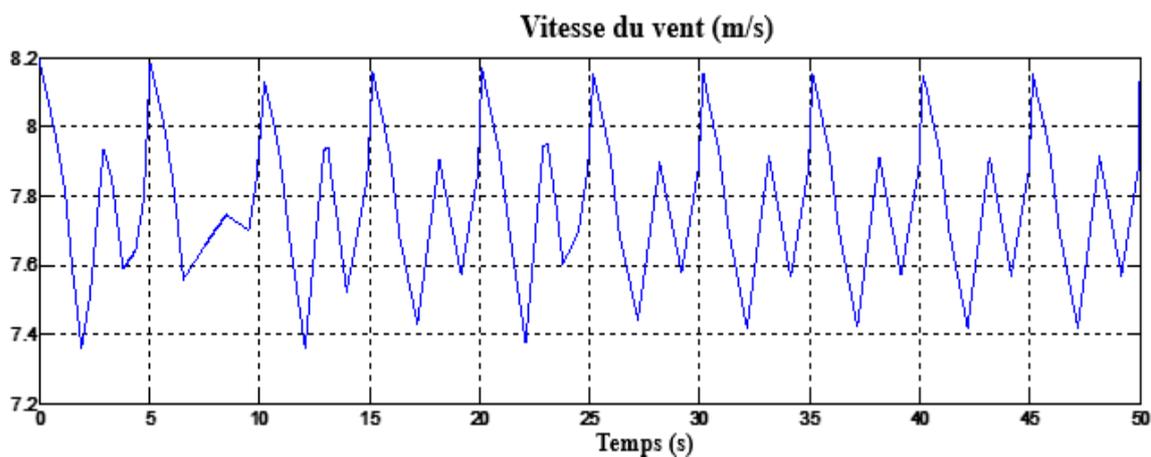


Fig. IV. 26. Profil du vent appliqué.

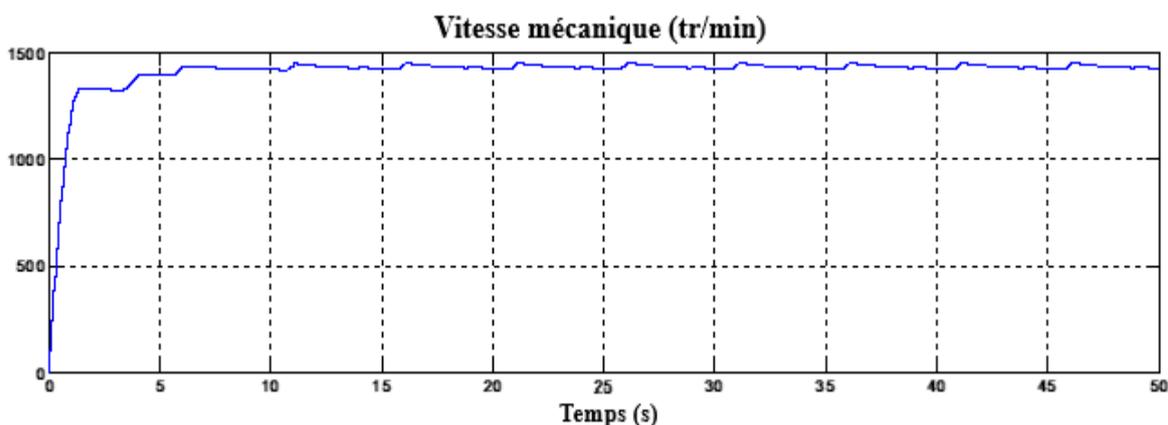


Fig. IV. 27. La vitesse mécanique.

Les figures (IV.21, IV.22, IV.23, IV.24, IV.25, IV.26, IV.27) représentent successivement, les résultats obtenus de la simulation des deux méthodes directe et indirecte de commande en puissances de la MADA cas de vitesse du vent variable. Ce test de simulation a donc été effectué à l'aide du profil de vent utilisé dans le chapitre II. Ces figures illustrent respectivement les résultats de simulation du contrôle direct et indirect appliqué à MADA, en utilisant la stratégie de contrôle MPPT pour toute la chaîne éolienne.

La puissance active fournie par le stator a la même vitesse que la puissance mécanique de la turbine (figure II.15) qui varie en fonction de la variation du vent grâce à la stratégie de commande MPPT pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans des conditions optimales. La puissance réactive est nulle puisque nous voulons fonctionner avec un facteur de puissance unitaire de ($\cos \varphi = 1$).

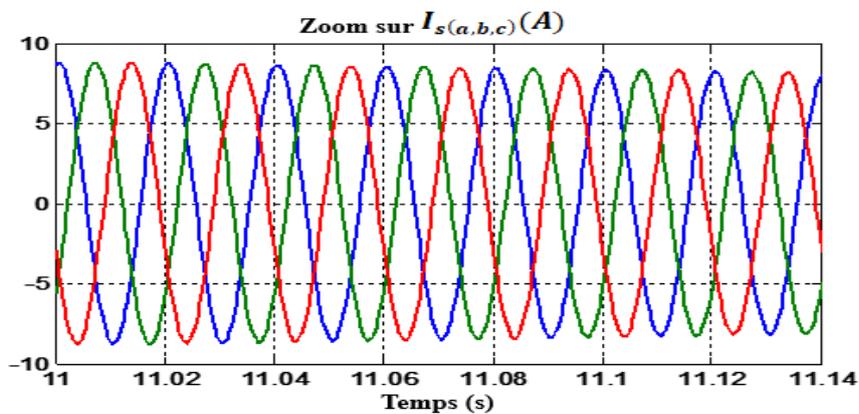
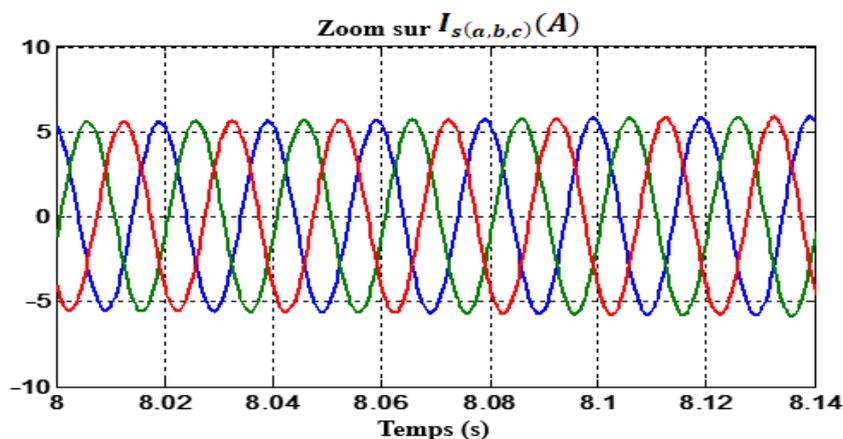
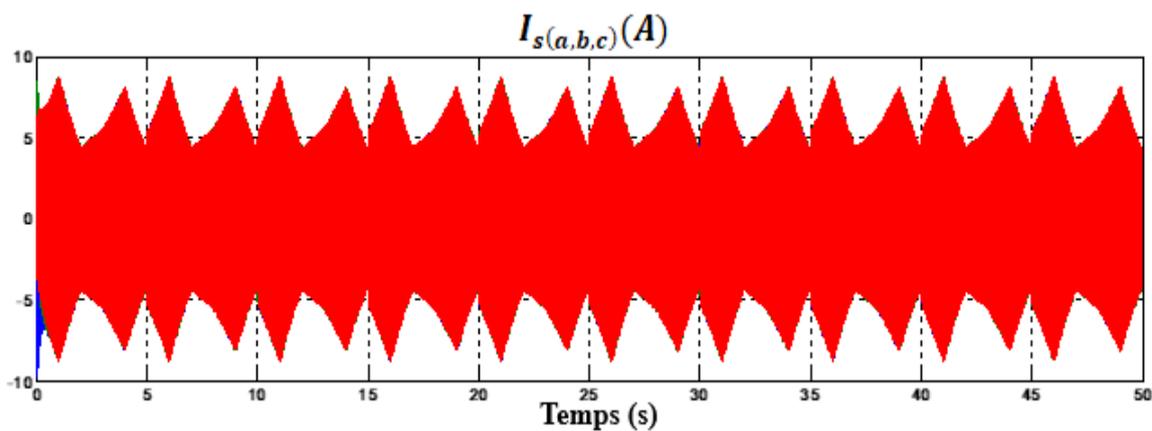
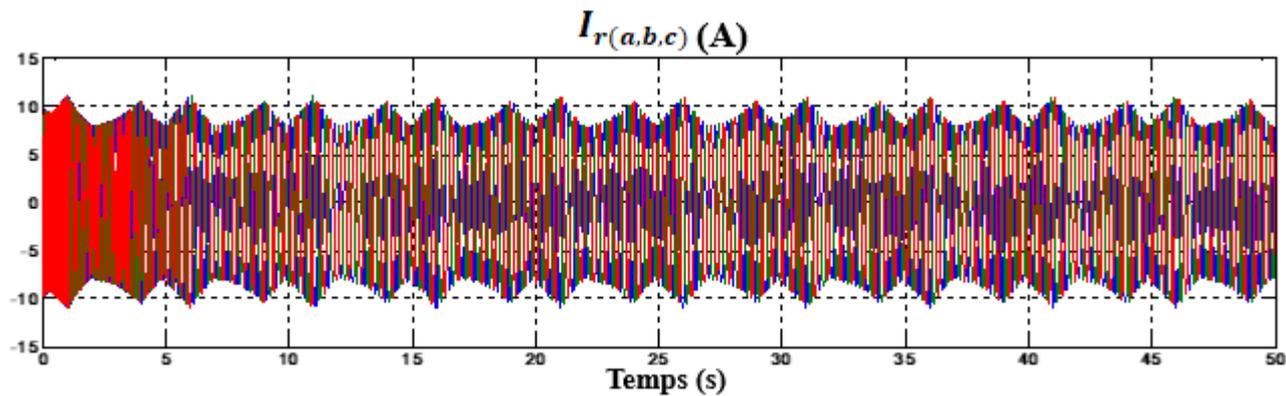


Fig. IV. 28. Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.



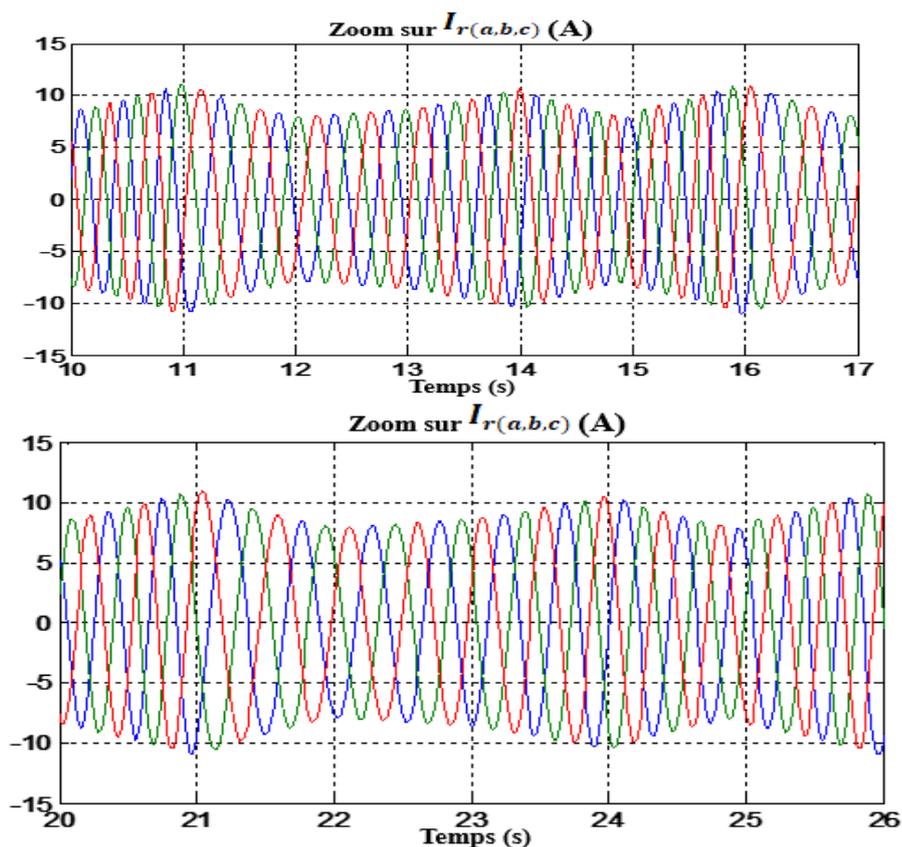


Fig. IV. 29. Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

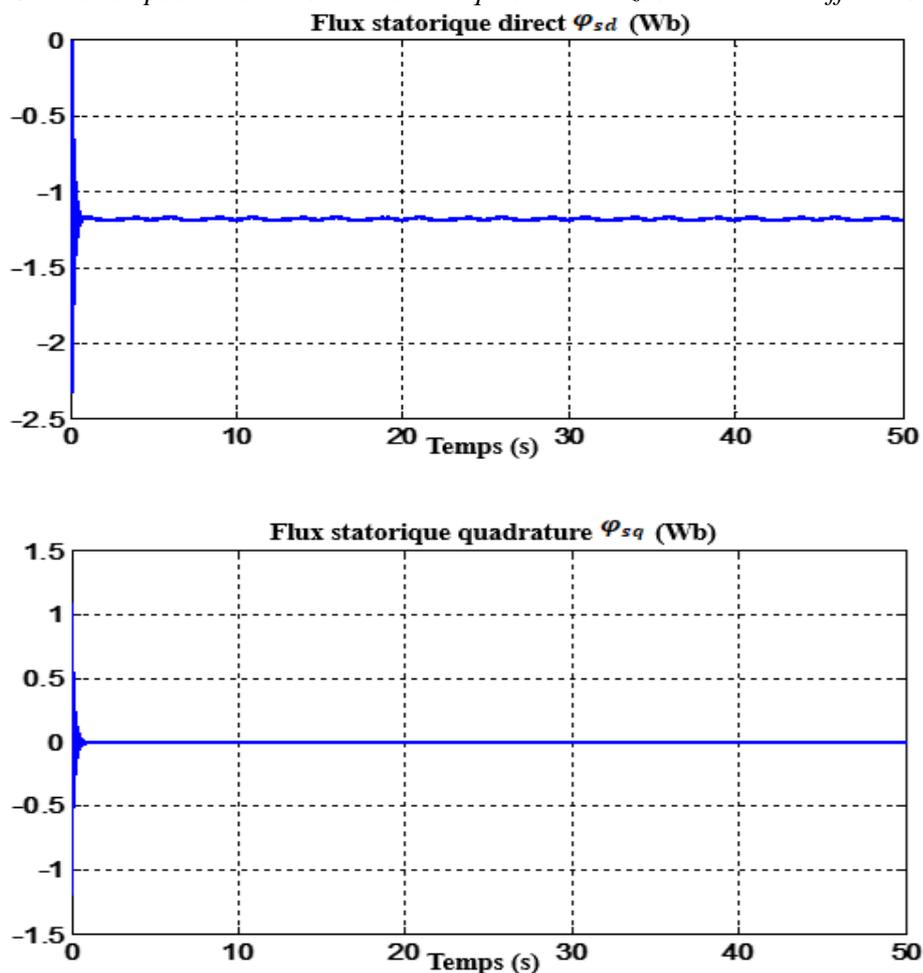


Fig. IV. 30. Les flux statoriques selon l'axe d et q.

IV.3. La commande par MLI de la MADA

Les techniques dites Modulation de Largeur d'Impulsions « MLI » ou (Pulse Width Modulation « PWM » ou Pulse-Duration Modulation (PDM), en utilisant une dénomination plus ancienne pour contrôler les convertisseurs statiques. La Pulse Width Modulation (PWM) est une technique de contrôle pour les convertisseurs statiques servant d'interface entre une charge (machine électrique, ...) et son alimentation (onduleur en trois phases, ...). Il s'agit donc d'une technique utilisée pour la conversion énergétique, ayant ses bases dans le domaine des télécommunications (traitement des signaux).

Ces stratégies de contrôle sont basées sur les performances de fréquence de commutation autorisées par les composants électroniques utilisés. Cette configuration permet d'imposer des courants à faible distorsion harmonique sur la MADA, ce qui facilitera le fonctionnement du filtrage et réduira la taille des éléments de filtre associés, et conduit finalement à une meilleure qualité de puissance.

Plusieurs techniques de modulation de largeur d'impulsion sont utilisées dans le contrôle de ces types de convertisseurs afin :

1. De repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite leurs filtrages.
2. De faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

Loin d'être un élément accessoire dans la chaîne de variation de vitesse (entraînement électrique associé à une machine électrique), la scène PWM joue un rôle essentiel avec des conséquences sur toutes les performances du système : performances de conduite, pertes dans l'onduleur ou dans la machine, bruit acoustique, bruit électromagnétique, destruction même du système, due, par exemple, à des surtensions qui se produisent lors de l'utilisation des longs câbles.

IV.3.1. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tensions et sa commande à MLI

IV.3.1.1. Description de l'onduleur

Les onduleurs de tension sont utilisés dans divers domaines d'application dans l'électronique de puissance et en particulier dans le domaine de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative. Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, la tension d'entrée doit être coupée et appliquée au récepteur dans un sens ou dans l'autre. Pour ce faire, il est nécessaire d'intervenir au contrôle des interrupteurs qui composent l'onduleur. Ceci est très important car il détermine le type de tension de sortie. Le fort développement des onduleurs de tension ces dernières années est dû, d'une part, au développement de composants semi-conducteurs entièrement contrôlables, puissants, robustes et rapides et, d'autre part, à l'utilisation presque généralisée des techniques de modulation de la largeur des impulsions [Moh 13].

L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite a une impédance interne négligeable. Les deux commutateurs de chaque branche de l'onduleur sont contrôlés de manière complémentaire, en appliquant la modulation de la largeur d'impulsion. Le but de cette modulation est de recréer en valeur moyenne le vecteur de tension de référence à chaque période de commutation. Elle convertit les trois tensions de référence de la commande en signaux pour tourner les semi-conducteurs de l'onduleur sur ou hors tension.

IV.3.1.2. Principe de l'onduleur à deux niveaux de tension

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est généralement obtenue par un redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtre. Ce filtre est largement utilisé en MLI pour fournir des récepteurs équilibrés à trois phases avec une tension et une fréquence variables [Moh 13] [Seg 95]. Il peut être considéré comme la superposition de trois onduleurs monophasés à demi-pont. Chacune des trois tensions composées de sortie est formée par une onde bistable prenant les valeurs +E et -E mais décalée de 2π l'une par rapport à l'autre.

Afin d'obtenir une tension alternative à partir d'une tension de courant continu, la tension d'entrée doit être coupée et appliquée au récepteur dans les deux sens. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternée formée par une succession de fentes rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est définie par le contrôle des commutateurs [Moh 13].

IV.3.1.3. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

Le rotor du MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux étages équipé de semi-conducteurs contrôlés à l'ouverture et à la fermeture. Les six commutateurs électroniques montrés, que nous supposons être parfaits, peuvent être des transistors (Bipolaire, MOSFET, IGBT) associés à des diodes dans la tête de pique, ou des thyristors équipés d'un circuit d'arrêt en plus du dispositif d'amorçage.

CHAPITRE IV : LES STRATEGIES DE COMMANDE D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION EOLIENNE CONNECTÉE AU RESEAU

Chaque groupe de transistor-diode dans la figure (IV. 31. A) peut être remplacé par des commutateurs k_j avec ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6$) ce qui donne lieu à un diagramme simplifié pour chaque onduleur comme le montre la figure (IV. 31. B).

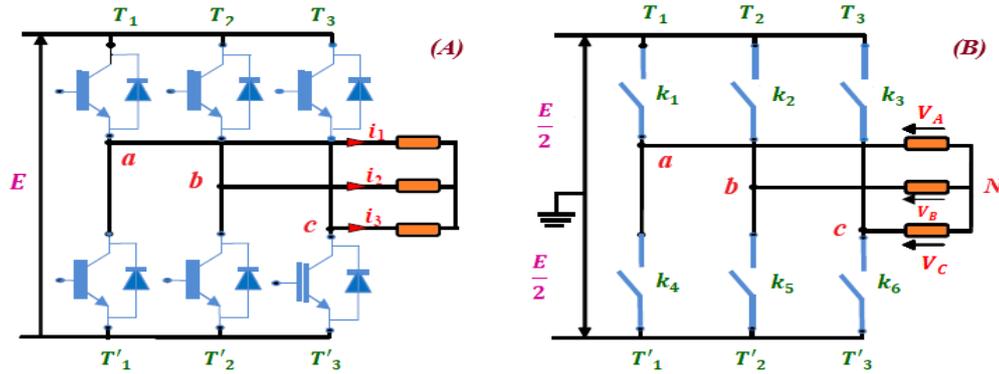


Fig. IV. 31. Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Afin d'éviter de court-circuiter la source de tension continue, les commandes de l'interrupteur sur le même bras doivent être complémentaires. Pour simplifier l'étude, nous supposons que le couplage est du type étoile sans neutre (bien que la connexion d'une charge en triangle est possible).

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont:

$$\begin{aligned} V_A &= V_{AO} + V_{ON} \\ V_B &= V_{BO} + V_{ON} \\ V_C &= V_{CO} + V_{ON} \end{aligned} \quad (IV.23)$$

Par addition on a :

$$V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \quad \rightarrow \quad V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (IV.24)$$

On remplace (IV. 24) dans (III. 23), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (IV.25)$$

On peut écrire le système (IV. 25) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (IV.26)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (IV.27)$$

Telle que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } k_1 \text{ fermé} & \text{si non} & S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & \text{si } k_2 \text{ fermé} & \text{si non} & S_2 = -1 \\ S_3 = 1 & \text{si } k_3 \text{ fermé} & \text{si non} & S_3 = -1 \end{cases} \quad (IV.28)$$

On remplace (IV.27) dans (IV.26) on aura le système suivant, ce dernier représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (IV.29)$$

IV.3.1.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion MLI, c'est à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on a la forme d'une succession de créneau de largeurs appropriées. Cela permet d'obtenir des tensions qui ne contiennent pas d'harmoniques à basse fréquence.

La modulation triangulo-sinusoidale MLI-ST est appelée également modulation de largeur d'impulsion interjective puisque son principe est basé sur l'intersection d'une onde modulante à basse fréquence, connue sous le nom de tension de référence (généralement sinusoidale), avec une onde porteuse à une fréquence de commutation élevée (généralement triangulaire ou en dents de scie), d'où le nom de sinus-triangle. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante est le résultat d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et une bonne efficacité de l'onduleur.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoidale :

- L'indice de modulation m qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \tag{IV.30}$$

- Le taux de modulation r (ou indice de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse :

$$r = \frac{V_r}{V_p} \tag{IV.31}$$

Les heures d'ouverture des commutateurs sont ensuite définies par les intersections entre les deux ondes, et la fréquence de commutation est déterminée par la fréquence du porteur. Le diagramme schématique est donné dans la figure IV.32.

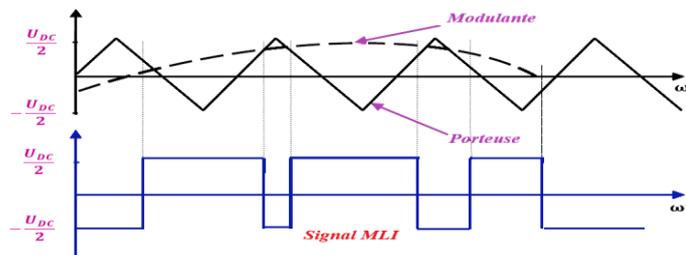


Fig. IV. 32. Principe de commande en MLI-ST.

IV.3.2. Principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI

Le redresseur PWM a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. La tension de sortie d'un redresseur MLI est toujours plus élevée que sa tension d'entrée, il est donc nécessaire d'ajuster la tension de sortie en fonction de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence. Ce type de convertisseur peut fonctionner comme un redresseur ou un onduleur. Lorsque le courant I_{ch} est positif (opération de redresseur), le condensateur C est déchargé et le signal d'erreur demande à l'unité de commande plus d'énergie du réseau, l'unité de contrôle prend l'énergie d'approvisionnement en produisant des signaux appropriés pour démarrer les transistors. De cette façon, le courant s'écoule du côté AC vers le côté DC, et la tension du condensateur est récupérée. Inversement, I_{ch} lorsqu'il devient négatif (Opération onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au contrôle de décharger le condensateur et de retourner l'énergie au réseau [NOU 01].

IV.3.2.1. Modélisation du redresseur à MLI

La structure du convertisseur se compose de deux interrupteurs par bras. Ceux-ci ont la particularité d'être bidirectionnel et entièrement contrôlable à l'ouverture et la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les basses puissances et les très hautes fréquences, des IGBT pour les hautes puissances et les hautes fréquences, ou des GTO pour les très grandes puissances et les basses fréquences [DJE 07]. Pour assurer le débit du courant dans les deux directions, le commutateur doit être placé dans l'antiparallèle avec une diode.

L'inductance (L) et la résistance (R) représentent l'impédance de ligne, V est la tension de ligne et U_c la tension d'entrée du redresseur. La figure (IV.33), présente la structure d'un redresseur à MLI triphasé, qui peut être décomposé en trois étages : La source, le convertisseur et la charge.

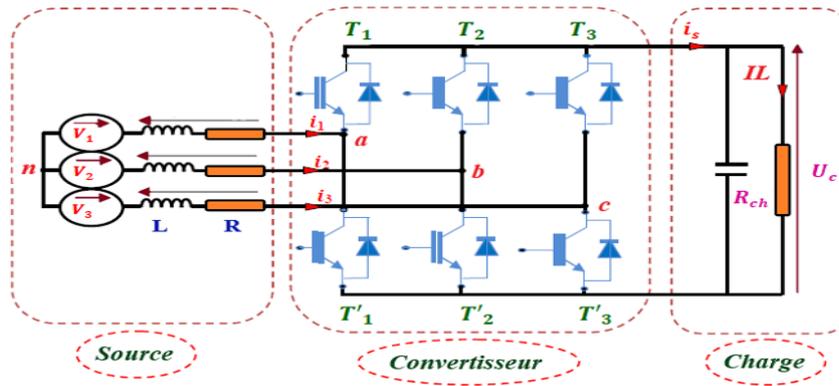


Fig. IV. 33. Structure du redresseur à MLI.

a) La source d'alimentation

La source est modélisée par une FEM triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne.

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

Les tensions de la ligne sont données par :

$$\begin{cases} V_1 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = Ri_3 + L \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (IV.32)$$

Où:

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} Sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur. Et les courants de chaque phase sont ensuite donnés par le système suivant d'équations différentielles :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (IV.33)$$

b) L'étage Convertisseur

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente, la matrice de connexion du pont est similaire à l'équation IV.29

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{u_c}{2} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (IV.34)$$

En plus le courant redressé est donné par :

$$i_s = [S_1 \quad S_2 \quad S_3] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (IV.35)$$

c) La charge

Cet étage est constitué d'une capacité C en parallèle avec une résistance R modélisant la charge continue. Et il est régi par les deux équations électriques :

$$\begin{cases} \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{c} (i_s - i_L) \\ U_c = R_{ch} \cdot i_L \end{cases} \quad (IV.36)$$

IV.3.3. Résultats de simulation de la MADA cas en utilisant un onduleur et un redresseur à deux niveaux :

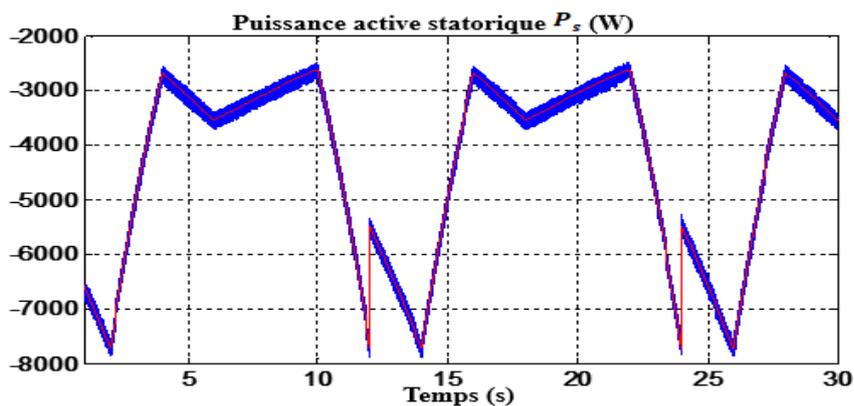


Fig. IV. 34. Puissance active statorique.

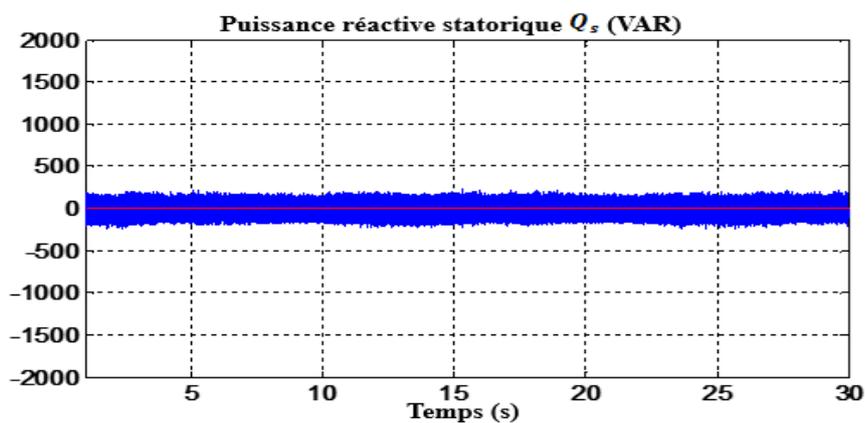
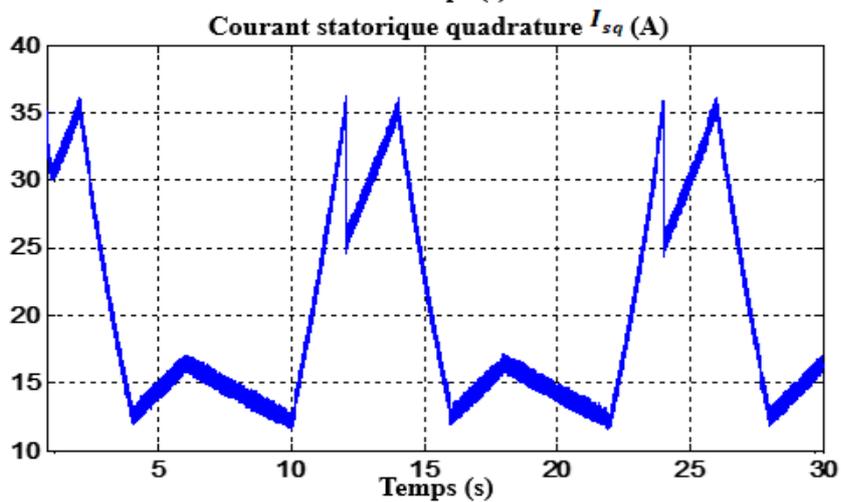
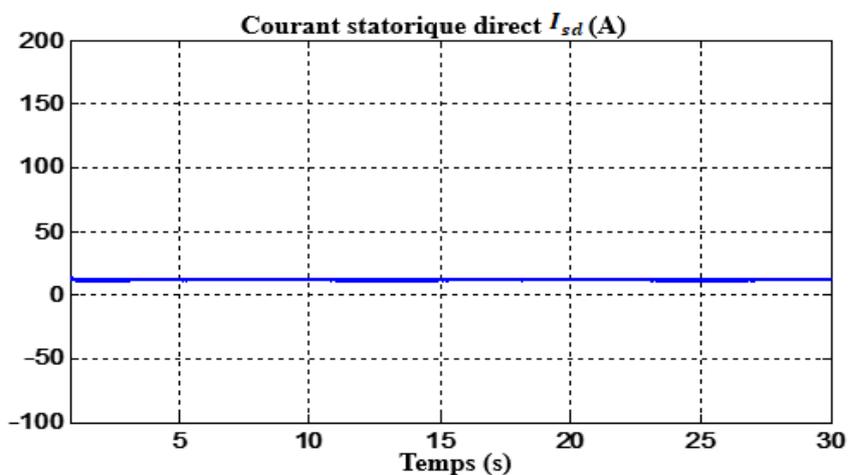


Fig. IV. 35. Puissance réactive statorique.



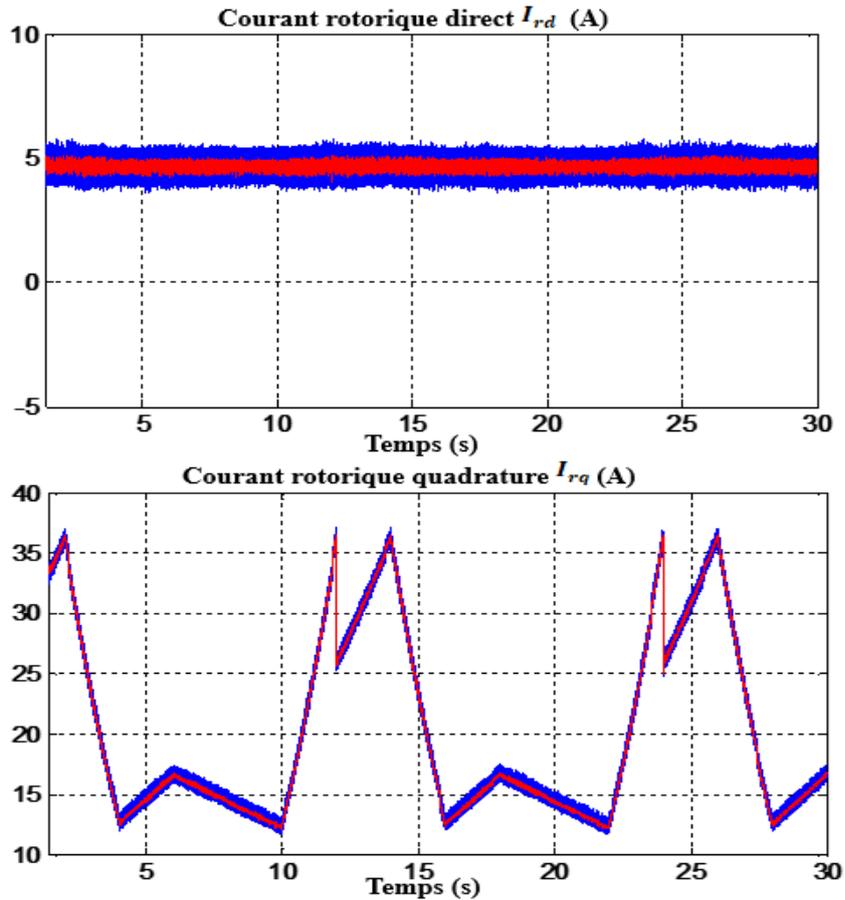
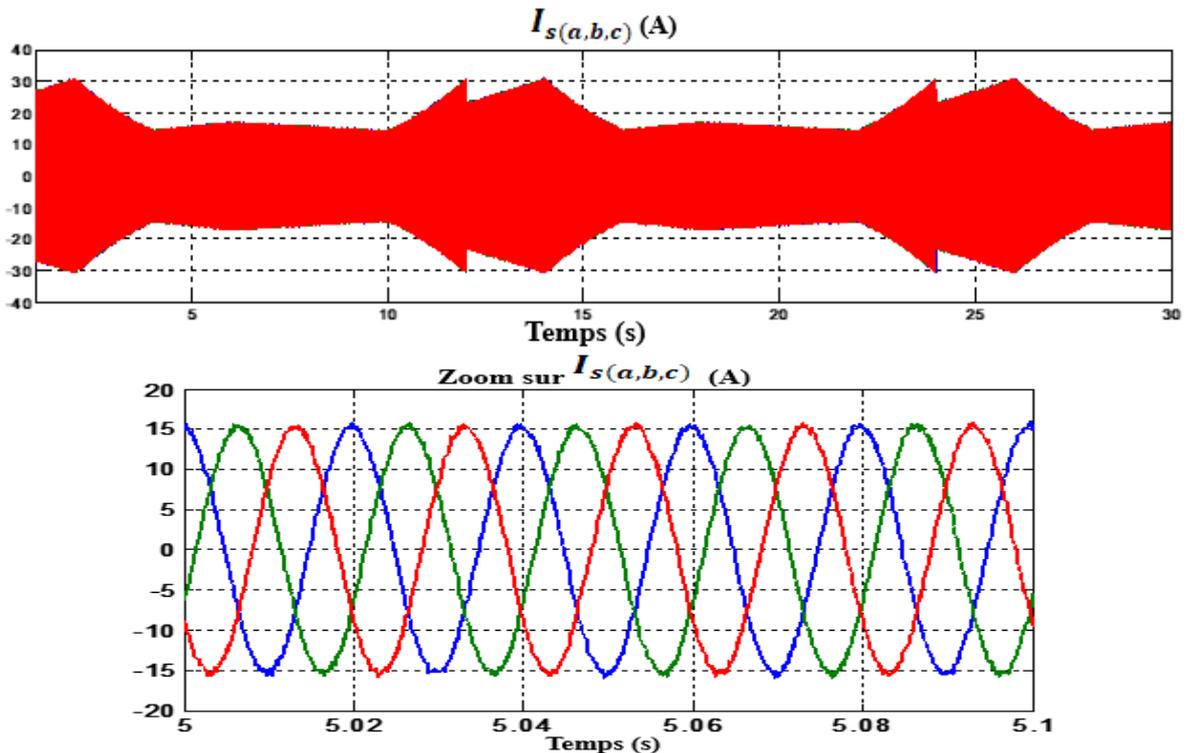


Fig. IV. 36. Les courants statoriques et rotoriques selon les axes d et q .

À partir de ces résultats (figure IV.34, IV.35 et IV.36) on peut voir que le signal de puissance active et réactive est suivi par la forme du signal de référence. Les ondulations qui peuvent être vues sont dues à la commutation des commutateurs de l'onduleur.

La chronologie de fonctionnement de l'éolienne est également illustrée par les variations des différentes grandeurs présentées. La tension redressée est asservie à sa référence.



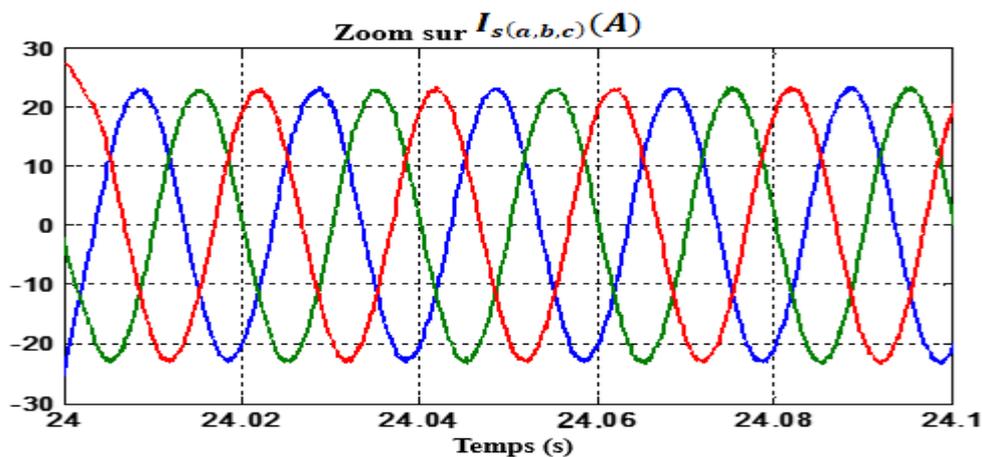


Fig. IV. 37. Les composantes du courant statoriques avec un zoom entre les différents instants.

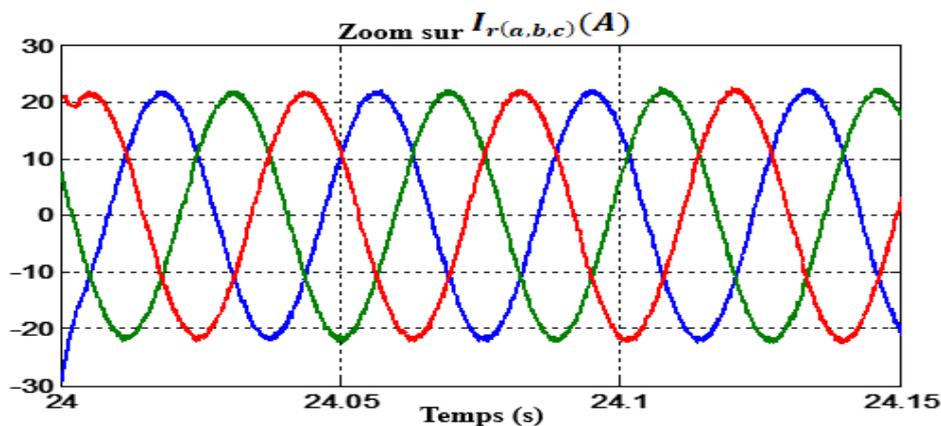
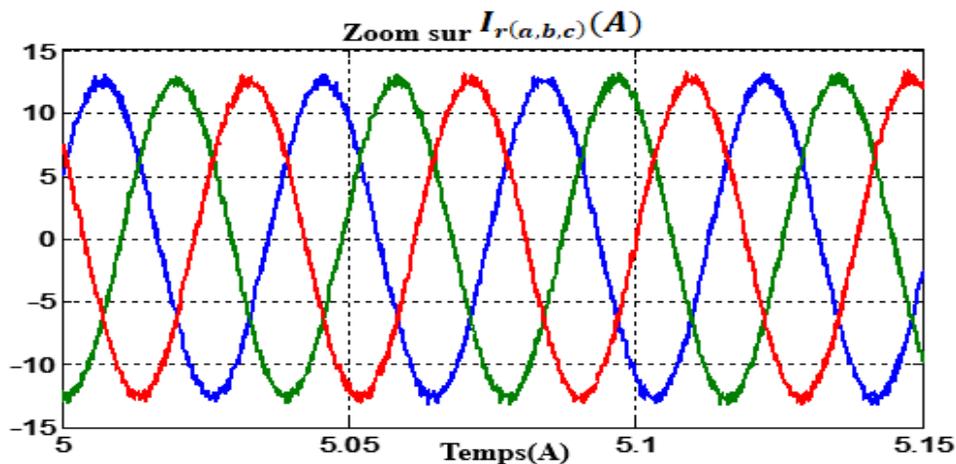
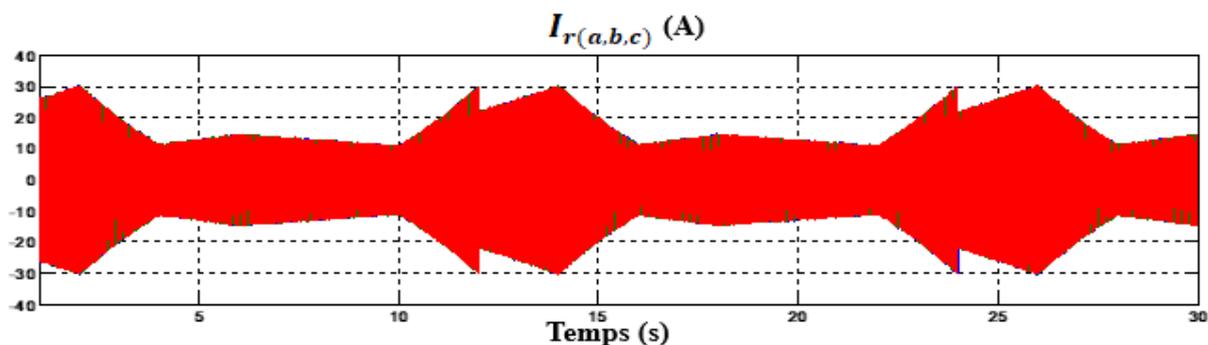


Fig. IV. 38. Les composantes du courant rotoriques avec un zoom entre les différents instants.

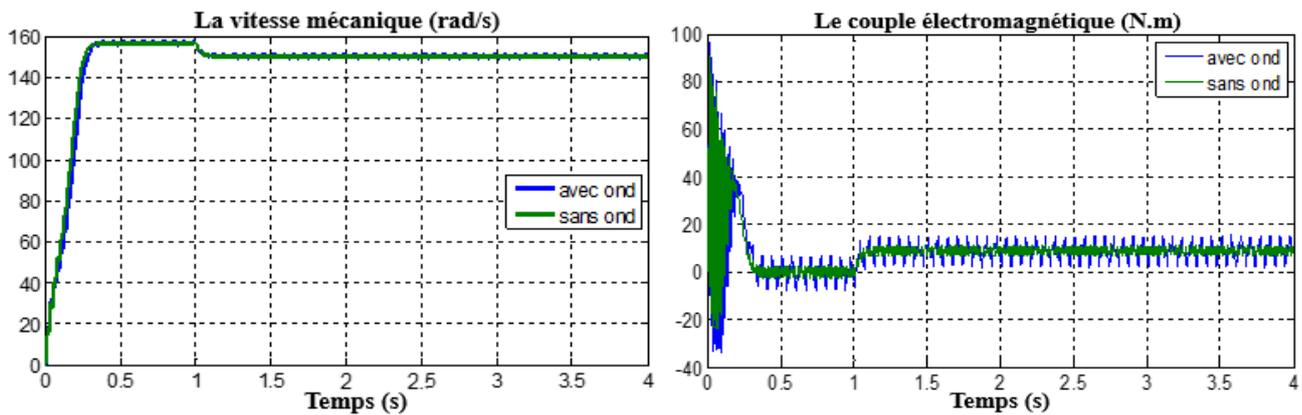


Fig. IV. 39. La vitesse mécanique et le couple électromagnétique avec et sans onduleur.

Les résultats de la simulation montrent également un bon suivi de consigne pour la puissance active et la puissance réactive statorique qui est maintenu à zéro par la puissance réelle fournie par la MADA. Lorsque le point de puissance réactive est maintenu à zéro, cela permet de conserver le facteur de puissance unitaire du côté stator.

En plus les courants statoriques et rotoriques suivent parfaitement leurs références et ont une forme sinusoïdale (figure IV.37 et IV.38). Ce qui confirme l'intérêt du redresseur à MLI dans la réduction des harmoniques.

La simulation du système si on ajoute un onduleur présente des ondulations par rapport au modèle sans onduleur à cause de la commutation d'interrupteurs (figure IV.39).

IV.4. Commande par la logique floue d'une MADA

La logique floue est une nouvelle méthode d'ajustement qui a été largement introduite au Japon. Plus récemment, cependant, elle est de plus en plus appliquée en Europe. Les méthodes de contrôle conventionnelles sont basées sur une modélisation système et un traitement analytique adéquats à l'aide de fonctions de transfert ou d'équations d'état. Le réglage par logique flou, d'autre part, donne une approche plutôt programmatique, permettant l'inclusion de l'expérience acquise par les opérateurs.

La logique floue est une description mathématique d'un processus basé sur la théorie des ensembles flous. Cette théorie a été introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'Université de Californie à Berkeley. À cette époque, la théorie de la logique floue n'était pas prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0), ont commencé à se propager à grande échelle. D'autre part, la logique floue a été utilisée pour traiter les variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0. Au départ, son objectif était, comme dans le contrôle automatique classique, de traiter les problèmes de contrôle des processus, c'est-à-dire de gérer un processus selon une instruction donnée, en agissant sur les variables qui décrivent le processus, mais son approche est différente de celle du contrôle automatique classique. Il utilise le plus souvent les connaissances d'experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus [CHE98].

Les systèmes flous peuvent être considérés comme des systèmes logiques qui utilisent des règles linguistiques pour établir des relations entre leurs variables d'entrée et de sortie. Ils sont apparus pour la première fois dans les années soixante-dix avec des applications dans le domaine du contrôle des processus (Mamdani et Assilian, 1975).

Aujourd'hui, les applications des systèmes flous sont très nombreuses en plus du contrôle, ils sont largement utilisés pour la modélisation [Kim97], [Wan96], le diagnostic et la reconnaissance des motifs.

Pour une meilleure compréhension de leur fonctionnement dans cette partie on donnera un aperçu bref sur la logique floue.

IV.4.1. Historique et domaine d'application de la logique floue

Ce sont les premières approches du concept d'incertitude de Heisenberg développées par des chercheurs américains dans les années 1920 et 1930 qui ont conduit à l'émergence d'une logique floue. Mais ce n'est qu'en 1965 que les bases théoriques de cette logique ont été proposées par le professeur Lotfi Zadeh, dans un article intitulé « Fuzzy sets » (Ensembles flous). Cet automaticien de renommée internationale a fait de nombreuses avancées théoriques qui ont contribué à la modélisation de phénomènes sous une forme floue, afin de surmonter les limites dues aux incertitudes des modèles classiques d'équation différentielle.

Voici l'essentiel de l'historique de la logique floue [MEC08] :

- En 1973, Lotfi Zadeh a proposé d'appliquer une logique floue pour résoudre les problèmes d'ajustement;
- En 1975, le professeur Mamdani a proposé à Londres, une première application très encourageante du contrôle logique floue et a développé une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur;

- En 1978, la société danoise F.L. Smidth-Fuller a effectué le contrôle d'un four à ciment : c'était la première véritable application industrielle de la logique floue [MIC07] ;
- En 1983, un purificateur d'eau avec un contrôle logique flou a été développé avec succès;
- À partir de 1985, la logique floue est introduite par le chercheur M. Suegno au Japon. Ce type de contrôle a ensuite fait l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 comme le métro Sendai (1987) et la machine à laver Aïsaïgo Pay Fuzzy de Matsushita (1990).

Depuis, la logique floue au Japon a connu un véritable boom du fait que les entreprises japonaises ont rapidement compris ses avantages, tant techniques que commerciaux [ZID06]:

- Facilité de mise en œuvre ;
- Solutions aux problèmes complexes multivariés;
- Robustesse à l'incertitude;
- Possibilité d'intégrer le savoir-faire de l'expert.

Le résultat est une véritable panoplie de produits estampillés « Fuzzy logic inside », dont les exemples suivants ne sont que quelques exemples:

- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateur, autocuiseur, ... etc.) ;
- Systèmes audio-visuels (appareil photographique autofocus, photocopieur, ... etc.) ;
- Systèmes automobiles embarqués (ABS, suspension, climatisation, ... etc.) ;
- Systèmes de transports (train, métro, ascenseur, les grues... etc.) ;
- Le traitement des eaux ;
- Les systèmes de ventilation et de climatisation et les automobiles.

L'approche pour traiter les problèmes en utilisant une logique floue est différente de celle adoptée, a priori, dans une approche scientifique. C'est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision dans une logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou d'a priori ou de connaissances acquises précédemment.

Les champs d'application de la logique floue dans un processus décisionnel sont nécessaires dans les cas suivants :

- ✦ Pour les systèmes complexes où la modélisation est difficile ou impossible;
- ✦ Pour les systèmes contrôlés par des experts humains;
- ✦ Lorsque l'observation humaine est la source d'intrants système ou de règles de contrôle;
- ✦ Pour les systèmes dont les entrées/sorties continues ou discontinues sont nombreuses;
- ✦ Pour les systèmes avec des réponses non linéaires.

IV.4.2. Bases générales de la logique floue

La logique floue est un raisonnement humain basé sur des données imprécises ou incomplètes; il s'agit d'une logique qui remplace à la logique binaire une logique basée sur des variables qui peuvent prendre, en plus les valeurs « true » ou « false », valeurs réelles ou fausses intermédiaires avec certains degrés. La formulation mathématique de la logique floue donne naissance à une théorie appelée théorie des ensembles flous. Cette théorie n'est qu'une extension de la théorie classique des ensembles, sauf que la logique floue se caractérise par la notion de valeurs intermédiaires [GUE09].

La logique floue est utilisée pour traiter des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou des expressions de langage naturel.

IV.4.2.1. Ensemble floue

Dans la théorie conventionnelle des ensembles, une chose appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. En réalité, cependant, il est rare de rencontrer des choses dont le statut est précisément défini. Par exemple, où est exactement la différence entre une personne de grande taille et une personne de taille moyenne? C'est à partir de ce genre d'observation que Zadeh a développé sa théorie.

La notion d'ensemble flou a été proposée par Zadeh (Zadeh, 1965) en introduisant un caractère progressif de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, les humains, traitons dans notre vie quotidienne. Il a défini les ensembles flous comme des termes linguistiques tels que zéro, grand, négatif, petit ... Ces termes existent également dans les ensembles conventionnels.

Cependant, ce qui différencie ces deux théories définies, ce sont les limites fixées. Dans les ensembles flous, il est permis que quelque chose appartienne en partie à un certain ensemble; c'est ce qu'on appelle le degré d'appartenance. Dans les ensembles conventionnels, le degré d'appartenance est 0 ou 1, puis dans la logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle entre 0 et 1 (c'est ce qu'on appelle la fonction d'appartenance μ) [KOS91].

Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U, est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle [0,1] et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A. $\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance [GUE09].

IV.4.2.2. Variable et valeurs de variable linguistique

La variable linguistique représente un phénomène ou une ampleur; la description de la variation de ces variables en utilisant des termes linguistiques : « certains, beaucoup, souvent », « grand, moyen, petit » sont des valeurs linguistiques.

IV.4.2.3. Fonction d'appartenance

Les variables linguistiques sont représentées par leurs fonctions d'adhésion. Ainsi, à chaque sous-ensemble flou A_i est associé à une fonction d'appartenance $\mu_{A_i}(x)$ où x est la variable linguistique. De telle sorte que chaque point x soit associé à une valeur précise de $\mu_{A_i}(x)$, qui désigne le degré d'appartenance de x à A_i . La fonction d'appartenance peut être représentée par plusieurs formes : Triangulaire, trapézoïdale, Gaussienne ; D'autres formes de fonctions d'appartenance peuvent être définies, mais dans le paramètre logique flou, les formulaires déjà mentionnés sont largement suffisants pour délimiter les ensembles flous.

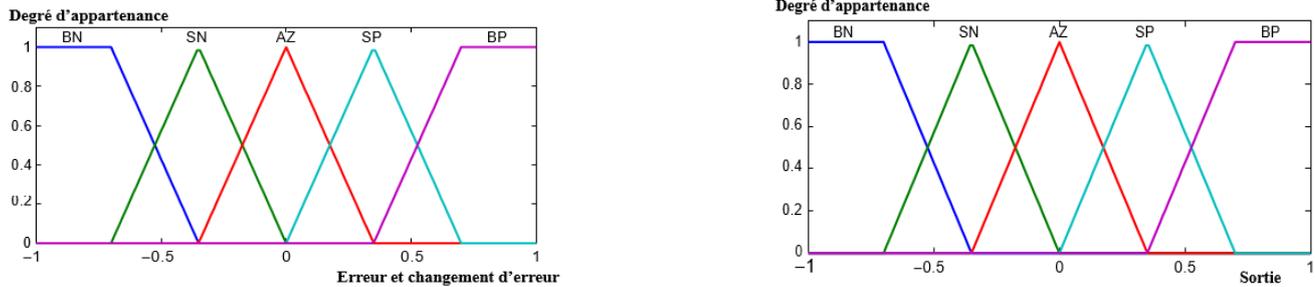


Fig. IV. 40. Fonction d'appartenance des entrées (e) et de la sortie (u).

IV.4.2.4. Opérateurs de la logique floue

La caractérisation des ensembles flous par les fonctions d'appartenance a permis une extension de certaines opérations définies sur les ensembles classiques au cas flou. Soient A et B deux ensembles flous définis dans l'univers de discours X ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance [KOS91].

Les opérateurs habituels de l'addition, de la soustraction, de la division et de la multiplication de deux ensembles flous ou plus existent également. Cependant, les deux opérateurs de l'union et de l'intersection sont les plus couramment utilisés dans le contrôle de la logique floue [MAA].

D'autre part, l'implication floue se construit à partir des propositions floues élémentaires.

Pour cette opération, il existe encore plusieurs méthodes. Les plus souvent utilisées sont données par le tableau suivant.

Tableau. IV. 1. Implication floue.

Appellation	Implication floue
Zadeh	$\text{Max} \{ \min ((\mu_A(x), \mu_B(y)) , 1 - \mu_A(x)) \}$
Mamdani	$\text{Min} (\mu_A(x), \mu_B(y))$
Reichenbach	$1 - (\mu_A(x) + \mu_A(y)) \cdot \mu_B(y)$
Willmott	$\text{Max} \{ 1 - \mu_A(x), \min (\mu_A(x), \mu_B(y)) \}$
Diènes	$\text{Max} (1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$
Brown gold1	$\text{Si } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \mu_B(y) \text{ sinon}$
Lukasiewicz	$\text{Min} (1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Larsen	$(\mu_A(x), \mu_B(y))$

IV.4.3. Réglage et commande par logique floue

Des expériences ont montré que, dans de nombreux cas, les résultats obtenus avec un réglage flou (technique non conventionnelle) sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnels. Ainsi, le contrôle de la logique floue peut être considéré comme un pas vers un contrôle mathématique précis plus proche de la prise de décision humaine.

Le contrôle logique flou est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de contrôle souvent très efficace sans avoir à faire une modélisation approfondie. Contrairement à un contrôleur standard ou à un contrôleur ayant la rétroaction de l'état, le régulateur logique flou (RLF) ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, basées sur des variables linguistiques. En faisant des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte de l'expérience acquise par les opérateurs d'un processus technique [BAG03].

IV.4.4. Structure interne d'un système flou

De manière classique, le fonctionnement interne d'un système flou repose sur la structure présentée par la figure IV.41 qui inclut quatre blocs:

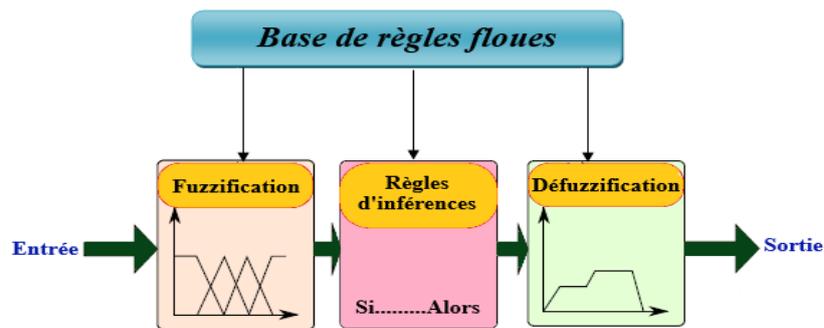


Fig. IV. 41. Structure interne d'un système flou.

- La base de règles ou de connaissances.
- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance.
- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

IV.4.4.1. Interface de fuzzification

L'objectif de la fuzzification est de convertir les variables déterministes d'entrées, qui sont des grandeurs physiques, en variables floues, c'est à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance [MAD07].

Les grandeurs physiques d'entrée E sont réduites à des grandeurs normalisées x dans une plage de variation, souvent $[1, -1]$, appelée univers de discours. Le nombre de valeurs linguistiques représenté par des fonctions d'appartenance pour une variable x peut varier, par exemple trois, cinq ou sept. Le nombre d'ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du paramètre souhaité.

Les sous-ensembles d'appartenance floue ont été notés comme suit :

- NG : Négatif-Grand, - NM : Négatif-Moyen,
- NP : Négatif-Petit, - EZ : Environ-Zéro,
- PP : Positif-Petit, - PM : Positif-Moyen,
- PG : Positif-Grand.

IV.4.4.2. Base de règles d'inférences

La base de règles floue, ou base de connaissances, contient des règles floues décrivant le comportement du système, c'est le cœur de tout le système en ce sens que tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles pour former le système final dont il est composé [BAG03] [KOS91] [MAA].

1. Une base de données fournissant les informations nécessaires aux fonctions de normalisation.
2. La base de règles est un ensemble d'expressions linguistiques structurées autour de connaissances spécialisées et représentées comme des règles Si <condition> Alors <conséquence>.

IV.4.4.3. Interface de Défuzzification

Le rôle de défuzzification est de fournir une action de contrôle physique à partir d'une action de contrôle floue, il ya plusieurs stratégies de défuzzification [MAA], les plus utilisés sont:

- La technique du maximum ;
- La technique de la moyenne pondérée ;
- La technique du centre de gravité ;
- La technique des hauteurs pondérées.

IV.4.5. Application de la logique floue à la commande de la MADA

❖ Structure de base d'un contrôleur flou

Pour les systèmes mono variables simples, les entrées du contrôleur flou sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système).

Dans le système présenté dans cette étude, deux contrôleurs indépendants basés sur la logique floue sont utilisés pour produire les tensions de référence souhaitées pour contrôler la puissance active et réactive dans le stator MADA (P_s, Q_s). Comme le montre la figure IV.42 Dans le contrôleur flou (CF), la valeur de référence $r(t)$ est comparée à la valeur réelle (mesurée) $y(t)$ pour obtenir l'erreur $e(t)$. En outre, cette erreur est comparée à l'erreur précédente $e(t-1)$ pour obtenir la variation d'erreur $\Delta e(t)$.

Les deux entrées du (CF) sont l'erreur de la puissance et sa variation. La sortie du régulateur correspond à la commande. Ces trois grandeurs sont normalisées comme suit:

$$E = G_e e, \quad \Delta E = G_{\Delta e} \Delta e, \quad U = G_u u$$

Ou : $G_e, G_{\Delta e}$ et G_u sont des facteurs d'échelle ou des gains de normalisation associés à $e(t), \Delta e(t), u(t)$ respectivement. Ils permettent de modifier la sensibilité du contrôleur flou sans changer sa structure. Nous varions ces facteurs jusqu'à ce que nous puissions obtenir un contrôle approprié. En effet, ce sont eux qui décideront de la façon dont le contrôle est effectué.

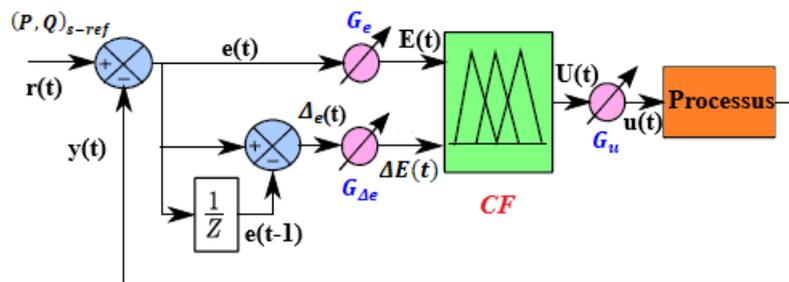


Fig. IV. 42. Schéma synoptique d'un régulateur flou des puissances active et réactive.

Les grandeurs $E(t), \Delta E(t)$ et $U(t)$ indexées sont donc les quantités normalisées à l'entrée et à la sortie des FC. L'erreur et sa variation sont données par l'expression suivante :

$$E(t) = G_e(r(t) - y(t))$$

$$\Delta E(t) = G_{\Delta e}(e(t) - e(t - 1))$$

La figure IV.43 montre le diagramme de bloc où les contrôleurs flous sont intégrés dans le bloc de contrôle vectoriel MADA. Les puissances actives et réactives sont contrôlées indépendamment, chacune avec son propre contrôleur flou.

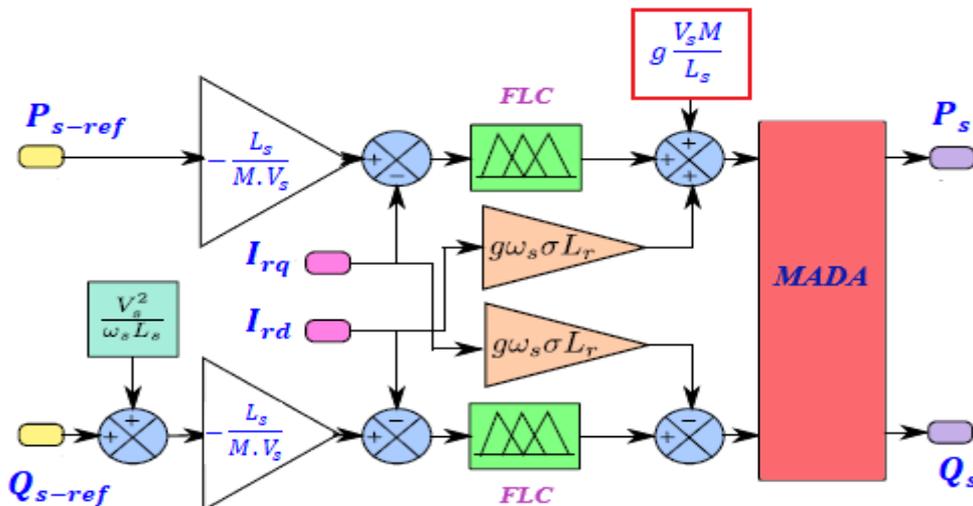


Fig. IV. 43. La commande floue de la MADA.

❖ Fuzzification

Cette étape s'occupe de la transformation des valeurs numériques aux entrées en valeurs floues ou variables linguistiques. Les variables d'entrées qui sont l'erreur de vitesse et sa variation sont soumises à une opération de fuzzification et par conséquent converties à des ensembles flous. L'univers de discours normalisé de chaque variable du régulateur (l'erreur, sa variation et la variation de la commande) est subdivisé en cinq ensembles flous. Ceux-ci sont caractérisés par les désignations standards suivantes :

CHAPITRE IV : LES STRATEGIES DE COMMANDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE CONNECTEE AU RESEAU

- Négatif grand noté **NG** ; - Positif petit noté **PP** ;
- Négatif petit noté **NP** ; - Positif grand noté **PG** ;
- Environ de zéro noté **EZ** ;

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme le montre la figure suivante :

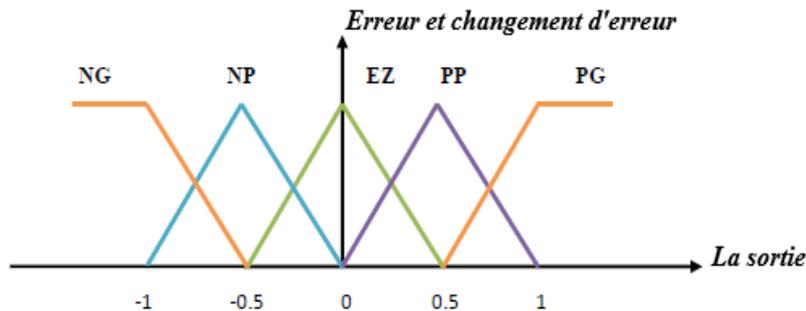


Fig. IV. 44. Fonctions d'appartenance des différentes variables du régulateur flou

❖ Base des règles

La base des règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques [GUE09]. Elle permet de déterminer la décision ou l'action à la sortie du contrôleur flou et exprimer qualitativement la relation qui existe entre les variables d'entrées et la variable de sortie. A partir de l'étude du comportement du système, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède cinq ensembles flous, ce qui donne un ensemble de vingt-cinq règles. Celles-ci peuvent être représentées par la matrice d'inférence suivante :

Par la matrice d'inférence, il rassemble toutes les règles d'inférence sous forme de table. Dans le cas d'une table bidimensionnelle, les entrées du tableau (IV.2) représentent les ensembles flous de variables d'entrée (e et Δu). L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie (Δe).

Tableau. IV. 2. Matrice d'inférence des règles floues.

		e				
		NG	NM	EZ	PM	PG
Δe	NG	NG	NG	NM	NM	EZ
	NM	NG	NM	NM	EZ	PM
	EZ	NM	NM	EZ	PM	PM
	PM	NM	EZ	PM	PM	PG
	PG	EZ	PM	PM	PG	PG

La logique de détermination de cette matrice des règles est basée sur une connaissance globale ou qualitative du fonctionnement du système. A titre d'exemple, prenons les deux règles suivantes :

Si e est PG et Δe est PG alors Δu est PG

Si e est EZ et Δe est EZ alors Δu est EZ

Elles indiquent que si la vitesse est trop petite par rapport à sa référence (e est PG et Δe est PG), alors il faut un appel de couple grand (Δu est PG) pour ramener la vitesse à sa référence. Et si la vitesse atteint sa référence et s'établit (e est EZ et Δe est EZ) alors grader le même couple (Δu est EZ).

Comme on a mentionné précédemment, plusieurs méthodes d'inférence ont été élaborées pour réaliser les opérateurs flous. Dans notre travail, on a adopté la Méthode d'inférence "Somme-produit". Dans cette méthode l'opérateur "Et" est représenté par la fonction Produit, l'opérateur "Ou" par la fonction Somme ou Moyenne et pour la conclusion, l'opérateur "Alors" est représenté par la fonction Produit.

❖ Interface de Défuzzification

Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail. L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivante :

Si on suppose que les entrées du régulateur sont (X_1, X_2) et X_r sa sortie est , l'action de chaque règle est donnée par :

$$\mu_{Ri}X_r = \mu(X_1)\mu(X_2)\mu_{oi}(X_r)$$

$$\mu_{Ri}X_r = \mu_{ci}(X_r)\mu_{oi}(X_r)$$

Où :
 $\mu(X_1)\mu(X_2)$ sont les facteurs d'appartenance des deux variables linguistiques X_1, X_2 et par rapport à la condition de la règle R_i .

μ_{ci} Est le facteur d'appartenance de la condition.

$\mu_{oi}(X_r)$ Est la fonction d'appartenance de la décision correspondante à la $i^{ème}$ règle R_i .

La fonction d'appartenance résultante est donnée par:

$$\mu_{res}(X_r) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\mu_{Ri}(X_r))$$

m : Est le nombre des règles intervenant dans l'inférence.

Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail. L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivante :

$$X_{GR} = \frac{\int X_r \cdot \mu_{res}(X_r) \Delta X_r}{\int \mu_{res}(X_r) \Delta X_r}$$

Cette expression prend la forme discrète suivante dans le cas de la méthode d'inférence Somme-Produit :

$$\Delta_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^{25} \mu_{ci} X_{Gi} S_i}{\sum_{i=1}^{25} \mu_{ci} S_i}$$

IV.4.6. Résultats de simulation de la MADA cas en utilisant la commande par logique floue

❖ *La vitesse mécanique :*

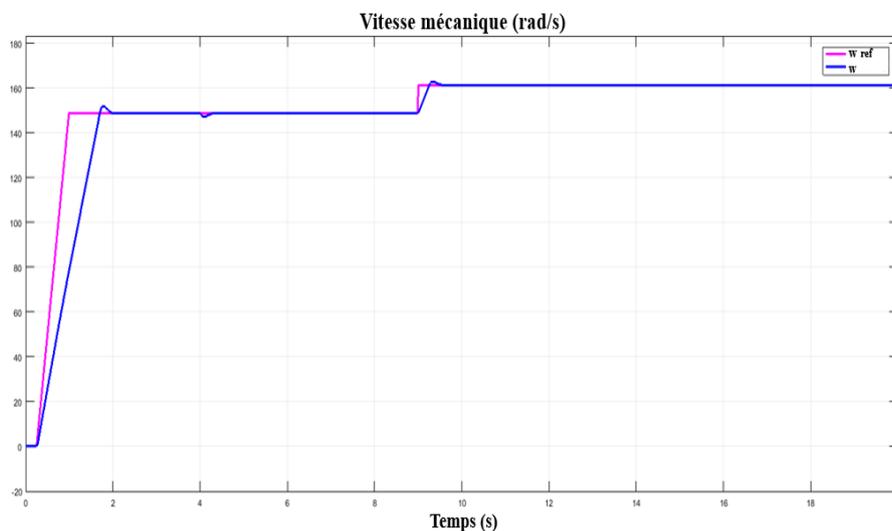


Fig. IV. 44. La vitesse mécanique.

❖ *Le couple électromécanique :*

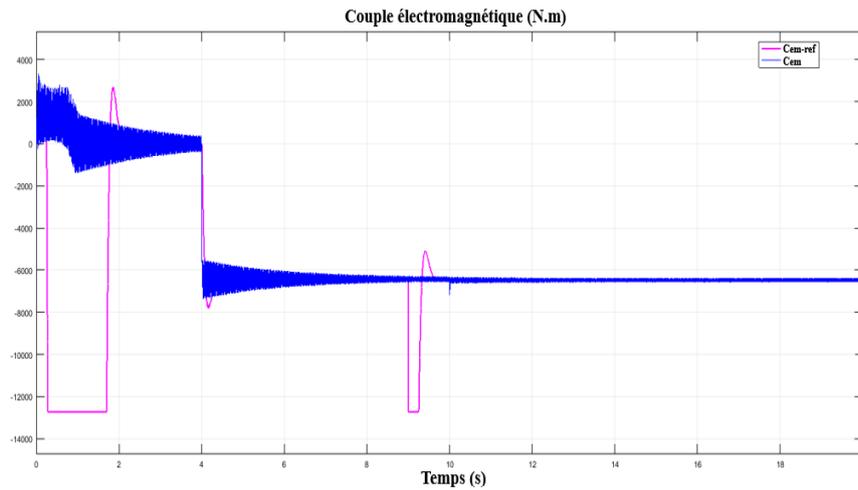


Fig. IV. 45. Le couple électromagnétique.

❖ La puissance active statorique :

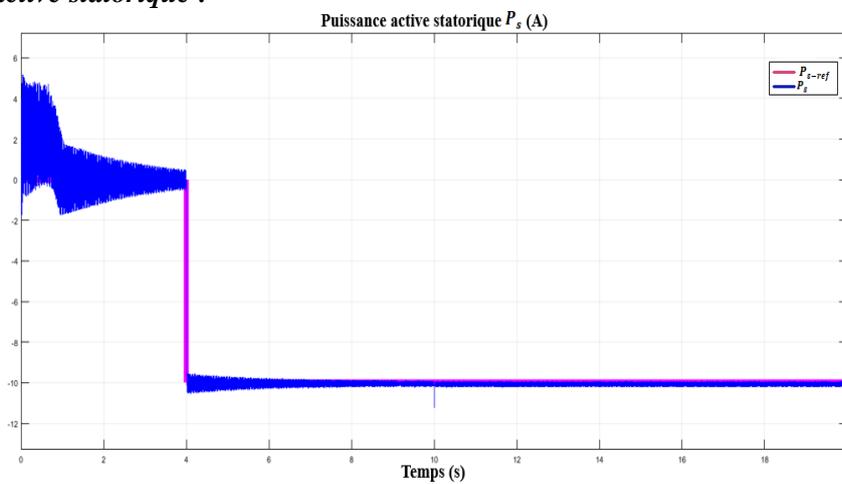


Fig. IV. 46. Puissance active statorique.

❖ Puissance réactive statorique :

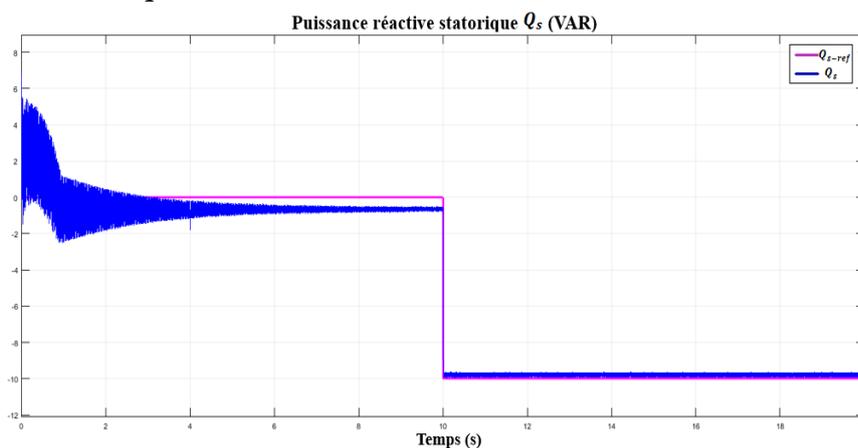


Fig. IV. 47. Puissance réactive statorique.

Les résultats de simulation des figures (IV.44, IV.45, IV.46, IV.47 et IV.48) montrent que de la commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation permet l'amélioration des performances du système.

D'une manière générale, les résultats présentés sur les figures (IV.46 et IV.47) montrent que les performances de poursuite des puissances statorique sont satisfaisantes et le temps du rejet de perturbation est acceptable.

La puissance active statorique suit donc sa référence pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans des conditions d'optimisation.

Notons que les oscillations de la puissance réactive en régime statique viennent de la variation continue de la puissance active, cette dernière qui change avec la vitesse du vent et selon la fonction (MPPT).

D'après les résultats de simulation, on constate une amélioration des performances de la machine asynchrone à double alimentation qui améliore à leur tour l'efficacité de tout le système de la conversion éolienne.

IV.5. L'intégration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique

L'énergie éolienne est l'une des productions décentralisées dont le pouvoir de l'intégrer dans le réseau électrique. Cette intégration doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des installations dans le réseau pour assurer un bon fonctionnement.

IV.5.1. Rappel sur la production de l'énergie électrique

La centrale de production est la composante principale du système électrique. Une centrale électrique peut regrouper plusieurs groupes de production sur le même site. Il est destiné à produire de l'électricité via les alternateurs. La moyenne tension de production est portée à une valeur comprise entre 63 et 400 KV au moyen de transformateurs situés dans un poste de départ à proximité immédiate de l'usine pour un transport économique de l'énergie.

IV.5.2. Le réseau électrique

Le réseau électrique peut être défini comme l'infrastructure qui relie la production d'électricité aux utilisations finales. En créant cette interface, le réseau fournit non seulement un lien physique permettant la circulation des flux d'énergie, mais aussi la fourniture de services à la communauté qu'il irrigue:

- Il permet de tirer pleinement parti de la prolifération des usages;
- Il permet des économies d'échelle et l'optimisation des outils de production ;
- Il accroît la salubrité des aliments par la redondance et la mise en commun des ressources.

En comparant l'offre et la demande, il joue nécessairement un rôle majeur dans la réalisation et le suivi de l'équilibre, étant la structure clé des « systèmes d'énergie » », c'est-à-dire la production interconnectée - transmission/distribution - unités de consommation. Ce sont d'énormes machines distribuées, couvrant parfois des zones à l'échelle des continents. Ils sont régis par des lois physiques qui rendent leur gestion complexe et délicate, car leur bon fonctionnement est basé sur des équilibres à chaque instant qui ne peuvent jamais être pris pour acquis et sur le respect d'innombrables contraintes techniques qui évoluent au fil du temps.

Le concept très général de réseau électrique cache en fait plusieurs segmentations :

Le réseau est à la fois un système et un ensemble d'éléments physiques. Il est en effet composé de multiples équipements électrotechniques (lignes, câbles, transformateurs, appareils de coupure, control-commande) associés de manière coordonnée et c'est cette association qui constitue le réseau. Il doit également être analysé en sa fonction système, qui consiste à assurer une comparaison intelligente de la production avec des caractéristiques techniques précises (performances électriques et mécaniques, nature contrôlable ou « fatale », etc.), un lieu et des utilisations donnés qui ont eux-mêmes leurs propres caractéristiques (performance, période d'utilisation, exigences de qualité de puissance);

Un autre regard est celui des grandes finalités du réseau : réseau de grand transport, construit aujourd'hui à la maille européenne, réseau de répartition, irrigant les régions, réseaux de distribution, constituant la boucle locale énergétique, réseau intérieur desservant les différentes applications au sein d'une même installation privée. Chacun de ces types de réseau a sa finalité, sa logique économique, ses acteurs ;

Cela conduit à la segmentation entre le réseau public, le réseau exploité par les opérateurs de réseau, dans une logique de « naturel », le monopole géographique réglementé, et le réseau privé, le réseau détenu par les clients et exploité sous leur responsabilité, pour connecter le point de livraison et les utilisations finales, un point de livraison qui visualise la frontière entre les réseaux publics et privés. Nous retrouverons ces différentes segmentations dans le découpage des traités, qui montreront à la fois les spécificités de chaque segment mais aussi les points communs à tous les types de réseau.

Les réseaux sont en effet dans tous les cas :

- Une industrie à forte intensité de capital, basée sur l'équipement à long terme;
- Le soutien de services considérés comme des nécessités de base, condition préalable à la disponibilité de nombreux autres services (transport ferroviaire, télécommunications pour n'en nommer que deux);
- Une industrie longtemps considérée comme mature, qui évolue lentement en termes de services offerts (par rapport au monde des télécoms par exemple), mais qui connaît aujourd'hui un nouveau dynamisme en raison de nouveaux défis énergétiques (production massive basée sur l'énergie éolienne et solaire par exemple) ainsi que de nouveaux usages (véhicules électriques...) et d'innovations technologiques de l'informatique et des télécommunications ou de l'électronique de puissance. Ce développement est souvent appelé « réseaux intelligents », une traduction plus ou moins réussie de « smart grids ».

L'entrée en service des réseaux conduira à un examen des missions essentielles des opérateurs de réseau :

- Concevoir et développer le réseau ;
- Exploiter et conduire le réseau ;
- Entretenir le réseau ;
- Compter les flux énergétiques ;

- Développer des mécanismes de marché en support de nouveaux services.

Bien que le concept du réseau ait peu changé, l'organisation globale du système a subi de profonds changements au cours des dernières décennies.

Le développement très rapide de la consommation d'électricité après la guerre a conduit à un système de production centralisé, avec des centrales de plus en plus grandes situées à proximité des ressources énergétiques et des installations de refroidissement nécessaires. Cela a permis de promouvoir un très grand système d'interconnexion associé à un système de distribution transportant l'énergie d'amont à aval.

Aujourd'hui, le développement des énergies décentralisées et renouvelables fait que le réseau de distribution est à la fois collecteur de production et distributeur d'énergie vers les clients, au point que certains évoquent un concept de système énergétique local, concept qui reste cependant encore très virtuel en termes de modèle économique.

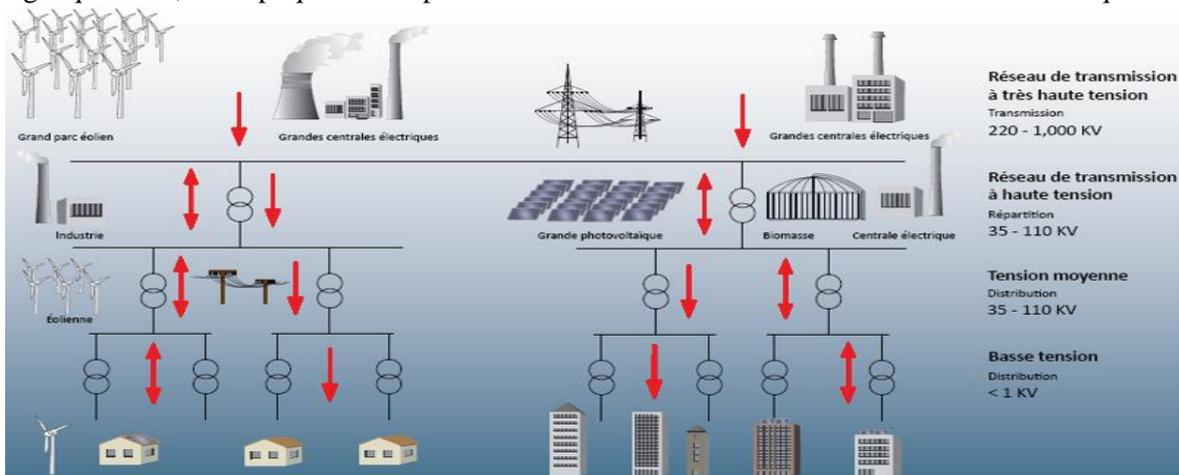


Fig. IV. 48. Schéma d'un réseau électrique incorporant de l'énergie renouvelable.

IV.5.3. Le réseau de transport

Situé en amont des réseaux de distribution, il se compose de deux sous-assemblages :

- ✦ Le réseau de grands transports et d'interconnexion: Il est destiné à transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances. Il constitue la structure principale de l'interconnexion des grands centres de production.
- ✦ Les réseaux de distribution régionaux ou locaux : Ils sont destinés à distribuer l'énergie en plus petites quantités sur des distances plus courtes. La transmission est assurée en haute tension (HV) et moyenne tension (MV).

L'énergie électrique est exportée par des lignes électriques ou des lignes de transmission d'un endroit à l'autre. Il existe 2 principaux types de lignes :

- ✦ Les lignes aériennes : assurent la majeure partie du transport longue distances.
- ✦ Les lignes souterraines : souvent utilisés pour le transport de l'électricité à travers des zones peuplées.

IV.5.4. Fermes éoliennes

Le regroupement d'un ensemble d'éoliennes à vitesse variable ou à vitesse fixe constitue un parc éolien terrestre ou offshore. Deux architectures pour relier les éoliennes au réseau électrique peuvent être distinguées. Le premier consiste à les connecter au réseau au moyen des liaisons de tension alternative à travers un transformateur.

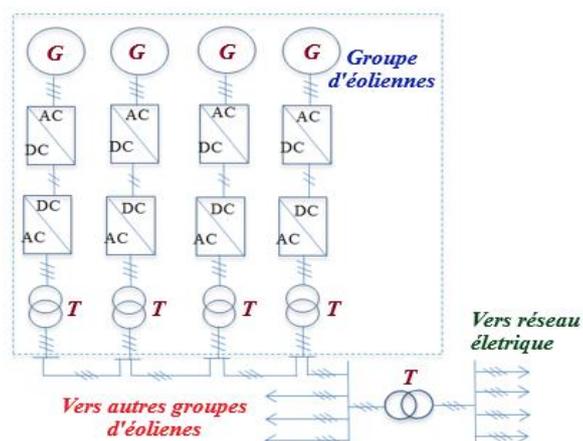


Fig. IV. 49. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives

[Rob 06].

La deuxième architecture est basée sur la connexion des éoliennes les unes aux autres via une liaison de tension DC dont le bus DC est dimensionné pour la tension nominale du générateur. Ensuite, un seul convertisseur DC-AC est utilisé pour connecter toutes les éoliennes au réseau électrique. Cette architecture, qui convient particulièrement aux parcs éoliens off-shore, permet une meilleure participation du parc éolien à la régulation de la tension au point de raccordement [Mul 04] [Rob 06].

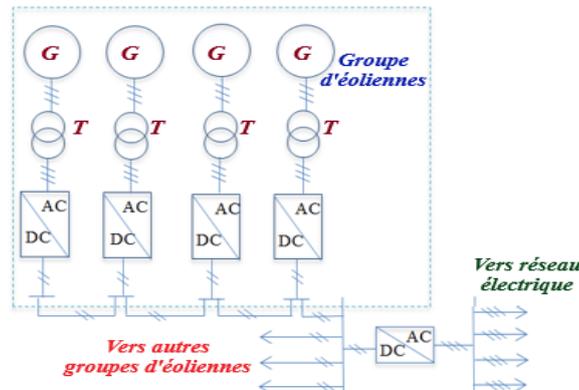


Fig. IV. 50. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [Rob06].

IV.5.4.1. Gestion du réseau électrique

Afin de fonctionner correctement et de produire de l'énergie électrique, la plupart des éoliennes ont besoin d'un réseau puissant qui dicte la fréquence et la tension. En outre, il doit également être en mesure de fournir la puissance réactive requise par les générateurs asynchrones, par exemple, et être en mesure d'absorber toute l'énergie produite par l'éolienne en tout temps [GHE11]. Tout cela est très complexe à gérer parce que l'énergie produite par les éoliennes est très fluctuante en raison des aléas du vent [GAI10]. Une éolienne de 1 MW ne peut pas produire de façon permanente cette puissance nominale; nous ne pouvons compter que sur 20 à 30% de cette puissance en moyenne. C'est pourquoi il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites afin d'avoir une production qui peut se stabiliser.

D'autre part, en raison de leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, les éoliennes peuvent fournir des services système. La puissance de sortie peut être ajustée en changeant le pas des pales de l'hélice. Si, pendant une période de vent fort, il y a un excès d'énergie électrique dans le réseau, ce qui peut conduire à une déstabilisation des fréquences, il est possible de limiter l'énergie produite par les éoliennes. Cela se fait en agissant sur le contrôle de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de réduire l'efficacité de l'hélice. Cette ligne de recherche est actuellement bien étudiée et de nombreux laboratoires contribuent à des solutions innovantes et efficaces. [GAI10], [CAM03]

De plus, en intervenant sur le contrôle des onduleurs associés au générateur, la valeur de l'énergie réactive produite par un parc éolien peut être modifiée. Ainsi, selon la chaîne de conversion choisie, il est possible d'absorber ou de fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau. L'opérateur du réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à corriger le facteur de puissance du réseau. Cette option est maintenant incorporée dans la plupart des éoliennes utilisant des machines asynchrones à double alimentation. Toutefois, s'il y a une période sans vent où rien ne peut être fait et que l'exploitant du réseau ne peut pas compter sur les éoliennes comme source fiable de production.

Cependant, nous pouvons prédire les conditions du vent et donc la production d'électricité quelques jours à l'avance. Il s'agit encore de prévisions météorologiques et ne change rien lorsque le vent tombe. Pour avoir une plus grande flexibilité d'utilisation et une meilleure efficacité du système, il devrait être possible de stocker l'énergie pendant les périodes de vent fort afin qu'elle puisse être restaurée lorsque le vent ne souffle plus. Les éoliennes doivent ensuite être combinées à d'autres sources de production telles que les générateurs diesel dans le cas de la production autonome du réseau. [BEL11], [BOY06], [MOU14], [GAI10].

IV.5.4.2. Raccordement des éoliennes aux réseaux électriques

L'énergie électrique produite par l'éolienne est transportée aux consommateurs par des réseaux électriques. Typiquement, pour les machines de plus de 100 kW, la tension produite à la sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est donc souvent nécessaire d'avoir un transformateur d'alimentation à tension sur le site de production pour se connecter aux réseaux à moyenne tension pour les petits parcs éoliens, ou aux réseaux d'interconnexion pour les grands parcs éoliens (p. ex. parcs éoliens offshore), où l'énergie éolienne est distribuée de manière plus uniforme [GRI08]. Toutefois, la connexion aux réseaux doit tenir compte des conditions de couplage, qui peuvent être résumées comme suit :

- L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces ;
- L'égalité de fréquences ;
- Un déphasage nul entre elles;

- En triphasé, même succession des phases.

L'éolienne connectée, ainsi que tous les appareils connectés au réseau, a un impact plus ou moins important sur la qualité de l'énergie. De plus, les parcs éoliens sont situés dans une zone où les vents sont favorables et où le réseau est mal développé. Néanmoins, les parcs éoliens doivent être reliés de plusieurs façons. Par exemple :

- Parc éolien connecté à la ligne moyenne tension (HTA) existante qui répond aux demandes environnantes (puissance transmissible - de 2 à 5 MW).
- Si la ligne HTA est trop faible pour le parc éolien, elle peut être connectée au jeu de barres HTA de la sous-station HTB / HTA la plus proche par sa propre ligne (puissance transmissible de 10 à 40 MW).
- Parc éolien connecté au jeu de barres HTB dans la sous-station HTB / HTA la plus proche par une ligne propre avec son propre transformateur HTB / HTA (puissance transmissible - jusqu'à 100 MW).

Quelle que soit la méthode de raccordement, l'éolienne introduit plus ou moins de variations de puissance dans le réseau. Généralement, la solution la plus courante est la connexion à moyenne tension (HTA), qui génère la plupart des interférences.

Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui leur permet d'être couplées au réseau de transport public. En outre, les installations doivent être conçues pour assurer un fonctionnement stable, en tenant compte des caractéristiques de leur connexion au réseau, et doivent être équipées des contrôles de tension et de fréquence (c'est-à-dire de vitesse pour les unités de production tournantes) nécessaires pour atteindre cet objectif. Les pertes de stabilité ne doivent pas entraîner une détérioration de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou une perturbation des conditions saines de l'exploitation du réseau public de transport.

Les installations de production doivent être en mesure de recevoir et d'exécuter les ordres de contrôle et de sauvegarde de l'exploitant du réseau de transport dans les délais appropriés spécifiés dans l'accord d'exploitation.

Pour les installations d'une puissance supérieure à 10 MW, chaque générateur électrique doit être en mesure de fournir à ses terminaux une puissance réactive minimale égale à 0,6 de sa puissance nominale apparente et d'absorber une puissance réactive égale à 0,2 de la même puissance pour réguler la tension au point de connexion de ces systèmes d'énergie éolienne.

IV.5.4.3. Types de raccordement

L'énergie éolienne est comme toute production décentralisée a deux types de raccordement dans le réseau électrique:

a) Raccordement en départ mixte :

Le raccordement à un départ existant auquel des consommateurs et éventuellement des producteurs sont déjà raccordés.

b) Raccordement en départ direct :

Connexion à la station source la plus proche via un départ nouvellement créé pour le nouvel utilisateur.

IV.5.4.4. Les systèmes de stockage de l'énergie éolienne

Afin de permettre aux unités de production basées sur des sources aléatoires (éoliennes, photovoltaïques) de participer pleinement aux services du système, elles devront être combinées avec des systèmes de stockage d'énergie électrique. Cependant, l'électricité n'est pas facilement stockée et doit être transformée en une autre forme énergétique (chimique, mécanique, thermique, magnétique, etc.). Le stockage de l'énergie électrique est l'un des éléments d'un futur développement durable [BEL11], [BOY06], [COU08], [GAI10].

Comme la source primaire (dans notre cas le vent) est aléatoire dans le temps, un certain nombre d'études ont été menées pour étudier ou développer des systèmes pour stocker l'énergie produite par le vent et non pas utilisé directement pendant les périodes de production afin de restaurer autant de celui-ci que possible pendant les périodes calmes. [BOY06].

L'utilisation d'un système de stockage améliorerait considérablement les capacités d'intégration des éoliennes dans le réseau. Un système qui permettrait de stocker une grande quantité d'énergie tout en ayant une dynamique de réponse rapide qui permettrait de lisser toutes les variations de puissance instantanées et ainsi améliorer la qualité de l'énergie produite par les éoliennes.

Le stockage se fait le plus souvent dans une forme globale de stockage est donc très variable en fonction des processus choisis. Deux types de stockage semblaient donc intéressants d'être envisagés : d'une part, le stockage à court terme pour faire face aux rafales de vent et aux turbulences, et d'autre part, le stockage à long terme qui permettrait de restaurer l'énergie lorsqu'il n'y a plus de vent [BEL11], [BOU15], [BOY06], [MOU14].

a) Stockage à court terme

La puissance est fournie par l'électronique de puissance, permettant une puissance plus élevée et encore plus de stockage d'énergie. Il est maintenant possible de stocker et de restaurer une puissance de plusieurs dizaines de kW pendant plus de dix minutes. Ces systèmes peuvent donc lisser la puissance fluctuante du vent [AKA04].

Les super-condensateurs sont également d'un grand intérêt pour lisser les fluctuations de puissance en raison de leur dynamique plus rapide que les batteries.

b) Stockage à long terme

En termes de systèmes de stockage à long terme, les systèmes d'air comprimé utilisent différents procédés pour stocker et libérer de l'énergie avec ou sans utiliser l'énergie de chauffage fournie par compression. En outre, un compresseur est utilisé pour le stockage, et une turbine et un générateur sont utilisés pour le déstockage [BOY06].

Cependant, l'air comprimé et les systèmes d'électrolyse permettent d'obtenir de grandes capacités à moindre coût parce que le stockage se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie à stocker. Quoiqu'il en soit, un système de stockage associé à l'éolienne ne devrait pas être exclu en raison de sa faible efficacité globale, car les pertes dans les systèmes de conversion peuvent ne pas être aussi pénalisantes dans l'ensemble si cela nous permet de maintenir une production constante en tout temps [MIR05].

Les batteries ont évolué au cours de la dernière décennie et offrent maintenant un volume très élevé et des capacités de masse, en particulier avec les dernières générations de batteries de type polymère au lithium. Ils permettent également le fonctionnement cyclique sans grand stress avec des chargeurs qui optimisent leur vie [DEL10].

Nous pouvons voir que tous ces appareils peuvent être facilement connectés aux éoliennes au niveau des autobus à courant continu, comme le montre la figure IV.52.

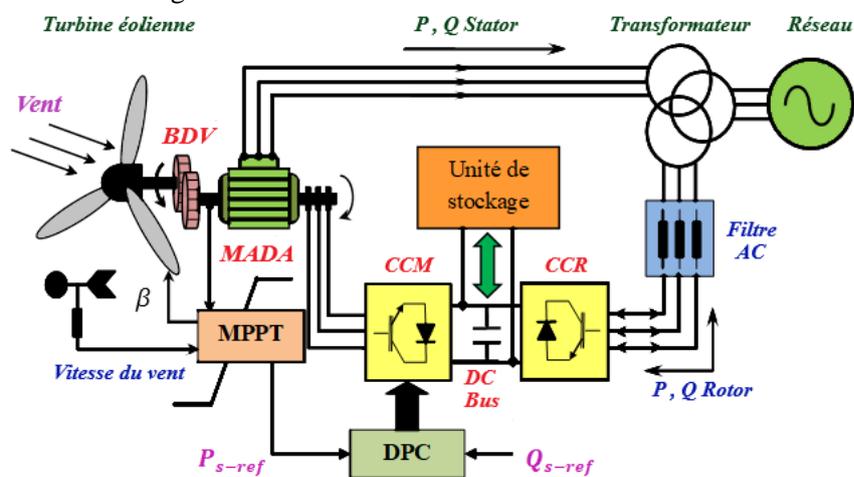


Fig. IV. 51. Intégration d'un système de stockage.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation. Dans la première partie, nous avons expliqué le principe de la modélisation de la commande vectorielle par l'orientation du flux statorique qui permet de traiter la machine asynchrone à double alimentation de la même manière que celle de la machine à courant continu. On peut à priori conclure que les performances offertes par la MADA commandée vectoriellement ne seront d'autant meilleures que lorsqu'un réglage précis des différents régulateurs est bien mené et cela ne peut se concevoir qu'avec la connaissance exacte des paramètres de la machine.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté la structure de l'onduleur et de redresseur à deux niveaux et leur modélisation en vue de la commande. Nous avons ensuite étudié la stratégie de commande à savoir la commande MLI (sinus-triangulaire). Les résultats de simulation numérique montrent la nécessité de régler la vitesse du rotor indépendamment de la charge appliquée.

La troisième partie, a été consacré à la commande de la MADA par la logique floue. Nous avons exposé les concepts de base de la logique floue, puis nous avons introduit le concept d'un observateur flou pour l'estimation de la vitesse du vent de la turbine éolienne. Le système est implémenté sous MATLAB-Simulink dont, les résultats obtenus ont montré les performances de cet observateur. Nous concluons que le réglage par logique floue est plus robuste que les régulateurs PI.

A la fin de ce chapitre l'intégration d'une ferme éolienne couplée à une machine asynchrone à double alimentation dans le réseau électrique a été étudiée.

IV.7. Références bibliographiques

- [AKA04] H. Akagi, «Active filters and energy storage systems for power conditioning in Japan »; Proceeding of first international conference on power electronics systems and applications, pp.79-88, November 2004.
- [BAG03] L.Baghli, "contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de logique floue, réseaux de neurones et les algorithmes génétiques", Thèse Doctorat NANCY ,2003.
- [BEL11] B. Beltran, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur »; Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Juin 2011.
- [BEN12] BENNOUR CHERIF « simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » magister, université mohamed khider – biskra, 19/11/2012.
- [BLA71] F. Blaschke, « A new method for the structural decoupling of A.C. induction machines »; In Conf. Rec. IFAC, Dussesrdorf, Germany, Oct.1971.
- [BOY06] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [BOU15] Z. Boudjema, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) »; Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Février 2015.
- [CAM03] H. Camblong, « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable »; Thèse de Doctorat, ENSAM, Bordeaux, France, Décembre 2003.
- [CAPO] G. A. Capolino et Y. Y. Fu, "Commande des Machines Asynchrones par Flux Orienté : Principe, Méthodes et Simulation" SEE, Journéed 'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.
- [CAR95] J.P. Caron J.P. Hautier. Electrotechnique Modélisation et commande de la machine asynchrone. Presses Universitaires de Strasbourg, 1995.
- [CAR00] J. P. Caron et G. P. Hautier, "Systèmes Electrotechniques : Applications Industrielles, Problèmes et Solutions", Edition Technip, Paris, France, 2000.
- [CHE98] F.Chevrie et F.Guely, "cahier technique n=° 191 : la logique floue", groupe Schneider, 1998.
- [COU08] V. Courtecuisse, « supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique »; Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, Novembre 2008.
- [DEL10] G. Delille, « Contribution du stockage à la gestion avancée des systèmes électriques, approches organisationnelles et technico-économiques dans les réseaux de distribution »; Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, soutenue à Lille, France, Novembre 2010.
- [DJE 07] Dr. Hind DJEGHLOUD « Filtrage actif de puissance » ; Thèse de doctorat Université de Constantine ; 2007.
- [DJE09] Y. Djeriri : Commande Vectorielle d'une MADA Intégrée à un Système Eolien, Mémoire de Magister, Université de Sidi Bel-Abbes, Alger, 2009.
- [DRI05] S. Drid, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d 'Alimentation : Théorie et Expérimentation", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [GAI10] 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 de Henri Poincaré, Nancy I, France, Avril 2010.
- [GHE11] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [GRI08].I.GRICHE."Etude de la Stabilité Transitoire des Systèmes Electriques en Présence des Fermes Eoliennes, «Mémoire de magister, Université de Setif, 2008.
- Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Septembre 2011.
- [GUE09] Ouahib GUENOUNOU, « Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé » thèse de doctorat, 22 avril 2009.
- [Kim97] Kim et Par, A new approach to fuzzy modeling. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 5(3), 328–337.
- [KOS91] B. Kosko, "Neural Network and Fuzzy Systems: A Dynamical System Approach to Machine Intelligence", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N J., 1991.
- [LEC04] L. LECLERCQ, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes »; Thèse de Doctorale Université de Lille, France, Décembre 2004.
- [MAA] O.Maamri, I.Khalil "Développement d'une commande vectorielle DTC d'une machine Asynchrone par la logique floue" Mémoire De fin.
- [MAD07] Mohamed Chafaa MADAOU, « Commande floue et neuro-floue d'un convertisseur direct AC/AC monophasé à structure minimale. Application à l'alimentation d'une machine asynchrone monophasée » Mémoire de Magister. 28.02.2007.
- [MEC08] A. Mechernene, "Commande Neuro-Floue Adaptative pour la Régulation de Vitesse d'un Moteur Asynchrone", Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique d'Oran, Algérie, 2008.
- [MIC07] F. Michel, "Application de la Logique Floue dans la Commande des Machines Synchrones à Aimants Permanents", Thèse Présentée en vue de l'Obtention de la Maîtrise en Sciences Appliquées, Faculté d'Ingénierie, Université de Moncton, Canada, 2007.
- [MIR05] 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, France, Avril 2005.
- [Moh 13] M Chikouche, « Commande robuste d'une machine asynchrone à double alimentation sans capteur mécanique », thèse de doctorat, université deSIDI-BEL-ABBES, 2013.

CHAPITRE IV : LES STRATEGIES DE COMMANDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE CONNECTEE AU RESEAU

- [MOU14]** A. Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.
- [Mul 04]** B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », *Techniques de l'ingénieur*, D3960, 2004.
- [NOU 01]** S. NOUI, « Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à 3 niveaux », Mémoire de magister. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2001. Toulouse-III, 2009.
- [PER03]** S. Peresada, A. Tilli and A. Tonielli, " Indirect Stator Flux-Oriented Output Feedback Control of a Doubly Fed Induction Machine " , IEEE Transactions on Control Systems and Technology, Vol. 11, No. 6, pp. 875-888, November 2003.
- [PIE92]** M. Pietrzak-David et B. Fornel, " Comparaison et Synthèse des Procédés de Commande Vectorielle" , SEE, Journées 'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.
- [POI03]** F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »; Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Polytechnique de Nantes, France, Décembre 2003.
- [Rob 06]** B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ", *Revue J3Ea*, vol. 5, Hors-Série 1, EDP Science, 2006.
- [SAE01]** J.R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, I. Albizu, F. Pôrez-Hidalgo, YI. Irizar, Reactive Power Regulation in wind Farms: Control Strategies, Graz, EPE 2001.
- [Seg 95]** G. Segquier, F. Labrique, R. Baussier, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », Volume 4, Technique et documentation, Lavoisier, Paris, 1995.
- [Wan96]** Wan et Lang, 96, Complex systems modeling via fuzzy logic. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics 26(1), 100–106.
- [ZID06]** F. Zidani, R. Nait-Said, "Introduction à la Logique Floue / Conception d'un Contrôleur Flou", Cours de Magister, Université de Batna, Algérie, 2005/2006.

CONCLUSION GENERALE

Le marché des énergies renouvelables s'est considérablement développé ces dernières années. La consommation intensive d'énergie électrique, l'augmentation du prix des hydrocarbures et le souci de préserver l'environnement ont conduit plusieurs pays à lancer des programmes nationaux et internationaux visant à produire de l'énergie électrique à partir de ressources renouvelables. Ce changement s'est accompagné de la libéralisation du marché de l'électricité et de la multiplication de la production renouvelable, en particulier de l'énergie éolienne. Ce dernier est caractérisé par son caractère aléatoire et intermittent, qui est souvent la cause de graves problèmes liés à la stabilité du réseau électrique.

L'objectif des travaux présentés dans cette thèse est la mise en œuvre d'une chaîne de production d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation afin d'améliorer l'efficacité et la qualité de l'énergie fournie au réseau électrique par des différentes stratégies de contrôle. L'étude du système de contrôle a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK/Sim Power System.

Pour atteindre ces objectifs, le premier chapitre de ce travail a été consacré à la mise en place d'un état de l'art sur l'énergie éolienne. Nous avons présenté l'histoire de l'énergie éolienne, le développement de cette énergie en Algérie et son classement mondial. Nous avons rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents types d'éoliennes avec les différentes machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation a le meilleur avantage en termes de production de haute puissance, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant la dimension des convertisseurs statiques.

Dans le deuxième chapitre, la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique a été expliquée ainsi que les modèles analytiques d'un aérogénérateur, sa modélisation, la simulation et les différentes stratégies de régulation et de commande ont été expliquées. Une explication des zones de fonctionnement et des différentes stratégies de contrôle de la puissance ont été faites permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent. À la fin de ce chapitre, nous avons simulé le comportement de l'éolienne et les résultats montrent l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur l'énergie électrique produite.

Le troisième chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation. En premier temps des généralités sur la MADA, ses différents constituants, son principe et ses différents modes de fonctionnement, ainsi que ses divers domaines d'application ont été étudiés. En plus, la classification et la comparaison des différentes variantes de la MADA ont été présentées. Ensuite la modélisation complète de la MADA. Enfin la simulation du fonctionnement de la machine a été présentée. La simulation de la machine asynchrone doublement alimentée a permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple et de la vitesse pour différentes valeurs de fréquence et de tension rotorique.

Pour améliorer l'efficacité et les performances du système et afin de mieux commander la vitesse de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation, dans le chapitre quatre on a appliqué des différentes techniques de commande de la machine asynchrone à double alimentation. D'abord, la commande vectorielle a été étudiée. Elle permet de découpler le modèle de la MADA et de contrôler séparément l'échange des puissances active et réactive entre la MADA et le réseau. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée. Dans la deuxième partie on a étudié la stratégie de régulation en MLI par un onduleur à deux niveaux et on a proposé aussi l'asservissement d'un redresseur MLI à deux niveaux comme dispositif pour générer la source de tension. Après, l'approche de la commande par la logique floue a été présentée et appliquée avec succès à la conception d'un régulateur de vitesse de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté. En effet, cette technique grâce à sa facilité d'implantation et sa capacité de traiter l'imprécis, nous a permis aussi d'obtenir de bonnes performances de la commande de vitesse en assurant la poursuite de la consigne optimale. Plusieurs simulations sont effectuées sous Matlab/Simulink de chaque commande, afin d'analyser leurs performances. Nous concluons que le réglage par logique floue est plus robuste que les autres types de commande. A la fin de ce chapitre l'intégration d'un parc éolien connecté à une machine asynchrone à double alimentation dans le réseau électrique a été étudiée.

L'ensemble de ces travaux nécessitent une validation sur une plate-forme expérimentale afin de confirmer les résultats de simulation des différentes méthodes de commande appliquées au système de conversion d'énergie éolienne à base sur la MADA, avec ou sans unité de stockage.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes qui pourraient contribuer à l'amélioration du fonctionnement du système éolien sont possibles :

- Etablissement d'un modèle complet de la MADA tenant en compte la résistance statorique ;
- Etablissement d'un modèle de la MADA plus réaliste prenant en compte la saturation magnétique ;
- Etude des perturbations inhérentes au couplage du système éolien avec le réseau électrique ;
- Pour la présente étude, la MADA était contrôlée de manière à ce que son coefficient de puissance soit unitaire. Il serait utile d'évaluer le fonctionnement de la MADA lorsqu'il est impliqué dans la surveillance de la tension du réseau en l'absence ou la présence de défauts ;
- L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau ;
- L'implémentation expérimentale des différents algorithmes de commande de la MADA ;
- Enfin, l'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis les déséquilibres du réseau électrique.

ملخص:

تتناول هذه الأطروحة دراسة نظام طاقة الرياح القائم على آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية. الهدف من العمل المقدم هو تنفيذ سلسلة توليد طاقة الرياح على أساس آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية من أجل تحسين كفاءة الطاقة الموردة إلى الشبكة الكهربائية. بعد تقديم أحدث ما توصلت إليه التكنولوجيا حول سلسلة التحويل، قمنا بتحليل ومحاكاة النموذج الكامل لنظام طاقة الرياح. تم تقديم دراسة كاملة للآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة في الفصل الثالث. بالإضافة إلى نمذجة رياضية جيدة مع محاكاة تصف الجهاز بأكمله والنظام المراد قيادته. حلل الفصل الرابع استراتيجيات التحكم المختلفة لسلسلة تحويل طاقة الرياح. أولاً، أتاح لنا التحكم في المتجه المطبق على التدفق الثابت بإجراء مراقبة مستقلة للقوة النشطة والتفاعلية للجهاز MADA. ثم تم إدخال عنصر تحكم MLI، وقدمنا بنية العاكس والمقوم ثنائي المستوى ونمذجتهما ومحاكتهما. بعد ذلك، لتحسين أداء النظام المراد التحكم فيه وضمان تحكم قوي، تم تطبيق تقنية المنطق الضبابي. تمت محاكاة استراتيجيات التحكم الثلاث هذه في بيئة MATLAB / Simulink، ويتم التعليق على النتائج التي تم الحصول عليها لكل نهج وتبسيط الضوء على فعالية استراتيجيات التحكم المقترحة من حيث المتانة.

الكلمات المفتاحية:

طاقة الرياح، آلة غير متزامنة مزدوجة الطاقة (MADA)، التحكم في القوة الموجهة، تعديل عرض النبضة (MLI)، المنطق الضبابي، شبكة الطاقة.

Résumé :

Cette thèse traite l'étude d'un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation. L'objectif des travaux présentés est la mise en œuvre d'une chaîne de production d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation afin d'améliorer l'efficacité de l'énergie fournie au réseau électrique. Après avoir présenté un état de l'art sur la chaîne de conversion, nous avons analysés et simulés le modèle complet du système éolien. Une étude complète de la machine asynchrone à double alimentation a été présentée dans le troisième chapitre. Plus une bonne modélisation mathématique avec une simulation décrivant l'ensemble de la machine et le système à entraîner. Le quatrième chapitre a analysé les différentes stratégies de commande de la chaîne de conversion éolienne. D'abord, la commande vectorielle appliquée au flux statorique nous a permis d'effectuer un contrôle indépendant de la puissance active et réactive de la MADA. Puis une commande par MLI a été introduit, nous avons présenté la structure de l'onduleur et de redresseur à deux niveaux et leur modélisation et simulation. Ensuite, Pour améliorer les performances du système à commander et pour assurer un réglage robuste, on a appliqué la technique de la logique floue. Ces trois stratégies de commande ont été simulé dans l'environnement MATLAB / Simulink, les résultats obtenus pour chacune des approches sont commentés et mettent en évidence l'efficacité des stratégies de commande proposées en terme de robustesse.

Mots clés :

L'énergie éolienne, la machine asynchrone à double alimentation (MADA), la commande vectorielle, la modulation de largeur d'impulsion (MLI), la logique floue, réseau électrique.

Abstract:

This thesis deals with the study of a wind power system based on a dual-feed asynchronous machine. The objective of the presented work is the implementation of a wind power generation chain based on a dual-feed asynchronous machine in order to improve the efficiency of the energy supplied to the electrical network. After presenting a state of the art on the conversion chain, we analyzed and simulated the complete model of the wind power system. A complete study of the dual-fed asynchronous machine was presented in the third chapter. Plus a good mathematical modeling with a simulation describing the whole machine and the system to be driven. The fourth chapter analyzed the different control strategies of the wind power conversion chain. First, the vector control applied to the stator flux allowed us to perform an independent control of the active and reactive power of the MADA. Then a PWM control was introduced, we presented the structure of the inverter and two-level rectifier and their modeling and simulation. Then, to improve the performance of the system to be controlled and to ensure a robust control, the fuzzy logic technique was applied. These three control strategies have been simulated in the MATLAB / Simulink environment, the results obtained for each approach are commented and highlight the effectiveness of the proposed control strategies in terms of robustness.

Key words:

Wind power, dual-fed induction machine (DFIM), vector control, pulse width modulation (PWM), fuzzy logic, power grid.