

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

M^{lle} BELAIMECHE Fatima Zohra

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} Cycle : Commande électrique

Intitulé de la thèse :

Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable.

Présentée devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------------|---|------------------------|
| Mr. MASSOUM Ahmed | Professeur (UDL.Sidi Bel-Abbès) | Président |
| Mr. BENTAALLAH Abderrahim | Professeur (UDL.Sidi Bel-Abbès) | Directeur de thèse |
| Mr.WIRA Patrice | Professeur (UHA, IUT, Mulhouse, France) | Co- Directeur de thèse |
| Mr.MEROUFEL Abdelkader | Professeur (UDL.Sidi Bel-Abbès) | Examineur |
| Mr.TALEB Rachid | Professeur (UHB.Chlef) | Examineur |
| Mr.FELLAH Mohammed Karim | Professeur (UDL.Sidi Bel-Abbès) | Examineur |

Remerciements

Remerciements

Ce travail a été préparé au sein du laboratoire ICEPS de l'Université de SIDI BEL ABBES;

Je tiens surtout à assurer ma sincère reconnaissance, mon plus grand respect et ma totale gratitude à M^r. A. BENTAALLAH, mon encadreur Professeur à l'Université de Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes pour tous les efforts, l'aide, le soutien et les encouragements qu'il a montré tout au long de ce travail et aussi pour tant de compréhension, et de disponibilité dont il a fait preuve.

J'exprime ici ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mon co-encadreur que je lui dois du respect, M^r.P.WIRA Professeur à l'Université à l'IUT, Haute Alsace, Mulhouse, France pour ses précieuses remarques fructueuses pour l'achèvement de ce travail. C'est un honneur pour moi que M^r.A.MASSOUM Professeur à l'Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes ait accepté d'en assumer la tâche de président. Messieurs les membres de jury:A.MEROUFEL,M.K.FELLAH Professeurs à l'Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes et M^r.R.TALEB Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef ont bien voulu honoré de participer à mon jury, de juger mon travail, le commenter et l'enrichir par leurs remarques, je les en suis profondément reconnaissante. Mes sincères gratitudes à M^r.Y.DJERRIRI et à tous les enseignants de l'université qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

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

Mes remerciements vont également à mes collègues, mes amis spécialement ma copine Massoum Sarra, et toute personne ayant aidé, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail.

Belimeche Fatima Zohra

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE1 | 1 |
| CHAPITRE1 : ETAT DE L'ART SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES | |
| 1.1 INTRODUCTION | 5 |
| 1.2 LES ENERGIES RENOUVELABLES | 5 |
| 1.3 DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES | 9 |
| 1.4 APERÇU SUR L'ENERGIE EOLIENNE | 11 |
| 1.4.1 HISTORIQUE | 11 |
| 1.4.2 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE | 13 |
| 1.4.3 DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE EOLIENNE EN AFRIQUE | 15 |
| 1.4.4 DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE | 16 |
| 1.5 TECHNOLOGIE DES EOLIENNES | 18 |
| 1.5.1 PUISSANCE DES EOLIENNES | 18 |
| 1.5.2 DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES | 19 |
| 1.5.2.a EOLIENNE A AXE VERTICAL | 19 |
| 1.5.2.b EOLIENNE A AXE HORIZAONTAL | 21 |
| 1.5.3 PRINCIPAUX CONSTITUANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL | 22 |
| 1.6 ENERGIE CINETIQUE DU VENT –CONVERSION EN ENERGIE MECANIQUE | 22 |
| 1.6.1 LOI DE BETZ | 22 |
| 1.6.2 COEFFICIENT DE COUPLE | 25 |
| 1.7 SYSTEME DE REGULATION AU NIVEAU DE LA TURBINE | 25 |
| 1.7.1 BILAN DES FORCES SUR UNE PALE | 25 |
| 1.7.2 CONTROLE PAR ANGLE DE CALAGE VARIABLE (PITCH CONTROL) | 26 |
| 1.7.3 CONTROLE PAR DECROCHAGE AERODYNAMIQUE PASSIF (PASSIVE STALL) | 27 |
| 1.7.4 CONTROLE PAR DECROCHAGE AERODYNAMIQUE PASSIF | 27 |
| 1.8 CLASSEMENT DES EOLIENNE | 28 |
| 1.8.1 EOLIENNE A VITESSE FIXE | 28 |
| 1.8.1.a LES AVANTAGES DE L'EOLIENNE A VITESSE FIXE | 29 |
| 1.8.1.b LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNE A VITESSE FIXE | 29 |
| 1.8.2 EOLIENNE A VITESSE VARIABLE | 30 |
| 1.8.2.a LES AVANTAGES DE L'EOLIENNE A VITESSE VARIABLE | 30 |
| 1.8.2.b LES INCONVENIENTS DE L'EOLIENNE A VITESSE VARIABLE | 30 |
| 1.8.3 INTERET DE LA VITESSE VARIABLE | 31 |
| 1.9 APERÇU SUR LES SYSTEME DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE | 31 |
| 1.9.1 SYSTEME UTILISANT UNE GENERATRICE SYNCHRONE | 32 |
| 1.9.2 SYSTEME UTILISANT LA MACHINE ASYNCHRONE | 32 |
| 1.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE | 34 |
| 1.10.1 AVANTAGES | 34 |
| 1.10.2 INCONVENIENTS | 34 |
| 1.11 CONCLUSION | 35 |
| CHAPITRE 2 :MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE A BASE D'UNE GADA | |
| 2.1 INTRODUCTION | 36 |

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 2.2 TOPOLOGIE ET EMPLOI DES MACHINES ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION | 36 |
| 2.2.1 DESCRIPTION DU SYSTEME | 36 |
| 2.2.2 MODES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA | 37 |
| 2.2.2.1 MODE MOTEUR HYPO-SYNCHRONE | 37 |
| 2.2.2.2 MODE MOTEUR HYPER-SYNCHRONE | 37 |
| 2.2.2.3 MODE GENERATRICE HYPO-SYNCHRONE | 38 |
| 2.2.2.4 MODE GENERATRICE HYPER-SYNCHRONE | 38 |
| 2.3 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE | 39 |
| 2.3.1 PARTIE AERODYNAMIQUE | 39 |
| 2.3.2 MODELE DE LA TURBINE EOLIENNE | 39 |
| 2.4 STRATEGIE DE MAXIMISATION DES PUISSANCES MPPT | 43 |
| 2.4.1 CONTROLE MPPT SANS ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE MECANIQUE | 45 |
| 2.4.2 CONTROLE MPPT AVEC ASSERVISSEMENT DE LA VITESSE MECANIQUE | 46 |
| 2.5 RESULTATS DE SIMULATION | 47 |
| 2.6 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION | 52 |
| 2.6.1 MODELE TRIPHASE DE LA MADA | 52 |
| 2.6.2 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES | 53 |
| 2.6.3 LES EQUATIONS ELECTRIQUES DE LA GADA | 53 |
| 2.6.4 EQUATIONS MAGNETIQUES DANS LE REPERE (A,B,C) | 54 |
| 2.6.5 EQUATIONS MECANIQUES DE LA GADA | 55 |
| 2.6.6 MODEL DE LA GADA DANS LE PLAN (d,q) | 55 |
| 2.6.7 LES EQUATIONS ELECTRIQUES DE LA GADA DANS LE PLAN (d,q) | 56 |
| 2.6.8 L'EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE LA GADA DANS LE REPERE (d,q) | 57 |
| 2.6.9 EQUATION MECANIQUE | 57 |
| 2.6.10 MODELE DE LA MADA AVEC ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE | 57 |
| 2.7 MODELISATION DE L'ALIMENTATION | 59 |
| 2.7.1 MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION | 61 |
| 2.7.2 RESULTATS DE SIMULATION | 63 |
| 2.8 CONCLUSION | 64 |
| CHAPITRE 3 : COMMANDE NON LINEAIRE PAR LINEARISATION ENTREE/SORTIE DE LA GADA | |
| 3.1 INTRODUCTION | 65 |
| 3.2 COMMANDE PAR LINEARISATION ENTREE/SORTIE | 65 |
| 3.3 PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE LINEARISATION AU SENS DES ENTREES/SORTIE | 65 |
| 3.4 APPLICATION DE LA COMMANDE NON LINEAIRE À LA GENERATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION | 67 |
| 3.4.1 MODELE NON LINEAIRE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION | 67 |
| 3.4.2 CHOIX DES GRANDEURS DE SORTIE | 68 |
| 3.4.3 CALCUL DU DEGRE RELATIF | 69 |
| 3.4.4 LINEARISATION DU SYSTEME | 70 |
| 3.5 RESULTATS DE SIMULATION | 70 |
| 3.5.1 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT FIXE | 71 |
| 3.5.2 TESTE DE ROBUSTESSE DE LA COMMANDE NON LINEAIRE | 75 |
| 3.5.3 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT VARIABLE | 76 |
| 3.5.3 CONCLUSION | 77 |

Sommaire

CHAPITRE 4 : COMMANDE NON LINEAIRE PAR LINEARISATION ENTREE/SORTIE DE LA GADA BASEE SUR LA LOGIQUE FLOUE

| | |
|--|----|
| 4.1 INTRODUCTION | 78 |
| 4.2 INTERET DE LA COMMANDE FLOUE | 78 |
| 4.3 COMMANDE LINEARISANTE ENTREE/SORTIE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE | 78 |
| 4.4 NOTIONS FONDAMENTALES DE LA LOGIQUE FLOUE | 79 |
| 4.4.1 ENSEMBLES FLOUS | 79 |
| 4.4.2 FONCTION D'APPARTENANCE | 79 |
| 4.4.3 CARACTERISTIQUES D'UN SOUS ENSEMBLE FLOU | 80 |
| 4.4.4 VARIABLES LINGUISTIQUES | 81 |
| 4.4.5 DIFFERENCE ENTRE ENSEMBLES CLASSIQUE ET ENSEMBLE FLOU | 82 |
| 4.4.6 RAISONNEMENT EN LOGIQUE FLOUE | 82 |
| 4.4.7 OPÉRATEUR EN LOGIQUE FLOUE | 83 |
| 4.5 STRUCTURE DE BASE D'UN CONTROLEUR FLOU | 84 |
| 4.5.1 INTERFACE DE FUZZIFICATION | 84 |
| 4.5.2 INTERFACE FLOUE | 85 |
| 4.5.3 DEFUZZIFICATION | 87 |
| 4.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA LOGIQUE FLOUE | 87 |
| a. AVANTAGES | 87 |
| b. INCONVENIENTS | 87 |
| 4.7 APPLICATION DE LA COMMANDE NON LINEAIRE PAR LA LOGIQUE FLOUE À LA GENERATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION | 87 |
| 4.7.1 REGULATEUR FLOU | 88 |
| 4.8 RESULTATS DE SIMULATION | 89 |
| 4.8.1 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT FIXE | 90 |
| 4.8.2 TEST DE ROBUSTESSE DE LA COMMANDE NON LINEAIRE | 94 |
| 4.8.3 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT VARIABLE | 95 |
| 4.9 CONCLUSION | 96 |

CHAPITRE 5 : COMMANDE NON LINEAIRE PAR LINEARISATION ENTREE/SORTIE DE LA GADA SUR LE MODE GLISSANT

| | |
|---|-----|
| 5.1 INTRODUCTION | 97 |
| 5.2 PRINCIPE DU CONTROLEUR A MODE GLISSANT | 97 |
| 5.3 BASES THEORIQUES DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT | 98 |
| 5.4 LES MODES DE LA TRAJECTOIRE DANS LE PLAN DE PHASE | 99 |
| 5.5 LA CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT DE LA MADA | 99 |
| 5.5.1 CHOIX DE LA SURFACE DE GLISSEMENT | 99 |
| 5.5.2 CONDITION D'EXISTENCE DU MODE GLISSANT | 100 |
| 5.5.2.A FONCTION DIRECTE DE COMMUTATION | 100 |
| 5.5.2-B FONCTION DE LYAPUNOV | 100 |
| 5.5.3 DETERMINATION DE LA LOI DE COMMANDE | 101 |
| 5.5.4 COMMANDE DISCONTINUE DE BASE | 102 |
| 5.5.5 COMMANDE AVEC SEUIL | 102 |
| 5.5.6 COMMANDE ADOUCIE | 103 |
| 5.5.7 COMMANDE CONTINUE AVEC COMPOSANTE INTEGRALE | 103 |

Sommaire

| | |
|---|-----|
| 5.6 APPLICATION DE LA REGULATION PAR MODE GLISSANT A LA COMMANDE NON LINEAIRE DE LA GADA | 104 |
| 5.7 RESULTATS DE SIMULATION | 106 |
| 5.7.1 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT FIXE | 107 |
| 5.7.2 TESTE DE ROBUSTESSE DE LA COMMANDE NON LINEAIRE | 110 |
| 5.7.3 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT VARIABLE | 111 |
| 5.8 CONCLUSION | 112 |
| CHAPITRE 6 : COMMANDE NON LINEAIRE PAR LINEARISATION ENTREE/SORTIE DE LA GADA SUR BACKSTEPPING | |
| 6.1 INTRODUCTION | 113 |
| 6.2 GENERALITES SUR LE PRINCIPE DU BACKSTEPPING | 113 |
| 6.2.1 HISTORIQUE | 113 |
| 6.3 CONCEPTION DE LA COMMANDE DE TYPE BACKSTEPPING | 113 |
| 6.4 APPLICATION DE LA REGULATION PAR MODE GLISSANT A LA COMMANDE NON LINEAIRE DE LA GADA | 116 |
| 6.5 RESULTATS DE SIMULATION | 118 |
| 6.5.1 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT FIXE | 118 |
| 6.5.2 TESTE DE ROBUSTESSE DE LA COMMANDE NON LINEAIRE | 122 |
| 6.5.3 FONCTIONNEMENT A VITESSE DU VENT VARIABLE | 123 |
| 6.5.4 ETUDE COMPARATIVE ENTRE LES TECHNIQUE DE COMMANDES PROPOSEE | 124 |
| 6.6 CONCLUSION | 126 |
| CONCLUSION GENERALE | 127 |
| ANNEXE | |
| ANNEXE(A) | 129 |
| ANNEXE(B) | 130 |
| RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE | 133 |

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre1

| | |
|---|----|
| Figure1.1 : Une centrale hydraulique | 7 |
| Figure1.2 : Type de la biomasse énergie | 7 |
| Figure1.3 : La géothermie énergie | 8 |
| Figure1.4 : Source photovoltaïque | 8 |
| Figure1.5 : Parc éolien | 9 |
| Figure1.6 : Développement d'énergie photovoltaïque | 10 |
| Figure1.7 : Développement d'énergie éolienne | 10 |
| Figure1.8 : Les 10 meilleurs pays productif d'énergie photovoltaïque | 11 |
| Figure1.9 : Les 10 meilleurs pays productif d'énergie éolienne | 11 |
| Figure1.10 : Le célèbre dessin des moulins à vent hollandais | 12 |
| Figure1.11 : Les premières turbines à axe horizontal et vertical | 12 |
| Figure1.12 : Le parc éolien de l'union européenne à fin 2017 | 14 |
| Figure1.13 : Evolution de la puissance du parc éolien mondial | 15 |
| Figure1.14 : Eolienne D'drar | 17 |
| Figure1.15 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol | 18 |
| Figure1.16 : Eolienne à axe vertical (Structure de Savonius) | 19 |
| Figure1.17 : Eolienne à axe vertical (structure de Darrieus) | 19 |
| Figure1.18 : Eolienne à axe horizontal. | 22 |
| Figure1.19 : Eléments constituant une éolienne | 22 |
| Figure1.20 : Tube de courant autour d'une éolienne | 23 |
| Figure1.21 : Coefficient de puissance | 24 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure1.22 : Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines | 24 |
| Figure1.23 : Bilan des forces sur une pale | 25 |
| Figure1.24 : Variation de l'angle de calage d'une pale | 26 |
| Figure1.25 : Flux d'air sur un profil de pale " stall " | 27 |
| Figure1.26 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent | 28 |
| Figure1.27 : Eolienne à vitesse fixe directement connectée au réseau électrique | 28 |
| Figure1.28 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone. | 29 |
| Figure1.29 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA | 30 |
| Figure1.30 : Eolienne à vitesse variable type MADA | 31 |
| Figure1.31 : Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne | 32 |
| Figure1.32 : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne | 33 |
| Figure1.33 : MADA dans une chaîne de conversion éolienne | 34 |
| <u>Chapitre2</u> : | |
| Figure2.1 : Schéma de la chaîne de conversion éolienne | 37 |
| Figure2.2 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA | 38 |
| Figure2.3 : Profil du vent appliqué à la turbine | 39 |
| Figure2.4 : Schéma de la turbine éolienne | 39 |
| Figure2.5 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β 1.5 M.W. | 41 |
| Figure2.6 : Modèle mécanique de la turbine éolienne | 41 |
| Figure2.7 : Schéma bloc du modèle de la turbine | 43 |
| Figure2.8 : Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable | 44 |
| Figure2.9 : Stratégies de commande de la turbine | 45 |
| Figure2.10 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique | 46 |
| Figure2.11 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique | 47 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure2.12 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique | 48 |
| Figure2.13 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique(PI) | 49 |
| Figure2.14 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique(MG) | 50 |
| Figure2.15 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique(Bs) | 50 |
| Figure2.16 : Comparaison entre les trois commandes proposées | 51 |
| Figure2.17 : Représentation de la GADA dans le repère (a b c) | 53 |
| Figure2.18 : Passage de système triphasé au système biphasé | 55 |
| Figure2.19 : Orientation du repère de Park | 57 |
| Figure2.20 : Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA | 59 |
| Figure2.21 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor D'une MADA | 60 |
| Figure2.22 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire | 61 |
| Figure2.23 : Comportement de la MADA intégrée au système éolien | 63 |
| Chapitre3 : | |
| Figure3.1 : Schéma d'un système non linéaire | 66 |
| Figure3.2 : : Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie appliquée à la GADA | 71 |
| Figure3.3 : Découplage de la puissance active et réactive de la MADA par la CNL | 72 |
| Figure3.4 : Comportement de la MADA avec la commande non linéaire | 73 |
| Figure3.5 : Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique | 74 |
| Figure3.6 : Commande non linéaire vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA | 75 |
| Figure3.7 : Commande non linéaire de la MADA avec (contrôle MPPT) | 76 |
| Chapitre4 | |
| Figure4.1 : Forme des fonctions d'appartenance | 80 |
| Figure4.2 : Format d'un ensemble flou normalisé | 80 |
| Figure4.3 : Forme des Variable flous ou linguistique | 81 |
| Figure4.4 : Structure interne d'un régulateur flou | 84 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|-----|
| Figure4.5 : Fonction d'appartenance avec cinq classes | 85 |
| Figure4.6 : Exemple d'interface max-min | 86 |
| Figure4.7 : Exemple d'interface max-produit | 86 |
| Figure4.8 : Interface de fuzzification | 88 |
| Figure4.9 : Interface de défuzzification | 89 |
| Figure4.10 :Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie basée sur la logique floue appliquée à la GADA | 90 |
| Figure4.11 : Découplage de la puissance active et réactive de la MADA par la (NL+LF) | 91 |
| Figure4.12 : Comportement de la MADA avec la (CNL+LF) | 92 |
| Figure4.13 : Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique | 93 |
| Figure4.14 : Commande non linéaire (NL+LF) vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA | 94 |
| Figure4.15 : Commande non linéaire (CNL+LF) de la MADA avec (contrôle MPPT) | 95 |
| <u>Chapitre5</u> | |
| Figure5.1 : Trajectoire d'un système de deuxième ordre à VSC | 98 |
| Figure5.2 : Les modes de la trajectoire dans le plan de phase | 99 |
| Figure5.3 :Définition de La fonction « sign» | 102 |
| Figure5.4 : Commande u_n intégrale | 103 |
| Figure 5.5 : Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie basée sur mode glissant appliquée à la GADA | 106 |
| Figure5.6 : Découplage de la puissance active et réactive de la MADA par la (NL+MG) | 107 |
| Figure5.7 : Comportement de la MADA avec la commande non linéaire | 108 |
| Figure5.8 : Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique | 109 |
| Figure5.9 : Commande non linéaire (CNL+MG) vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA | 110 |
| Figure5.10 : Commande non linéaire (CNL+MG) de la MADA avec (contrôle MPPT) | 111 |

LISTE DES FIGURES

Chapitre6

| | |
|--|-----|
| Figure6.1 : Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie basée sur backstepping appliquée à la GADA | 118 |
| Figure6.2 : Découplage de la puissance active et réactive de la MADA par la (CNL+Bs) | 119 |
| Figure6.3 : Comportement de la MADA avec la commande non linéaire | 120 |
| Figure6.4 Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique | 121 |
| Figure6.5 : Commande non linéaire (NL+Bs) vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA | 122 |
| Figure6.6 : Commande non linéaire (NL+Bs) de la MADA avec (contrôle MPPT) | 123 |
| Figure6.7 : Puissance active statorique pour les 4 commandes avec un zoom | 124 |
| Figure6.8 : Puissance réactive statorique pour les 4 commandes avec un zoom | 125 |

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE1 :

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Capacité installées en énergie éolienne | 17 |
| Tableau 1.2 : Différents catégorie de l'éolienne | 19 |

Chapitre4 :

| | |
|--|----|
| Tableau 4.1 : Tableau de décision diagonale de Macvicar-Whelan(3*3) | 88 |
|--|----|

CHAPITRE6 :

| | |
|--|-----|
| Tableau 6.1 : Comparaison entre les 4 commandes proposées | 126 |
|--|-----|

GLOSSAIRES

| ABBREVIATION | SIGNIFICATION |
|--------------|--|
| GADA | Génératrice Asynchrone Double Alimentation |
| MAS | Machine Asynchrone |
| MS | Machine Synchrone |
| MADA | Machine Asynchrone Double Alimentation |
| MLI | Modulation A Largeur d'Impulsions. |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| PI | Action Proportionnelle Et Intégrale. |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor. |
| FTBO | Fonction De Transfert En Boucle Ouvert |
| FTBF | Fonction De Transfert En Boucle Fermé |
| GTO | Gate Turn-Off Thyristor. |
| CNL | Commande Non Linéaire |
| PI | Proportionel-Integral |
| LF | Logique Floue |
| MG | Mode Glissant |
| Bs | Backstepping |
| THD | Total Harmonic Distortion |
| NOTATIONS | SIGNIFICATIONS |
| P_v | La puissance cinétique du vent |
| P_t | La puissance aérodynamique de la turbine |
| P_g | Puissance mécanique de la génératrice |

GLOSSAIRES

| | |
|----------------------|---|
| C_p | Le coefficient de puissance de la turbine |
| Ω_t | La vitesse mécanique de la turbine |
| C_t | Le couple de la turbine |
| C_c | Le coefficient de couple de la turbine |
| λ_{opt} | Ratio de vitesse optimal |
| C_p^{max} | Coefficient de puissance relatif à l'extraction maximale de puissance |
| C_g^* | Le couple électromagnétique de référence |
| Ω_g^* | La vitesse de rotation de référence |
| C_f | Couple du frottement visqueux |
| $\widehat{\Omega}_t$ | La vitesse de rotation estimée de la turbine |
| \widehat{V} | La vitesse du vent estimé |
| \widehat{C}_t | Le couple de la turbine estimé |
| \widehat{C}_t^* | Le couple référence de la turbine estimé |
| Ω_{ref} | La vitesse angulaire de référence |
| R | Longueur des pales |
| S | Surface circulaire balayée par la turbine |
| λ | Vitesse relative de l'éolienne |
| β | Angle de calage des pâles |
| ρ | Densité de l'air traversant le rotor de la turbine |
| J | Moment d'inertie des parties tournantes de la MADA |
| J_g | L'inertie de la génératrice. |
| J_T | Inertie totale des parties tournantes |
| R_r | Résistances du rotor |

GLOSSAIRES

| | |
|--------------|--|
| R_s | Résistances du stator |
| L_s | L'inductance statoriques. |
| L_r | L'inductance rotoriques |
| L_m | Inductance magnétisante |
| M_{sr} | Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et du rotor |
| σ | Coefficient de dispersion de Blondel |
| K_f | Coefficient de frottement visqueux de la GADA |
| p | Nombre de paires de pôles |
| u_s | Vecteur tension statorique |
| u_r | Vecteur tension rotorique |
| i_s | Vecteur courant statorique |
| i_r | Vecteur courant rotorique |
| i_{rdq} | Les courants rotoriques dans le repère de Park. |
| i_{sdq} | Les courants statoriques dans le repère de Park. |
| u_{sdq} | Les tensions statoriques dans le repère de Park. |
| u_{rdq} | Les tensions rotoriques dans le repère de Park. |
| ϕ_r | Vecteur flux rotorique |
| ϕ_s | Vecteur flux statorique |
| ϕ_{rdq} | Les flux rotoriques dans le repère de Park. |
| ϕ_{sdq} | Les flux statoriques dans le repère de Park. |
| V_p | Valeur de crête de la porteuse |
| V_m | Valeur maximale de la tension de référence |
| V_{mod} | Tension continue à l'entrée de l'onduleur |

GLOSSAIRES

| | |
|------------|--|
| V_{DC} | Tension aux bornes de la capacité du filtre |
| V_{red} | Tension redressé |
| f_r | Fréquence de l'alimentation rotorique |
| f_s | Fréquence de l'alimentation statorique |
| f_p | Fréquence de la porteuse |
| f_m | Fréquence de la modulante |
| m | Indice de modulation |
| r | Indice de réglage de tension |
| g | Glissement de vitesse de la MADA |
| K_p, K_i | Composantes proportionnelle et intégrale du correcteur PI |
| P_r | Puissance active rotorique de la MADA échangée avec le réseau |
| P_s | Puissance active statorique de la MADA échangée avec le réseau |
| P_{mec} | Puissance mécanique fournie au rotor |
| Q_r | Puissance réactive rotorique de la MADA échangée avec le réseau |
| Q_s | Puissance réactive statorique de la MADA échangée avec le réseau |
| C_{em} | Couple électromagnétique |
| C_{mec} | Couple mécanique appliqué sur l'arbre de la MADA |
| τ_r | Temps de réponse de système |
| θ_s | Angle électrique désignant du champ tournant à l'axe de la phase a |
| θ_r | Angle électrique désignant la position du rotor |

GLOSSAIRES

| | |
|-----------------------|---|
| Ω_{mec} | Vitesse de rotation mécanique de la MADA |
| Ω_{opt} | Vitesse de rotation angulaire de l'éolienne donnant la puissance optimale |
| Ω_r | Vitesse de rotation angulaire de l'éolienne |
| Ω_s | Vitesse angulaire du glissement |
| ω_{sr} | Vitesse électrique du champ tournant |
| ω_s | Vitesse électrique du stator |
| ω_r | Vitesse électrique du rotor |

Introduction Générale

Introduction générale

L'histoire de l'humanité et celle de la conquête de l'énergie sont inséparables. Dans un premier temps, les besoins étaient modestes : se chauffer, cuire les aliments et sans doute s'éclairer, l'énergie étant essentiellement liée à la maîtrise du feu. Puis, les sociétés en développement ont rapidement été conduites à utiliser d'autres formes d'énergie. D'abord la force humaine et la force animale pour la construction, le transport de matériaux divers, les déplacements, l'agriculture...ect. La navigation est aussi une étape importante puisque, outre l'énergie humaine des rameurs, l'utilisation de celle du vent devient essentielle et ce pendant des siècles. Les moulins font appel également à cette énergie ou à celle de l'eau.

Le milieu du XIX^e siècle voit l'avènement et le développement de la civilisation industrielle grâce à l'utilisation de machines et à l'exploitation de nouvelles énergies, d'abord celle de la vapeur (liée au feu) puis celle de l'électricité et enfin celle apportée par les combustibles dits fossiles c'est-à-dire essentiellement le charbon et le pétrole (plus tardivement le gaz). Ces derniers permettent de concevoir des véhicules autonomes transportant leur propre source d'énergie (locomotives puis voitures automobiles et avions). Au cours du XX^e siècle jusqu'à notre époque, les besoins d'énergie de l'humanité sont en croissance quasiment exponentielle. L'électricité s'est imposée comme une énergie incontournable pour l'industrie et nos usages domestiques. Les combustibles fossiles sont utilisés massivement avec les conséquences que l'on sait maintenant sur le réchauffement climatique dues à l'émission de gaz carbonique (le fameux CO₂ ...) lors de leur combustion **[64]**.

Les énergies renouvelables constituent une réponse particulièrement adaptée aux besoins énergétiques considérables des pays émergents qui assurent aujourd'hui l'essentiel de la croissance mondiale. Elles permettent de valoriser leurs ressources naturelles, hydraulique, ensoleillement, vent, biomasse ..., de rapprocher les sites de production des centres de consommation et de réduire la dépendance de ces pays aux énergies fossiles. Elles se prêtent également à des productions locales d'équipements qui ajoutent encore à leur intérêt **[65]**.

Introduction Générale

L'énergie éolienne est la source renouvelable la plus prometteuse de la production d'énergie électrique pour l'avenir. De nombreux pays œuvrent à promouvoir la technologie éolienne à travers divers programmes nationaux et incitations du marché. La technologie de l'énergie éolienne a évolué rapidement au cours des trois dernières décennies avec les diamètres de rotor et l'utilisation d'électronique de puissance sophistiquée pour permettre le fonctionnement à vitesse variable [3].

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie afin de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite. Par rapport aux éoliennes à vitesse fixe ceux sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler les puissances active et réactive produites par l'éolienne à chaque instant [2].

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). L'avantage que présente ce type de génératrices est de permettre une production d'énergie électrique à vitesse variable, ce qui nous amène à dire que ces génératrices nous permettent une meilleure exploitation des ressources éoliennes sous des conditions de vent différentes. Mais la difficulté majeure rencontrée dans la commande de la GADA réside dans le fait que les puissances à commander sont des variables fortement couplées.

L'éolienne à vitesse variable permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie produite par rapport à celle fonctionnant à vitesse fixe. Pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée

A la lumière de ce constat, le but principal de cette thèse est de faire un développement du contrôle des puissances active et réactive d'une GADA. C'est donc pour ce but que nous allons développer une étude pour un système de conversion éolienne qui permet de fournir

Introduction Générale

une puissance constante au réseau, pour améliorer l'efficacité, la robustesse et la dynamique transitoire, en considérant la dynamique non linéaire.

Les algorithmes de contrôle dans chaque chapitre sont réalisés sur la base de Matlab / Simulink. Dans ce contexte, le présent travail concerne une contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable en particulier l'énergie éolienne. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail constitué de six chapitres organisés comme suit :

- Dans le premier chapitre nous avons commencé par une des statistiques sur le développement de l'énergie éolienne dans le monde, puis nous nous sommes intéressés à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, suivi par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés..
- Le second chapitre est consacré à la modélisation d'une génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable dans un système éolien. En effet, dans ce chapitre la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement sont présentés dans le premier temps. La modélisation des différents éléments constituant le système pour établir les différentes commandes associées est présenté dans le second temps. C'est aussi dans ce chapitre que la stratégie MPPT est présentée. Cette dernière repose sur le principe de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne pour chaque vitesse du vent. Après, nous présentons la modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) et de son convertisseur statique qui alimente le rotor.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons une stratégie de commande d'un contrôleur non-linéaire basé sur la technique de linéarisation au sens des Entrées/Sorties pour régler les puissances active et réactive de la MADA.
- Le quatrième chapitre est consacré à la commande robuste, c'est la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie par des régulateurs à base de la logique floue. Cette commande consiste à remplacer les régulateurs proportionnel-intégral (PI) de la puissance active et réactive utilisée dans le chapitre précédent par les régulateurs

Introduction Générale

de logique floue. Les résultats obtenus en simulation ont été validés pour une MADA de 1,5 MW.

- Le cinquième chapitre est consacré à la commande non linéaire par linéarisation Entrée/sortie par des régulateurs à mode glissant. Cette dernière est basée sur le choix de la surface de glissement et la condition de convergence pour créer une loi de commande adéquate. Les résultats de la simulation numérique obtenus lors de l'application de ces commandes sur le système seront affichés et commentés.
- Dans le sixième chapitre, nous avons développé la commande par backstepping basée sur les erreurs et la théorie de stabilité de Lyapunov, afin de faire converger ces erreurs vers zéro et d'assurer ainsi la stabilité et l'équilibre du système instantanément. Les performances de ces deux techniques de commandes seront validées par les résultats obtenus par simulation.

Nous avons clôturé ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et par des perspectives sur de futurs travaux en continuité de ce travail de recherche.

CHAPITRE 1 :

*ETAT DE L'ART SUR
LES ENERGIES
RENOUVELABLES*

1.1 INTRODUCTION

Le pétrole le gaz naturel et le charbon sont des matières présentés dans le sous-sol de la Terre. Leur caractéristique, c'est qu'ils brûlent très bien : ce sont d'excellents carburants. On les appelle "hydrocarbures". Ils ont aussi le pouvoir d'être facilement stockés et transportés, ce qui en fait la source d'énergie la plus pratique à utiliser.

Mais ils présentent deux très gros inconvénients: le premier, c'est qu'en brûlant, ils dégagent beaucoup de particules qui polluent l'atmosphère. Le second, c'est que leur quantité sur terre est limitée. En effet, les hydrocarbures ont mis plusieurs centaines de millions d'années pour se former, ce qui signifie que leur stock n'est pas prêt de se renouveler. Au rythme où l'Humanité les utilise, ce stock finira par s'épuiser [66].

La production électrique à partir de combustibles fossiles est à l'origine de 40% des émissions mondiales de CO2. L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de consommation) [1].

L'apport des nouveaux systèmes de production d'énergies renouvelables a été décisif pour l'augmentation de la part des sources conventionnelles dans le total mondial, et ainsi réduire la production des gaz à effet de serre [4].

Dans ce chapitre, un état de l'art des différentes sources d'énergies renouvelables sera présenté au premier temps. Au second temps une étude technique globale sur l'énergie éolienne qui comprend l'historique, l'évolution de son exploitation dans le monde en quelques chiffres, ainsi que ses avantages et ses inconvénients seront présentés. Une description des différents aérogénérateurs également sera présentée, et où un aperçu détaillé de l'aérogénérateur à axe horizontal est donné.

1.2 LES ENERGIES RENOUVELABLES

Force vive de l'eau ou du vent, rayonnement solaire, géothermie, chaleur du bois et des autres ressources de la biomasse, sans oublier les carburants végétaux et la valorisation des déchets, les énergies renouvelables prennent de multiples formes.

Leur développement constitue un enjeu fort dans un contexte de demande croissante d'énergie, d'épuisement potentiel des ressources fossiles et de nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. [1].

L'énergie renouvelable provient de plusieurs sources distinctes [4]:

➤ **L'hydraulique**

L'hydroélectricité, la production d'électricité à partir de la force de l'eau est apparue depuis longtemps dans la continuité des moulins, qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Les sites de petites puissances (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées pour des petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont des grands avantages. Les petites centrales hydrauliques appartiennent souvent à des producteurs indépendants [5].

L'hydro-électricité de petite puissance est avant tout une énergie renouvelable répondant aux trois critères fixés dans la définition, généralement admise pour les énergies renouvelables : pérennité des ressources, respect de l'environnement (moyennant certaines précautions), possibilité de production délocalisée (contribue à une certaine indépendance énergétique).

Le principal avantage énergétique et environnemental de cette énergie est qu'elle n'est pas intermittente, contrairement à l'énergie solaire ou éolienne. La production hydraulique varie bien entendu suivant des cycles saisonniers, les courants d'eau pouvant être diminués l'été ou au contraire renforcés par la fonte de glaciers. Il est important de noter qu'il est plus facile de prévoir à l'avance les débits des courants d'eau que les vents car on installe en général un bassin de retenue qui permet d'avoir un débit régulier [6].



Figure.1.1- Une centrale hydraulique

➤ **L'énergie de la biomasse**

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1% de la production d'électricité mondiale [1].



Figure.1.2- Type de la biomasse énergie.

➤ **L'énergie de la géothermie**

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage,

ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur [67].

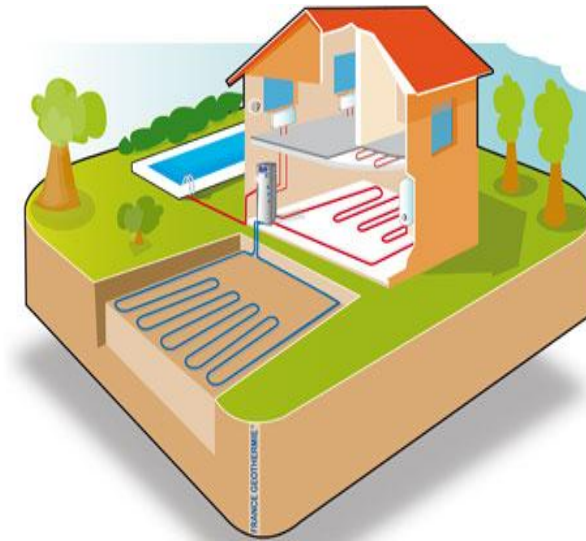


Figure.1.3- La géothermie énergie.

➤ **L'énergie solaire**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kwc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [1].



Figure.1.4- Source photovoltaïque

➤ **L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète. Il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle.

Les éoliennes, ou aérogénérateurs, se chargent ainsi de convertir l'énergie éolienne en une énergie mécanique (le vent fait tourner les pales du dispositif), qui alimente ensuite un générateur électrique, où elle est convertie en énergie électrique.

D'autres dispositifs l'exploitent également en la convertissant en une énergie mécanique, comme les voiliers ou les éoliennes de pompage [73].



Figure.1.5- Parc éolien

1.3 DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES

Le rapport annuel du réseau international REN21, qui brosse le panorama le plus complet des filières renouvelables dans le monde, apporte une réponse contrastée. Un nouveau record de puissance installée a en effet été établi en 2016, confirmant l'essor continu de ce secteur. Mais les investissements qui y ont été consacrés ont fortement diminué.

A la fin de 2016, la capacité totale d'énergie renouvelable a franchi pour la première fois la barre de 2 000 gigawatts (GW), à 2017 GW, soit une progression de 8,7 % sur un an, de même niveau que celle enregistrée en 2015. Si un peu plus de la moitié de ce potentiel reste assuré par les ouvrages hydrauliques, le développement du secteur est tiré par le solaire photovoltaïque (303 GW, + 33 %) et par l'éolien (487 GW, + 12,5 %), qui comptent à eux deux pour plus de 80 % dans cette croissance [68].

Solar PV Global Capacity and Annual Additions, 2006-2016

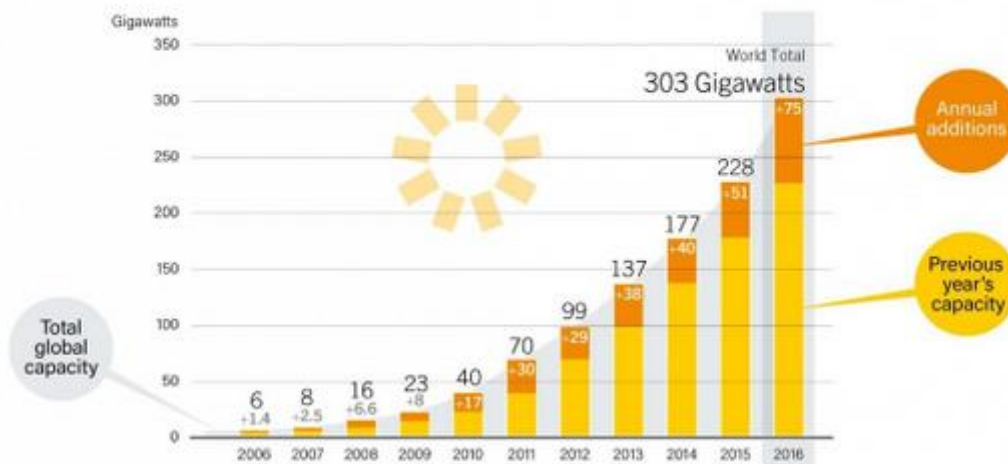


Figure.1.6-Développement d'énergie photovoltaïque du 2006-2016[68]

Wind Power Global Capacity and Annual Additions, 2006-2016

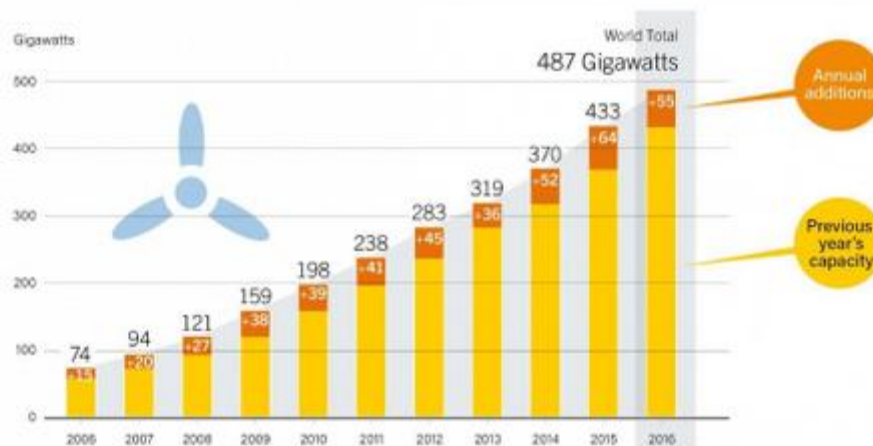


Figure.1.7-Développement d'énergie éolienne du 2006-2016 [68].

La Chine conforte sa place de chef de file incontesté dans le solaire photovoltaïque, où elle est à l'origine de près de la moitié des capacités supplémentaires, comme dans l'éolien, où plus de 40 % des nouvelles installations sont à mettre à son actif. En comparaison du géant asiatique, le Japon, les Etats-Unis, l'Allemagne ou l'Inde font désormais, dans ce domaine, figure de nains.

La France se classe pour sa part dans le groupe des dix pays les plus équipés, mais avec un rang de Petit Poucet et une progression modeste (+ 0,6 GW en 2016 dans le solaire et + 1,6 GW dans l'éolien) [68].

Solar PV Capacity and Additions, Top 10 Countries, 2016

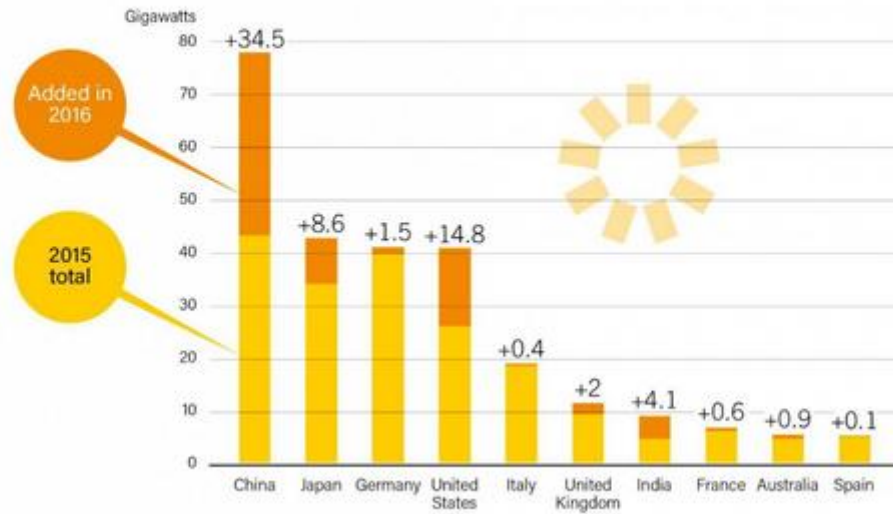


Figure.1.8-Les 10 meilleurs pays productif d'énergie photovoltaïque [68].

Wind Power Capacity and Additions, Top 10 Countries, 2016

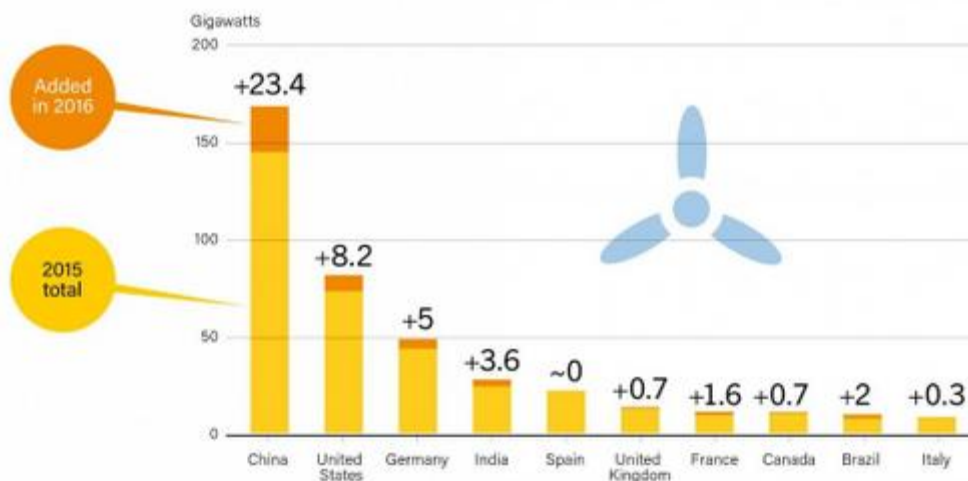


Figure.1.9-Les 10 meilleurs pays productif d'énergie éolienne [68].

1.4 APERÇU SUR L'ENERGIE EOLIENNE

1.4.1 Historique

L'énergie éolienne a été utilisée pendant des milliers d'années par les humains. Les anciens Perses ont utilisé l'énergie du vent pour pomper l'eau avant la naissance du Christ [69], propulsion de voiliers, pompage d'eau et le broyage du maïs ont été les premiers dans le domaine d'application. Le Danemark a été le premier pays qui a utilisé le vent pour la production d'électricité. Les Danois utilisaient un WT de 23 m de diamètre en 1890 pour

générer électricité. En 1910, plusieurs centaines d'unités de 5 à 25 kW étaient en service. Le célèbre dessin des moulins à vent hollandais est présenté à la figure 1.10 [7].



Figure.1.10- Le célèbre dessin des moulins à vent hollandais.

À l'échelle internationale, l'intérêt des énergies renouvelables a été augmenté depuis la première crise en 1973, et l'industrie des énergies renouvelables a fait des progrès significatifs depuis le protocole de Kyoto (Japon, 1997) où des réductions collectives des émissions de gaz à effet de serre ont été convenues et divers développements ont été encouragés par les gouvernements du monde entier.

Dans les années 1970 et 1980, diverses configurations de WT à terre ont été étudiées, y compris les plans d'axe horizontal et vertical (voir la figure 1.11). Progressivement, la conception de l'axe horizontal avec trois lames est venue dominer.

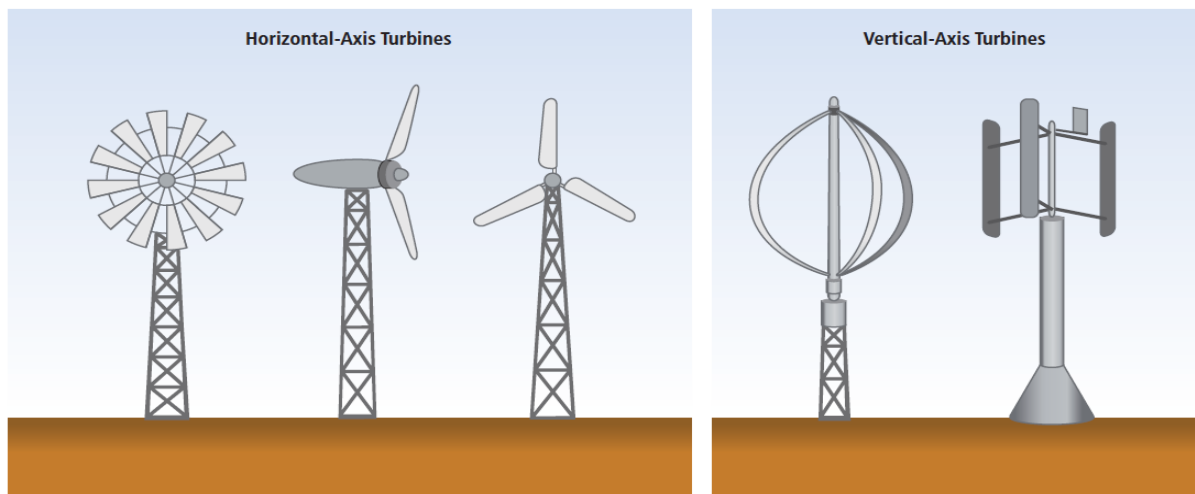


Figure.1.11- Les premiers turbines à axe horizontal et vertical.

1.4.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des Vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- **la transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **la production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne produit pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation [70].

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier figure (1.12). Ceci est principalement dû à deux raisons :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

En 2017, près de 15,7 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées dans l'Union européenne, soit 20% de plus qu'en 2016 selon Wind Europe, association européenne représentant la filière. Environ 80% de ces nouvelles capacités sont concentrées à terre mais les installations en mer en 2017 ont doublé en puissance par rapport à 2016.

En matière de puissance installée, l'Allemagne est encore le pays où l'éolien s'est le plus développé en 2017, avec 6,6 GW de nouvelles capacités (portant la puissance du parc éolien allemand à 56,1 GW à fin 2017), devant le Royaume-Uni (4,3 GW de nouvelles capacités ; 18,9 GW à fin 2017) et la France (1,7 GW ; 13,8 GW à fin 2017). Ces puissances doivent être

rapportées aux facteurs de charge (variant d'une énergie à une autre et d'une installation à une autre) afin de connaître le volume d'électricité produit in fine.

Le parc éolien de l'UE, dont la puissance cumulée a dépassé 169 GW à fin 2017, a produit 336 TWh en 2017, soit l'équivalent de « 11,6% de la demande électrique moyenne de l'UE » selon WinEurope. Au Danemark, la production éolienne de 2017 équivaldrait même à 44% de la demande électrique nationale (cette production n'intervenant toutefois pas nécessairement aux heures de consommation).

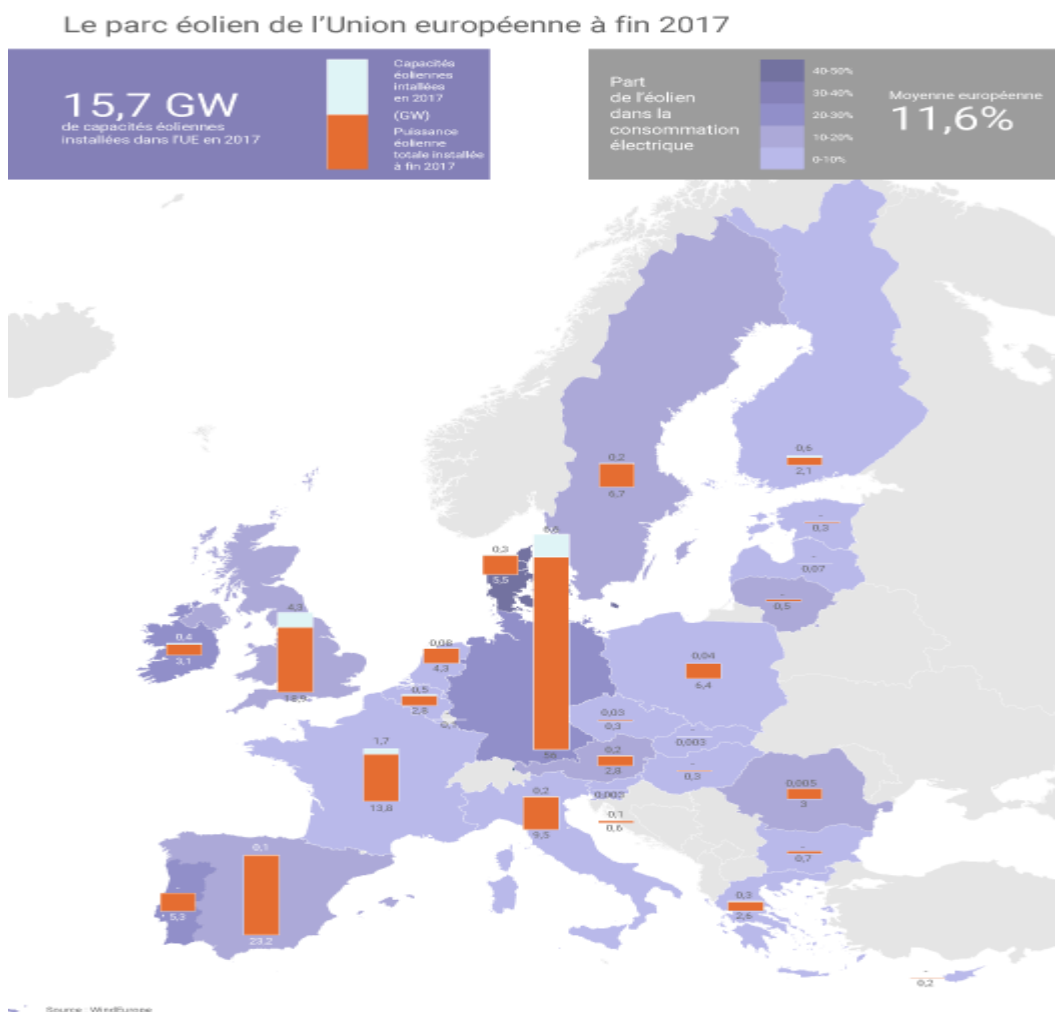


Figure.1.12-Le parc éolien de l'union européenne [70].

Au niveau mondial, les capacités éoliennes installées en 2017 se sont élevées à 52,6 GW, soit une baisse d'environ 4% par rapport à 2016 selon le GWEC (Global Wind Energy Council). Ce léger recul reflète, selon le secrétaire général du GWEC Steve Sawyer une plus grande maturité de la filière, «en transition vers un système basé sur le marché » et en compétition avec d'autres technologies (désormais) plus subventionnées.

Parmi les faits marquants de 2017 retenus par le GWEC figure un appel d'offres en Allemagne d'avril dernier ayant retenu 3 projets éoliens offshore ne demandant aucune subvention[70].L'organisation signale par ailleurs les fortes chutes des coûts de production « dans des pays aussi variés que le Maroc, l'Inde, le Mexique et le Canada avec des projets à 0,03 \$/kWh et un récent appel d'offres au Mexique en dessous de 0,02 \$/kWh ».

Le GWEC n'a en revanche pas communiqué les données de production du parc éolien mondial en 2017, cette information devant être publiée ultérieurement. Selon les dernières données de l'AIE, l'éolien avait produit 838 TWh en 2015, soit un peu plus de 3% de la production électrique mondiale cette année-là.

Évolution de la puissance du parc éolien mondial

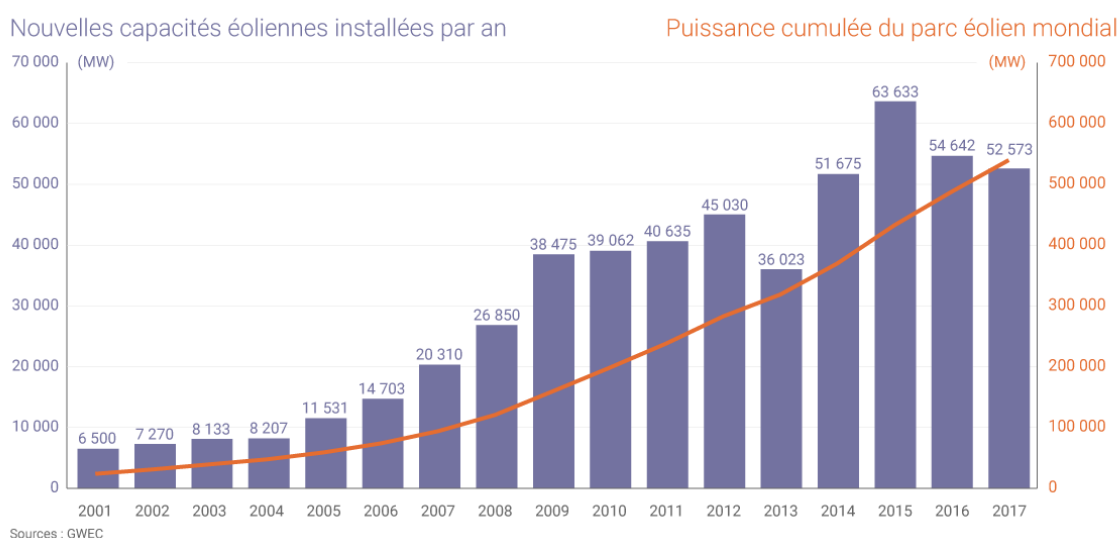


Figure.1.13- Evolution de la puissance du parc éolien mondial [70].

1.4.3 Développement De L'énergie Eolienne En Afrique

Le Maroc confirme son leadership africain en énergie éolienne et plus globalement en ENR (énergies renouvelables).En effet, à l'issue de l'année qui s'achève, le Maroc confirme son deuxième rang en Afrique en termes de capacité électrique installée à base d'énergie éolienne avec, en prime, le dépassement pour la première fois de la barre de 1000 MW. Mais si le Maroc creuse l'écart avec l'Égypte dont la puissance installée est en stagnation depuis 2015, c'est plutôt l'inverse qui se produit avec l'Afrique du Sud qui a augmenté ses capacités de plus de 50% au cours de la même période pour les hisser à 1582 MW grâce notamment à une année 2016 assez prolifiques en livraison de fermes éoliennes (plus de 400 MW).

| Puissance en MW / Année | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------------------------|------|------|------|
| Maroc | 787 | 882 | 1002 |
| Afrique du sud | 1053 | 1471 | 1582 |
| Egypte | 810 | 810 | 810 |

Tableau.1.1-Capacité installées en énergie éolienne [71].

Il faut dire les nouvelles éoliennes entrées en service au Maroc de début 2016 à fin 2017 n'ont apporté, en capacités additionnelles, « que » quelques 215 MW. Il s'agit, d'une part, de l'extension de capacité de 95 MW opérée en 2016 par Energie Eolienne du Maroc (filiale de Nareva Holding) sur son parc éolien d'Akhfennir (dans la région de Tarfaya) et, d'autre part, du lancement opérationnel.

Toutefois, avec pas moins de 1200 MW en chantier, le Maroc est le pays africain qui compte le plus de projets éoliens en cours de construction. Le plus important d'entre eux est celui en cours d'exécution par le consortium Nareva Holding, Siemens Wind Power et Enel Green Power et qui porte sur un total de 850 MW réparti entre Laâyoune (300 MW), Essaouira (200 MW), Midelt (150 MW), Tanger (100 MW) et Boujdour (100 MW). La mise en service progressive, entre 2018 et 2020, de ces cinq fermes éoliennes ainsi que d'autres projets plus ou moins de taille importante (comme celui du français EDF à Taza pour une capacité de 150 MW) pourrait potentiellement propulser le Maroc à la première marche du podium africain d'ici deux à trois ans [71].

1.4.4 Développement De L'énergie Eolienne En Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site de Grand Vent (Alger).

En raison de la rapidité extraordinaire avec laquelle les prix des technologies des énergies renouvelables ont baissé, nous voyons aujourd'hui qu'elles sont devenues une partie intégrante des écosystèmes nationaux. En 2016, la capacité de production mondiale à partir des énergies renouvelables a connu sa plus grande augmentation annuelle, ce qui représente environ 62% des ajouts nets à la capacité de production d'énergie.

En 2016, l'investissement dans l'énergie éolienne a globalement été le double des montants des investissements dans les combustibles fossiles. Au cours des 10 prochaines

années, les énergies renouvelables représenteront 56% de la capacité mondiale de production d'électricité. Sur les 300 GW de capacité ajoutée chaque année, 19% devrait être d'origine éolienne, ce qui signifie 95 GW de capacité supplémentaire par an. Les énergies renouvelables sont l'avenir et nous croyons qu'elles peuvent apporter une grande valeur à l'Algérie. Nous avons vu globalement que l'énergie éolienne est une source de puissance compétitives à faible LCOE et, dans certains cas, moins chères que l'énergie conventionnel. L'Algérie a un grand potentiel en énergies renouvelables car elle jouit de ressources éolienne abondante. Selon les estimations initiales, l'Algérie dispose de nombreuses zones qui bénéficient de vents forts de 7-9m/s.

Nous sommes confiants qu'une fois plus de données collectées dans le pays, nous verrons que le vent est une excellente ressource à exploiter pour l'avenir de la production d'électricité algérienne [72].



Figure.1.14- Eolienne D'drar

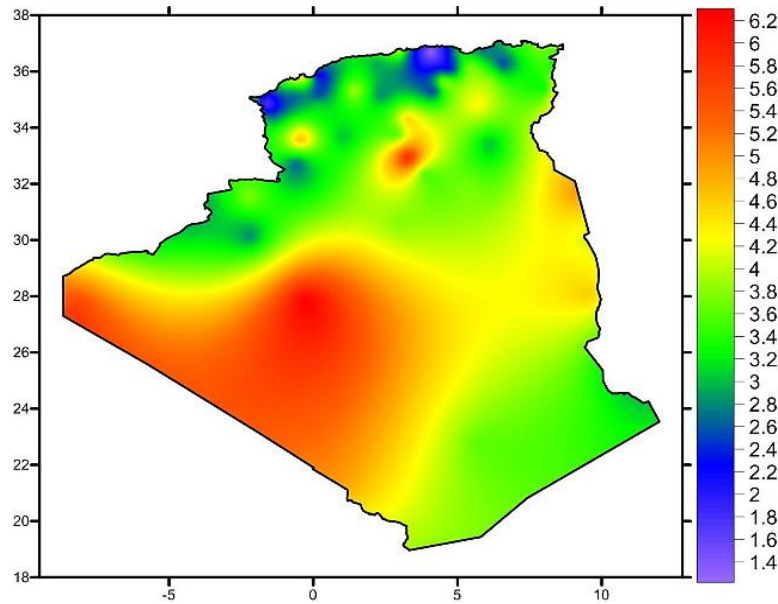


Figure.1.15- Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol [2].

Pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent moyennes doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence étant de 10 mètres. Cependant, avoir de grandes vitesses ne suffit pas. En effet, la disponibilité de cette ressource éolienne doit être importante. En d'autres termes, le nombre d'heures pendant lesquelles la vitesse du vent est élevée doit être important sur l'année. Selon une étude effectuée par l'Européen Wind Energy Association, le coût de l'électricité produite par une ferme éolienne en Europe varie de 5 à 6.5 c€ si la disponibilité de l'énergie éolienne est de l'ordre de 2900 H/an. Dans les sites où la disponibilité est faible, de l'ordre de 1700 H/an, le coût de cette électricité produite varie de 7 à 10 c€.

Selon le premier Atlas Vent de l'Algérie établi par l'ONM en 1990, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats, qui avaient été obtenus à partir d'un traitement statistique des données vent couvrant jusqu'à 10 années de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER (figure 1.15).

1.5 TECHNOLOGIE DES EOLIENNE

1.5.1 Puissance des éoliennes

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique, a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles

solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables [8].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

| Echelle | Diamètre de l'hélice | Puissance délivrée |
|---------|----------------------|--------------------|
| petite | Moins de 12 m | Moins de 40 KW |
| moyenne | 12 à 45 m | 40 kW à 1 MW |
| grande | 46 m et plus | Plus de 1 MW |

Tableau.1.2- Différents catégories des éoliennes

Le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [9].

1.5.2 Différents Types D'éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles :

- Eoliennes à axe vertical (VAWT).
- Eoliennes à axe horizontal (HAWT).

1.5.2.a Eoliennes A Axe Vertical

Ce type d'éoliennes est le premier à être utilisé dans la conversion d'énergie éolienne. Leur rotor est monté verticalement par rapport à la terre. Leur fonctionnement est basé sur la poussée axiale du vent et son incidence sur l'arbre du système. Cette catégorie d'éolienne a vu plusieurs prototypes, mais deux seulement ont atteint l'étape d'industrialisation [10].

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 efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (figure 1.16).



Figure.1.16-Eolienne à axe vertical (Structure de Savonius) [11]

➤ **Le rotor de Darrius**

Conçue par l'ingénieur français George Darrius en 1931, l'éolienne de Darrius est caractérisée par ses pales de rotor en forme de « C » qui la font ressembler un peu à un «bateur d'œufs». Le rotor de Darrius fonctionne grâce à la portance et se base sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (figure 1.17) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (ex. montage d'une petite éolienne Savonius sur son même rotor). Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.

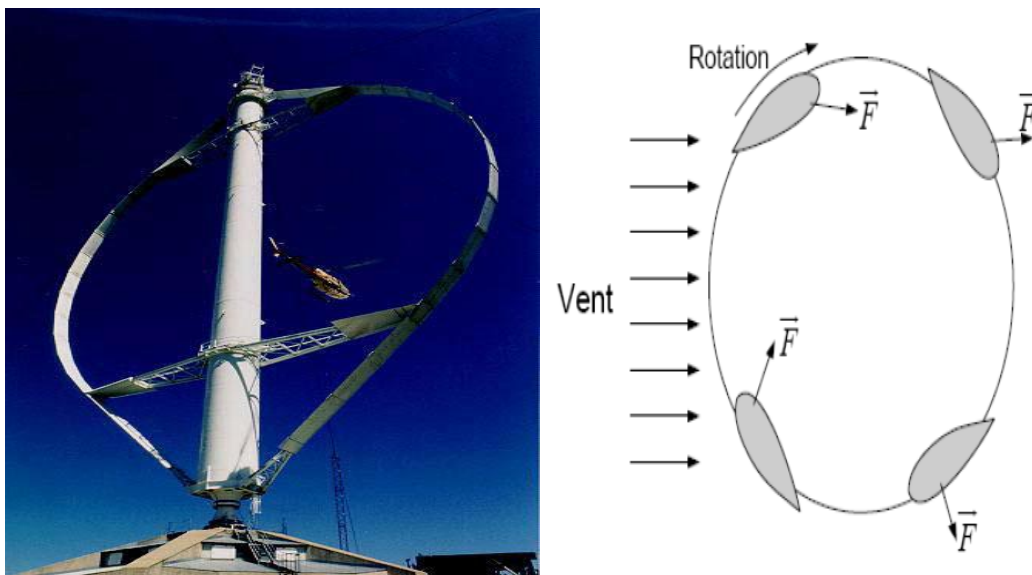


Figure.1.17-Eolienne à axe vertical (structure de Darrius)

➤ **Le rotor H-type**

D'autre type de rotor vertical est connu sous l'appellation de rotor en « H » ou le rotor de Musgrove, dont les lames prennent une forme de « H ». Ce type de rotor peut démarrer seule, produire de l'énergie dès les très faibles vents (1m/s), ne nécessite pas de régulation mécanique et résiste à des vents violents.

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- Accessibilité la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol [11].

1.5.2.b Eoliennes A Axe Horizontal

Les turbines à axe horizontal figure 1.18 sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [12]. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [13]. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.



Figure.1.18-Eolienne à axe horizontal.

1.5.3 Principaux Constituants D'une Eolienne A Axe Horizontal.

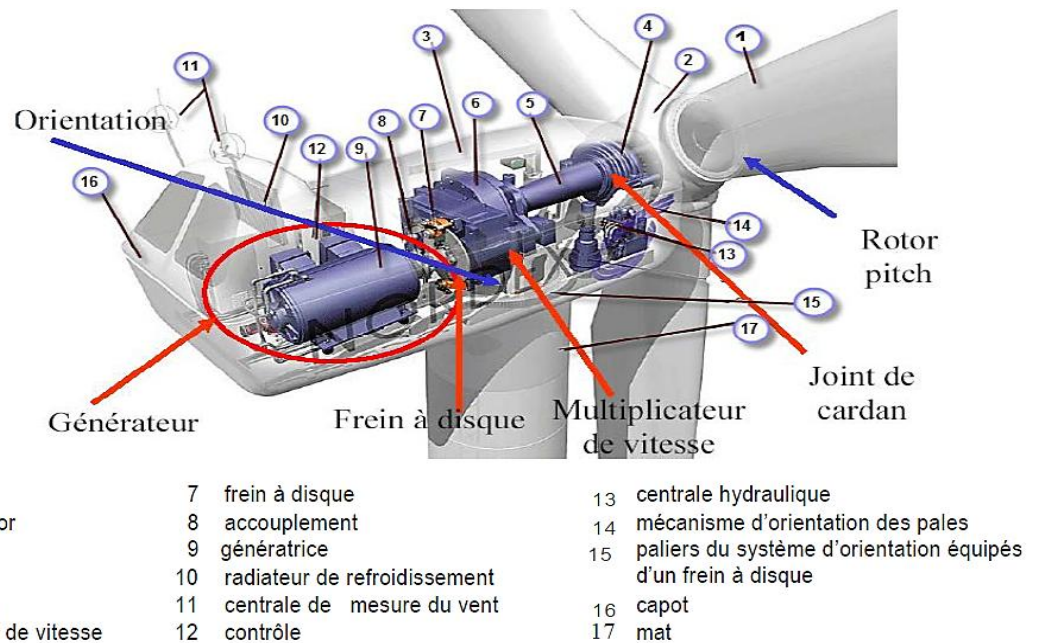


Figure.1.19-Eléments constituant une éolienne Nordex S77 (1500 kW) [14].

ENERGIE CINETIQUE DU VENT – CONVERSION EN ENERGIE MECANIQUE

1.6.1 Loi de BETZ

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

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à

travers le rotor V_2 soit $V_1+V_2/2$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

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

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

$$P_t = \frac{m(V_1^2-V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_t = \frac{\rho S (V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

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

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

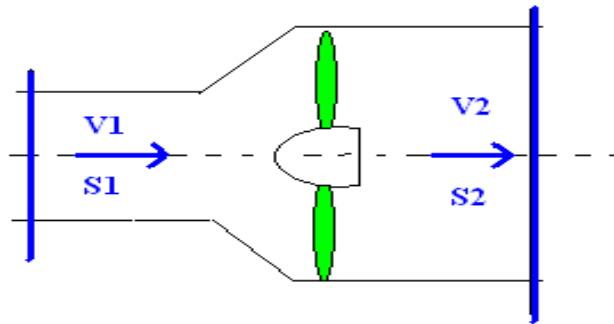


Figure.1.20-Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{(1+(\frac{V_1}{V_2})(1-(\frac{V_1}{V_2}))}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure1.21), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_t}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

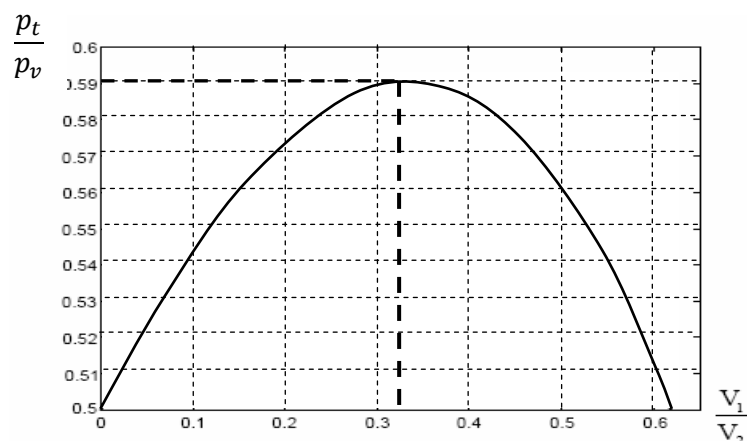


Figure.1.21-Coefficient de puissance

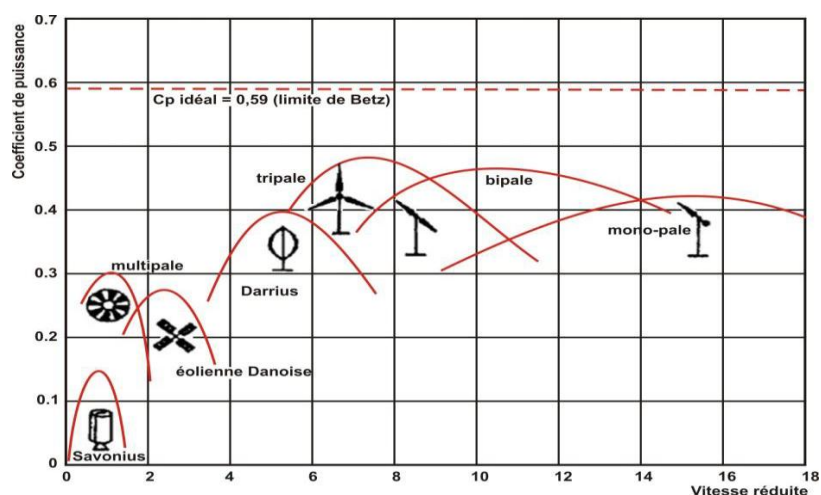


Figure.1.22-Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines [16].

Les aérogénérateurs à usage industrie, possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de (45 mètres) pour des éoliennes de plusieurs mégawatts avec des mats de plus 100 m. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre le rendement et le coût .Ces aérogénérateurs présentent des rendements très acceptables et sont retenus par les producteurs industriels. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, elles présentent des rendements meilleurs [17].

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

1.6.2 Coefficient De Couple

Le coefficient de couple C_c est assez proche du coefficient de puissance C_p où du couple aérodynamique est la suivante :

$$C_{a\acute{e}r} = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (1.6)$$

Avec

$$\Omega_t = \frac{\lambda \cdot v}{R} \quad (1.7)$$

Et

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (1.8)$$

D'où

$$C_{a\acute{e}r} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{R P_t}{\lambda \cdot v} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 \quad (1.9)$$

La valeur du coefficient de couple C_c est déterminée par:

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{a\acute{e}r}}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot R \cdot v^2} \quad (1.10)$$

1.7 SYSTEMES DE REGULATION AU NIVEAU DE LA TURBINE

1.7.1 Bilan Des Forces Sur Une Pale

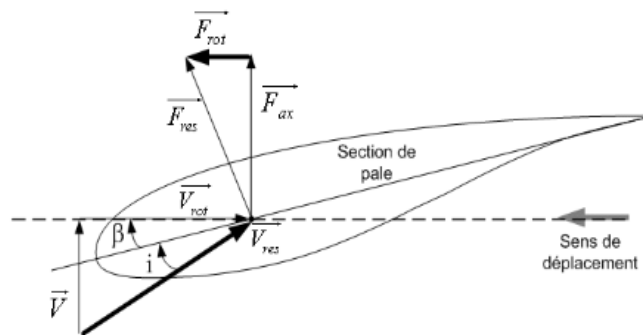


Figure.1.23- Bilan des forces sur une pale

La figure 1.23 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [21]. La vitesse du vent arrivant face à 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 compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

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

Le dimensionnement en puissance d'un système de conversion d'énergie éolienne (la turbine, le générateur, etc...) est prédéfini pour fonctionner à une vitesse du vent nominale comme il est indispensable de limiter la vitesse du vent captée pour nominaliser la puissance convertie par la turbine et empêcher la destruction de tout le système. Le réglage de la puissance captée par la turbine se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend de l'angle d'incidence α et de calage β . Il existe trois méthodes principales pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et la limiter lorsque la vitesse du vent est trop élevée.

1.7.2 Contrôle Par Angle De Calage Variable (PITCH CONTROL)

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à contrôler la puissance mécanique générée par la turbine pour les faibles et fortes vitesses du vent. Pour un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé (pitch control). Pour modifier les performances de la turbine, plus précisément le coefficient de puissance, on varie l'angle d'orientation de ces pales lors des fortes vitesses du vent. Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales, donc l'angle d'incidence, ce qui limite l'action des forces aérodynamiques exercées sur les pales. Cela réduit considérablement toutes les contraintes sur la turbine face aux fortes vitesses du vent, tout en maintenant un couple mécanique constant qu'on peut annuler par une mise en drapeau [59].

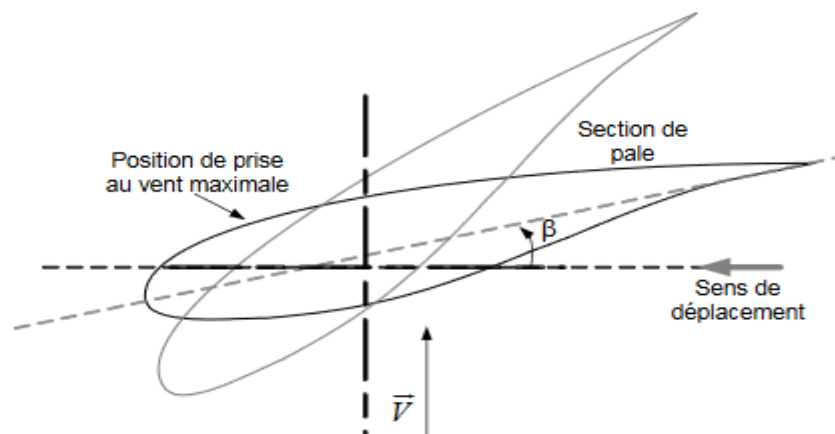


Figure.1.24- Variation de l'angle de calage d'une pale.

1.7.3 Contrôle Par Décrochage Aérodynamique Passif (PASSIVE STALL)

Ce système est plus léger et moins coûteux que le système précédent, à cause de l'absence du système de contrôle de l'angle de calage; comme il est simple et robuste, du fait qu'il ne dispose d'aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. L'angle de calage est fixe, alors que l'angle d'incidence varie avec la vitesse du vent incident, et son augmentation entraîne une augmentation de la traînée, un décrochage progressif des pales et un maintien de la vitesse de rotation de la turbine constante.

Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine. Aussi, il faut s'assurer que pour une certaine vitesse du vent, l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée [59].

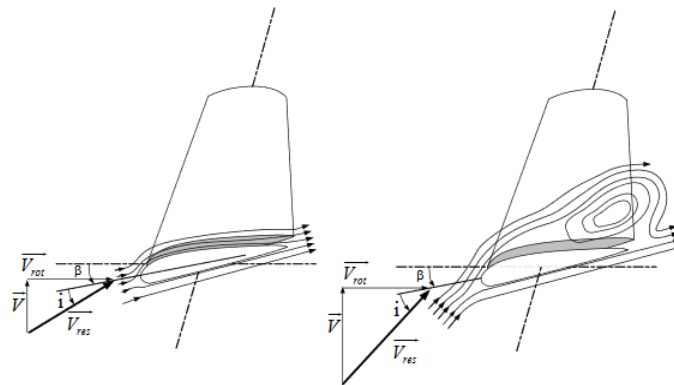


Figure.1.25-Flux d'air sur un profil de pale " stall ".

1.7.4 Contrôle par décrochage aérodynamique actif

Ce système est l'hybridation des deux systèmes décrits précédemment. Il est utilisé pour les systèmes de très grandes puissances. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est plus simple et moins coûteux [22].

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones figure (1.26).

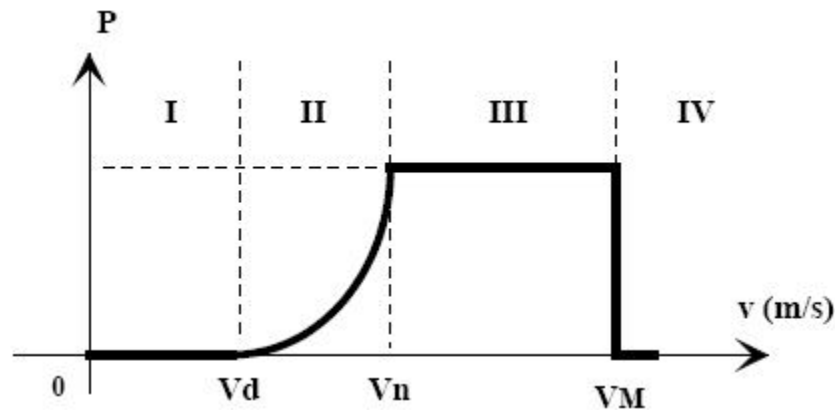


Figure.1.26- Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

- La zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v .
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ,
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

1.8 CLASSEMENT DES EOLIENNES

1.8.1 Eoliennes A Vitesse Fixe [23]

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (voir figure 1.27). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).

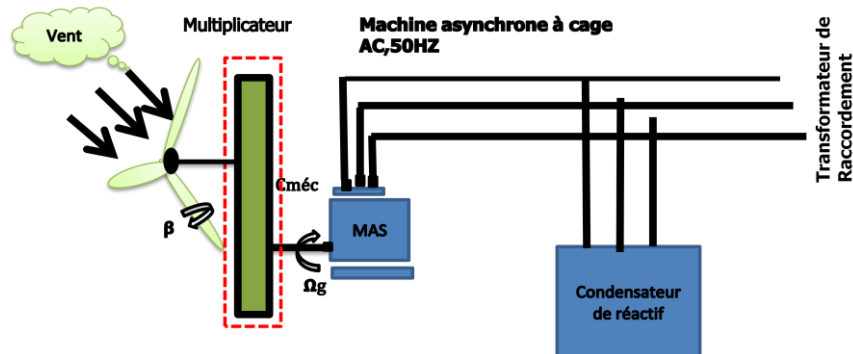


Figure.1.27-Eolienne à vitesse fixe directement connectée au réseau électrique.

Ce type d'éolienne n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée, d'autant plus que la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau. Certaines éoliennes de ce type sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales (stall control). L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. La structure du rotor de la turbine est ainsi plus simple, mais les possibilités de réglage de la puissance sont encore plus limitées.

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure 1.28.

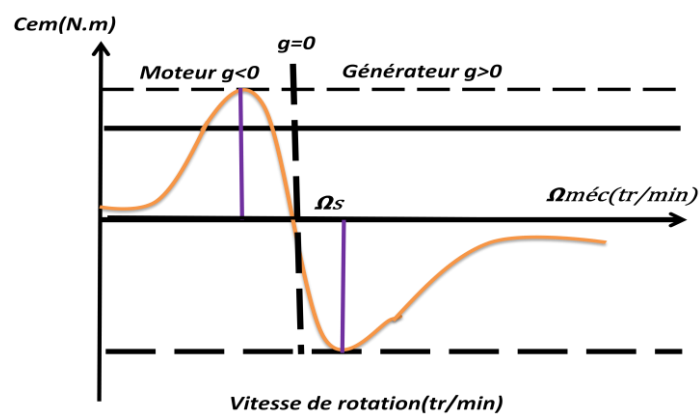


Figure. 1.28-Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone.

1.8.1.a Les Avantages De L'éolienne A Vitesse Fixe

Les principaux avantages de ce type d'éoliennes sont [24]:

- La simplicité d'implantation.
- L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- Une grande fiabilité.
- Un faible coût.

1.8.1.b Les Inconvénients De L'éolienne A Vitesse Fixe

Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [24]:

- Une puissance extraite non optimisée (On rate les maxima théoriques).
- Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.

- Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- La perte du contrôle de la puissance réactive.
- L'absence de contrôle du système de magnétisation de la génératrice.

1.8.2 Eoliennes A Vitesse Variable

Les machines électriques qui sont couramment utilisées pour ce genre d'éoliennes, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrone à cage, à double alimentation et synchrone à aimant permanent. La machine asynchrone à cage ou à double alimentation est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse, tandis que la machine synchrone à aimant permanent peut être couplée aussi à la turbine à travers un multiplicateur, ou il est couplé directement à la turbine, si la machine comporte un grand nombre de pôles évitant ainsi le multiplicateur de vitesse [27].

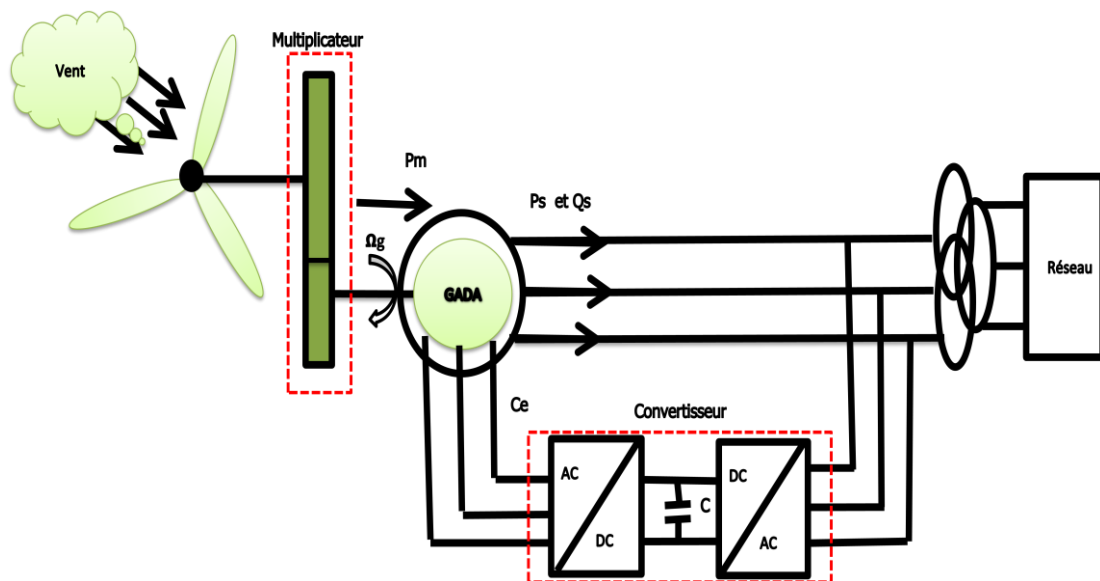


Figure.1.29-Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.

Le convertisseur statique a pour mission de découpler la fréquence du réseau de distribution électrique à la vitesse de rotation de la génératrice, c'est à lui de jouer le rôle d'une interface électronique de régulation de la fréquence et de l'amplitude [28].

1.8.2.a Les Avantages De L'éolienne A Vitesse Variable [24]

- Une exploitation optimale de l'énergie du vent.
- Une limitation des oscillations mécaniques.
- Une possibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.

1.8.2.b Les Inconvénients De L'éolienne A Vitesse Variable [24]

- Un raccordement indirect du système au réseau et son coût.
- Une grande complexité du système de puissance.
- Une perte d'énergie pendant le processus de conversion [22].

1.8.3 Intérêt De La Vitesse Variable

On donne sur la figure (1.30) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

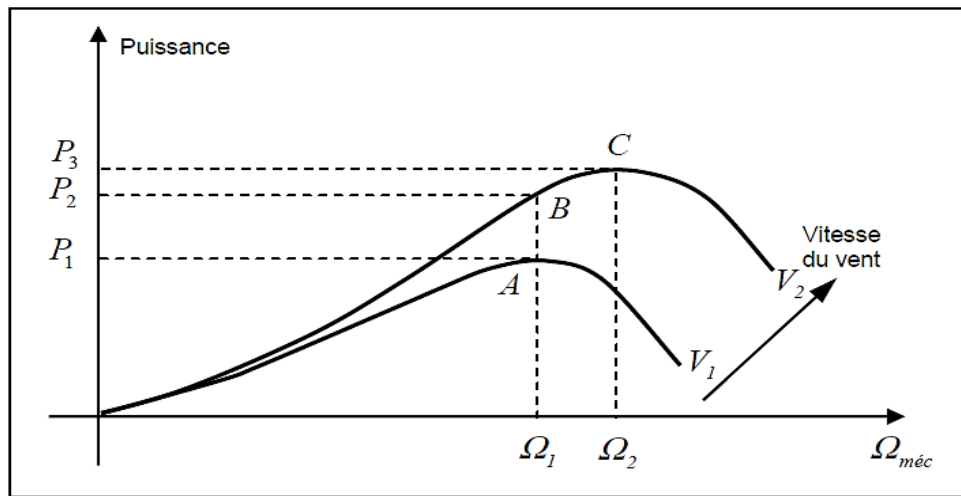


Figure .1.30-Eolienne à vitesse variable type MADA [18]

Pour une vitesse du 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 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 faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [29], [30]. Dans le cas général, les techniques qui permettent d'ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence Ω_{ref} calculée en fonction de la vitesse du vent pour maximiser la puissance extraite de ce dernier sont dites Techniques d'Extraction de Maximum de la Puissance (en anglais, Maximum Power Point Tracking (MPPT) [18].

1.9 APERÇU SUR LES SYSTEMES DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

Trois types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable : la génératrice synchrone, la génératrice asynchrone et la génératrice asynchrone à double alimentation.

1.9.1 Système Utilisant Une Génératrice Synchrone

La caractéristique (couple-vitesse) d'une machine synchrone utilisée en alternateur exige la maîtrise du synchronisme entre les deux forces électromotrices rotorique et statorique, elles doivent tourner à la même vitesse, ce qui pose un problème dans l'intégration de cette machine dans un système de production d'énergie éolienne. Une interface électronique entre le stator de la machine et le réseau est systématiquement insérée. Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base des aimants permanents qui sont plutôt coûteux, surtout ceux qui sont à base des terres rares, et risquent de perdre ses caractéristiques magnétiques à cause des fortes variations des couples électromagnétiques.

De plus, le convertisseur statique est conçu pour supporter la totalité de la puissance envoyée au réseau (figure1.31). Donc il nous faut des composants de puissances plus performants voire spéciaux.

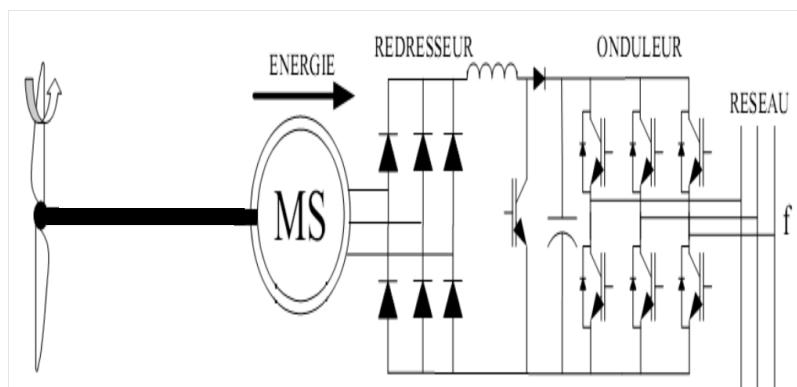


Figure.1.31- Alternateur dans une chaîne de conversion éolienne

1.9.2 Systèmes Utilisant La Machine Asynchrone

Les génératrices asynchrones, à cage d'écureuil ou à double alimentation, équipent actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Contrairement à l'habitude d'utiliser la machine asynchrone à cage d'écureuil comme moteur, cette machine est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système collecteur-balais ou les systèmes de contact glissant.

Par contre, pour s'assurer qu'on est dans la zone stable de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil on doit travailler aux faibles glissements (autour de

synchronisme (point $g=0$). Le nombre des paires de pôles de la machine est fixe, donc on doit fonctionner sur une plage très serrée (glissements inférieur à 2%).

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau (éolienne a vitesse fixe) (Figure1.31). De plus, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur de l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance du réseau.

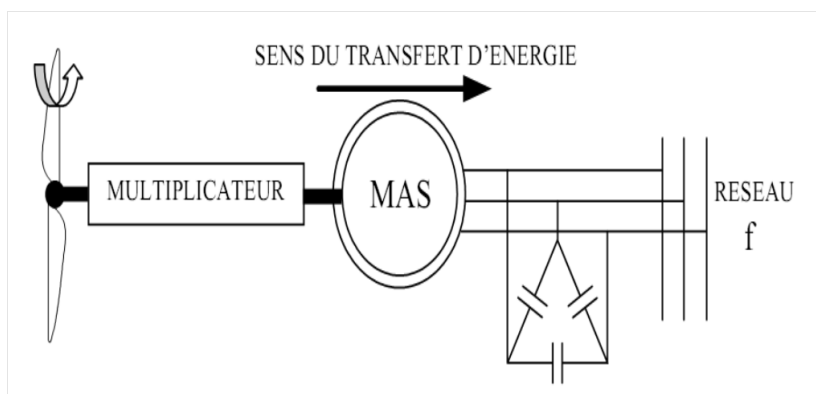


Figure.1.32-Machine asynchrone dans une chaîne de conversion éolienne

Par conséquent, la MADA a trouvée la voie libre pour s'émerger en puissance dans le domaine de la production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau (Avec un système de protection évidemment) et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique.

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux (figure1.33).

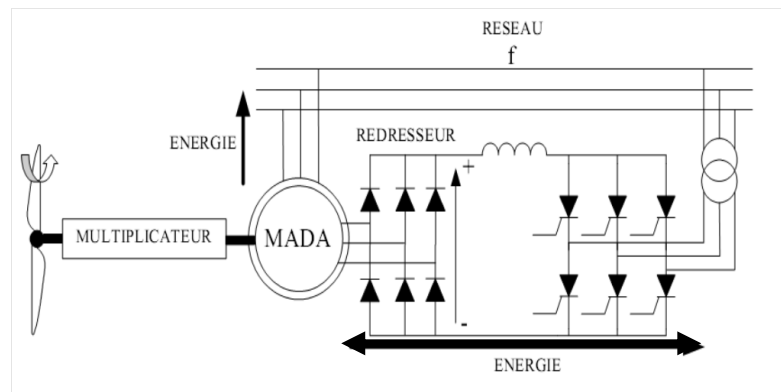


Figure.1.33-MADA dans une chaîne de conversion éolienne

1.10 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [31].

1.10.1 Avantages

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie renouvelable la moins chère à produire [32], [33].
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

1.10.2 Inconvénients

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit

aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique: la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production [79].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de concurrence la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

1.11 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les énergies renouvelables spécialement le système de conversion éolien qu'on va utiliser dans notre étude on a essayé de le présenter d'une façon générale, les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et leurs avantages et inconvénients les uns par rapport aux autres.

Nous avons utilisé le développement théorique des systèmes éoliens connu par la théorie de BETZ qui donne les performances d'un système éolien avec un coefficient théorique de 0.59 maximum qui reste inatteignable pour les éoliennes industrielles actuelles.

A la fin de ce chapitre, on a donné un aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les aérogénérateurs.

Le prochain chapitre, est consacré à la modélisation de la turbine éolienne ainsi que sa commande MPPT et la modélisation de la machine asynchrone à double Alimentation et du convertisseur statique.

CHAPITRE 2 :

*MODELISATION DE LA CHAÎNE DE
CONVERSION FOLIENNE A BASE
D'UNE GADA.*

2.1 INTRODUCTION

Pour commander la génératrice asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il faut connaître son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement, à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle.

Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres, avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande.

Actuellement, la plupart des systèmes de conversion d'énergie éolienne utilisent la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Cela est dû à de nombreux avantages comme fonctionnement à vitesse variable du générateur ($\pm 30\%$ autour de la vitesse synchrone).

Dans ce chapitre, nous allons orienter notre travail sur la modélisation individuelle de chaque élément de cette chaîne de conversion, à savoir :

- La turbine éolienne et sa commande pour maximiser et limiter le capteur de la puissance pendant les faibles et fortes vitesses du vent.
- La machine asynchrone à double alimentation (MADA) et son alimentation (onduleur)

2.2 TOPOLOGIE ET EMPLOI DES MACHINES ASYNCHRONES A DOUBLE ALIMENTATION

2.2.1 Description Du Système

Les configurations les plus populaires des systèmes de conversion d'énergie éolienne (SCEE) utilisent la GADA, comme le montre la figure 2.1. Dans cette configuration, l'éolienne tourne avec une vitesse de vent variable. Elle convertit d'abord la puissance cinétique en puissance mécanique puis en puissance électrique à travers le générateur (GADA).

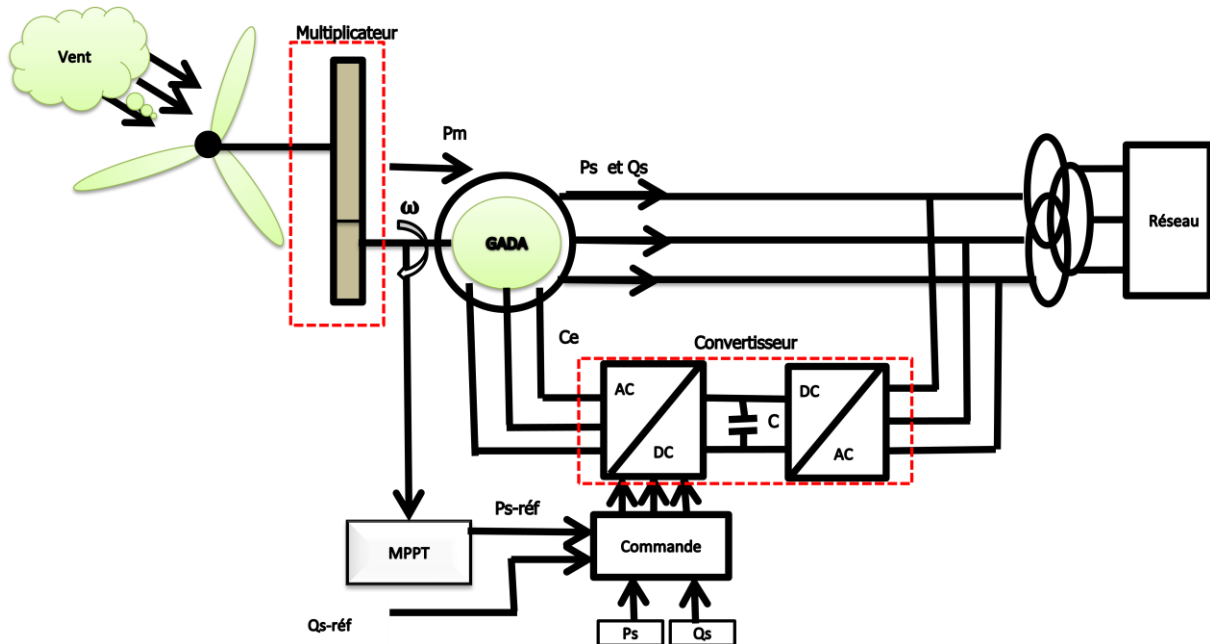


Figure.2.1- Schéma de la chaîne de conversion éolienne.

2.2.2 Mode De Fonctionnement De La MADA

La MADA est parfaitement commandable si toute fois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure (2.2). Dans cette dernière, P_s , P_r et $P_{méc}$ désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique [29].

En négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances comme suit [18] :

$$P_r = gP_s \quad (2.1)$$

$$P_{rés} = P_{méc} = P_s - P_r = (1 - g) \cdot P_s \quad (2.2)$$

2.2.2.1 Mode moteur hypo-synchrone

- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme.
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau.

2.2.2.2 Mode moteur hyper-synchrone

- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator.

2.2.2.3 Mode génératrice hypo-synchrone

- La turbine fournit une puissance mécanique P_m à La machine.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

2.2.2.4 Mode génératrice hyper-synchrone

- La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près.
- Une partie de cette puissance est transmise par l'intermédiaire du rotor.

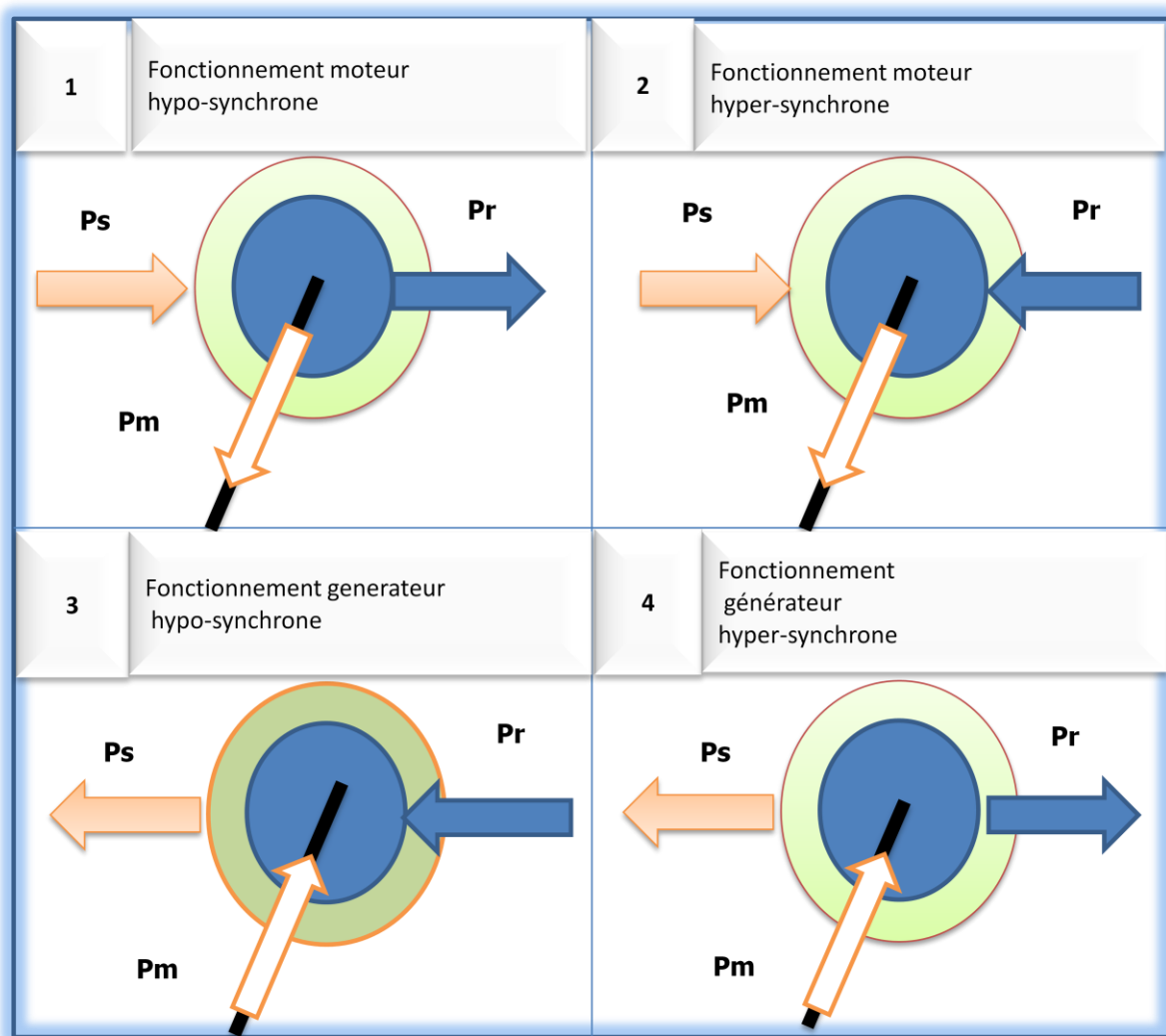


Figure.2.2- Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.

2.3 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

2.3.1 Partie Aérodynamique (Le Vent)

Le modèle du vent utilisé dans notre étude est donné par la relation [2] :

$$v(t) = 8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25 \sin(100\omega t) \quad (2.3)$$

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

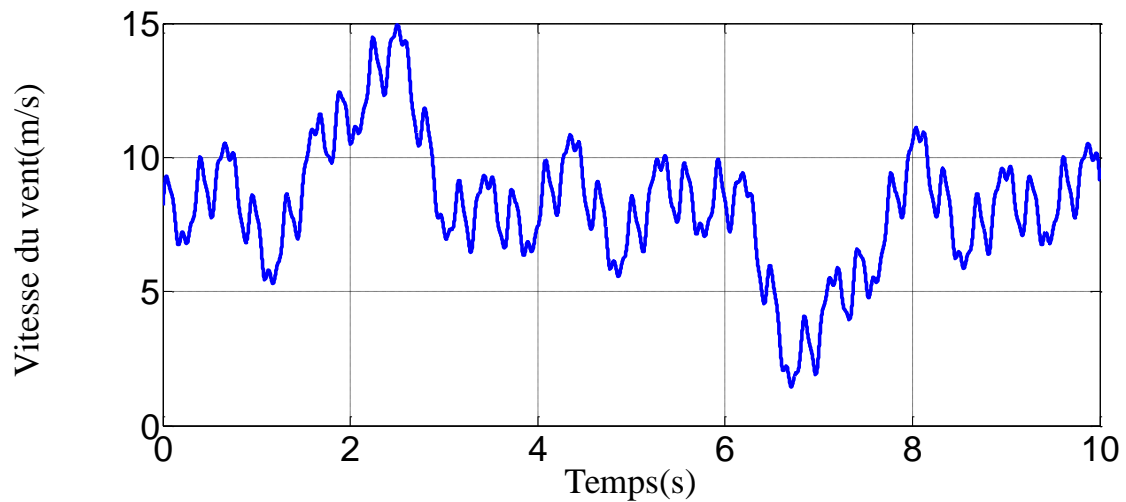


Figure.2.3-Profil du vent appliqué à la turbine

2.3.2 Modèle De La Turbine Eolienne

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système de l'aérogénérateur éolien. Le dispositif, est constitué d'une turbine éolienne tripale de longueur R entraînant une génératrice couplée à l'arbre d'un multiplicateur de vitesse de gain G.

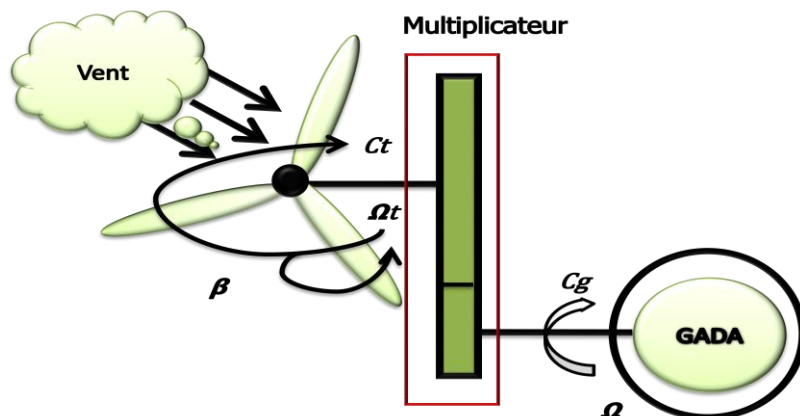


Figure.2.4-Schéma de la turbine éolienne (aérogénérateur).

➤ **Puissance Mécanique De La Turbine**

La turbine est un dispositif permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique, sa puissance est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (2.4)$$

Où v est la vitesse du vent (m/s), ρ est la masse volumique de l'air (approximativement 1.225kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C) et R est la longueur d'une pale ou le rayon de l'aérogénérateur (m).

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent et la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [2]:

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (2.5)$$

Où $C_p(\lambda)$ est le coefficient de puissance ou de performance qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La vitesse relative λ (en anglo-saxon tip speed ratio) est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent comme suit :

$$\text{Où : } \lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{tur}}}{v} \quad (2.6)$$

Pour une éolienne de 1.5M.W, l'expression du coefficient de puissance est donnée par[2]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(\frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (2.7)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.8)$$

$$C_1=0.5167, C_2=116, C_3=0.4, C_4=5, C_5=21, C_6=0.0068$$

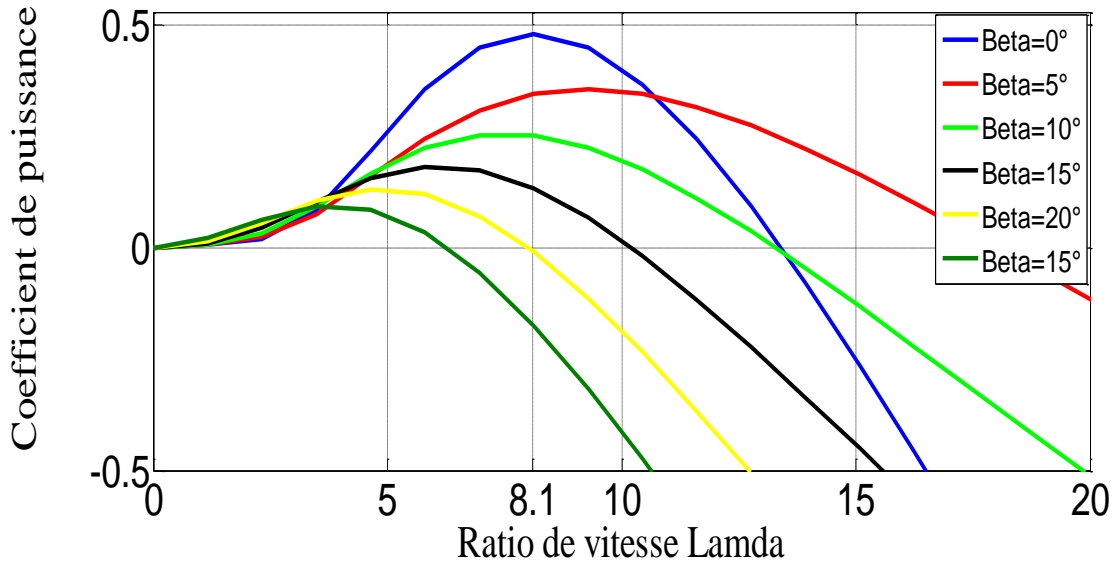


Figure.2.5- Coefficient de puissance Cp en fonction de λ pour différents β 1.5 M.W.

La figure 2.5 montre l'évolution de coefficient de puissance en fonction de ratio, on remarque qu'à chaque valeur de l'angle de calage β il existe un λ optimal, on peut remarquer aussi que ce coefficient C_p passe par un maximum ($C_{p-max} = 0.48$), pour un angle de calage ($\beta = 0^\circ$) et une valeur particulière du ratio de vitesse que l'on désigne λ_{opt} (où $\lambda_{opt} = 8.1$).

➤ **Couple mécanique de la turbine**

A partir de l'expression de la puissance produite par la turbine et connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique s'exprime comme suit

$$C_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (2.9)$$

➤ **Modèle de la partie mécanique**

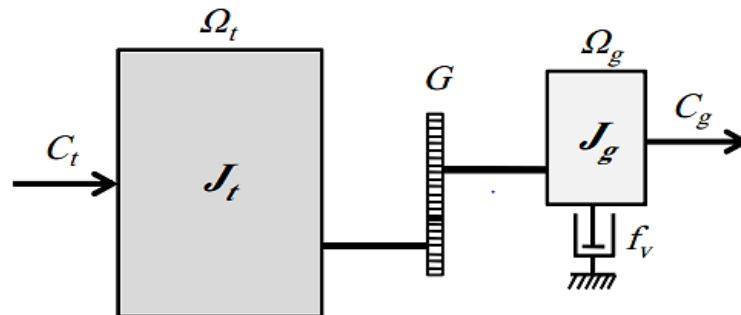


Figure.2.6-Modèle mécanique de la turbine éolienne

Avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.

J_g : Le moment d'inertie de la génératrice.

f_r : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

C_g : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur.

Ω_g : La vitesse de rotation de la génératrice.

G : Le gain du multiplicateur de vitesse.

➤ **Modèle du multiplicateur**

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur, il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [44].

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (2.10)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (2.11)$$

➤ **Modèle de l'arbre**

L'arbre est composé d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale est celle de la génératrice et l'inertie de la turbine ramenée au rotor de la génératrice, où [11] :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (2.12)$$

L'évolution de la vitesse mécanique dépend du couple appliqué au rotor de la génératrice qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice, d'un couple de frottement visqueux et d'un couple du multiplicateur de vitesse [63].

$$\frac{d}{dt} \Omega_g = \sum \text{des couples} = C_g - C_{em} - C_f = C_{méc} \quad (2.13)$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux K_f .

$$C_f = f_v \cdot \Omega_g \quad (2.14)$$

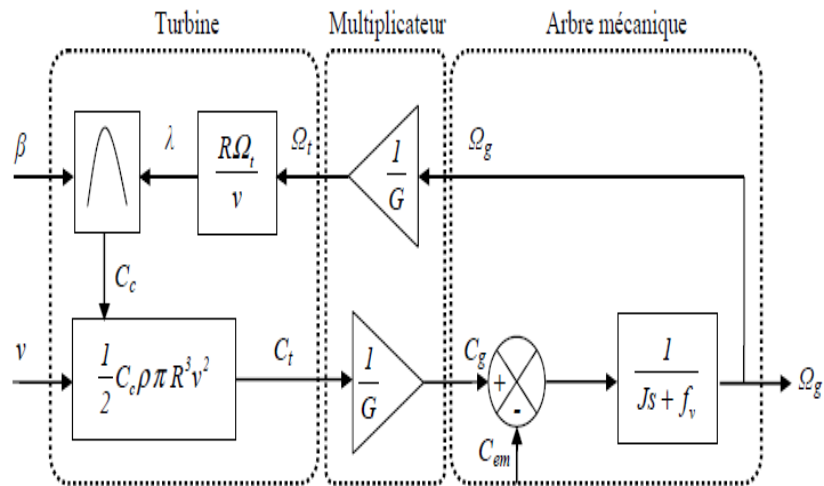


Figure.2.7-Schéma bloc du modèle de la turbine.

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique à partir de la puissance cinétique du vent et par action de l'angle d'orientation des pales. Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique de la turbine en couple du multiplicateur et en même temps, il transforme la vitesse mécanique en vitesse de la turbine.

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur auquel s'oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

2.4 STRATEGIE DE MAXIMISATION DE PUISSANCE MPPT

On distingue quatre zones de fonctionnement des turbines à vitesse variable comme l'indique la figure (2.8) concernant une éolienne de 1.5 MW. La première zone concerne la période de démarrage, la deuxième est la zone d'extraction de la puissance maximale "MPPT", la troisième zone est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale et la quatrième à la limitation de la puissance. Puisque nous sommes intéressés à la deuxième zone de fonctionnement, on va chercher l'extraction de la puissance maximale en temps réel par optimisation de la conversion énergétique. L'angle de calage des pales β étant fixe, on ajuste rotoriquement le couple électromagnétique de la génératrice afin de régler la vitesse de rotation et de rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne λ à sa valeur optimale et le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale [19].

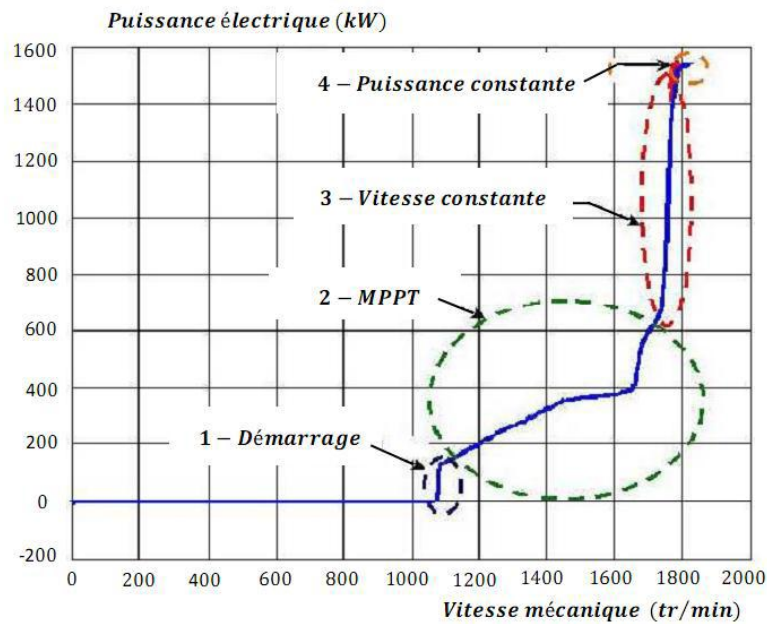


Figure.2.8-Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

- La zone 1, zone de démarrage de la machine ou la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit pas d'énergie ($P_{\text{turbine}} = 0$) ;
- La zone 2, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v .
- La zone 3, ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n .
- La zone 4, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aérogénérateur lorsque le vent devient trop important.

Au moment actuel, les stratégies adoptées visent à extraire le maximum de puissance du vent. Cette puissance est extraite lorsque la turbine fonctionne au coefficient de puissance maximale. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation du vent, pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance [11]. Dans notre travail, nous représentons deux stratégies de maximisation de la puissance :

- Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse ;
- Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

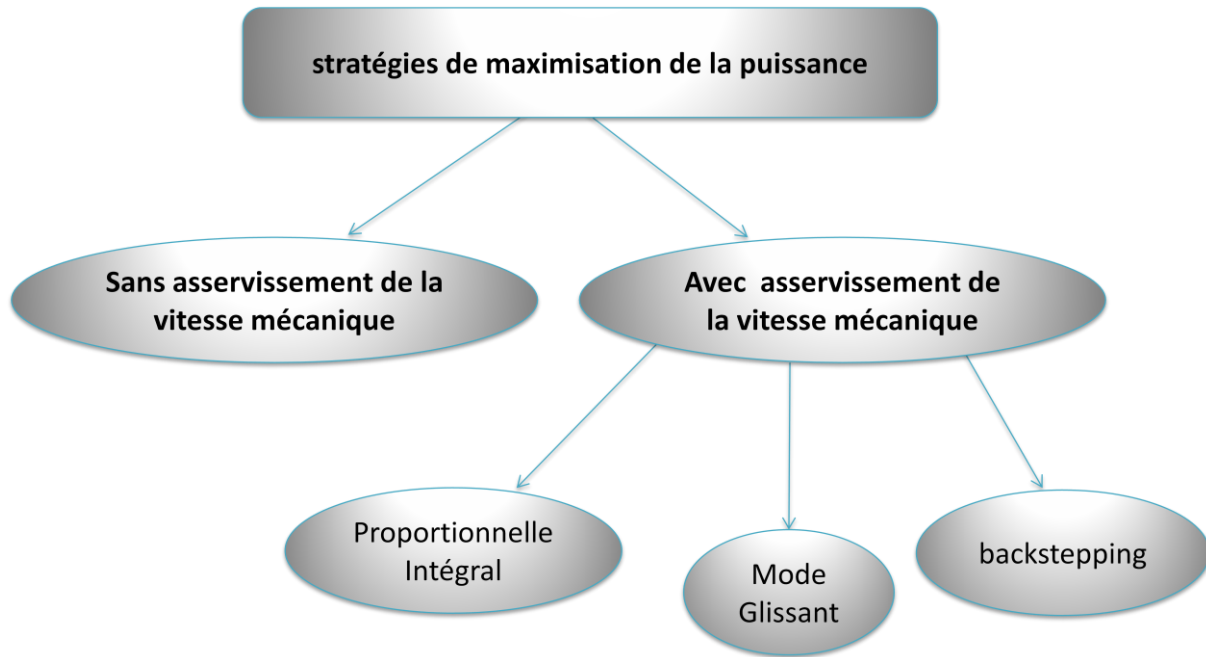


Figure.2.9-Stratégies de commande de la turbine.

2.4.1 Contrôle MPPT Sans Asservissement De La Vitesse Mécanique :

Cette première structure de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent, devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation (2.15), nous pouvons écrire [3] :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \quad (2.15)$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($C_f=f_{v,g}=0$) par rapport au couple mécanique C_{em} , on peut alors écrire :

$$C_g = C_{em} \quad (2.16)$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée $\widehat{\Omega}_t$ est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\widehat{\Omega}_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (2.17)$$

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

$$\widehat{V} = \frac{R \widehat{\Omega}_t}{\lambda_{opt}} \quad (2.18)$$

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

$$\hat{C}_t = \frac{1}{2} C_c^{\max} \rho \pi R^3 \hat{v}^2 \quad (2.19)$$

En remplaçant (2.18) dans (2.19), le couple de la turbine de référence s'exprime donc par :

$$\hat{C}_t^* = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^2} C_c^{\max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (2.20)$$

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

$$\hat{C}_g^* = \frac{\hat{C}_t^*}{G} \quad (2.21)$$

Le schéma bloc de la figure 2.10 résume le principe de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation

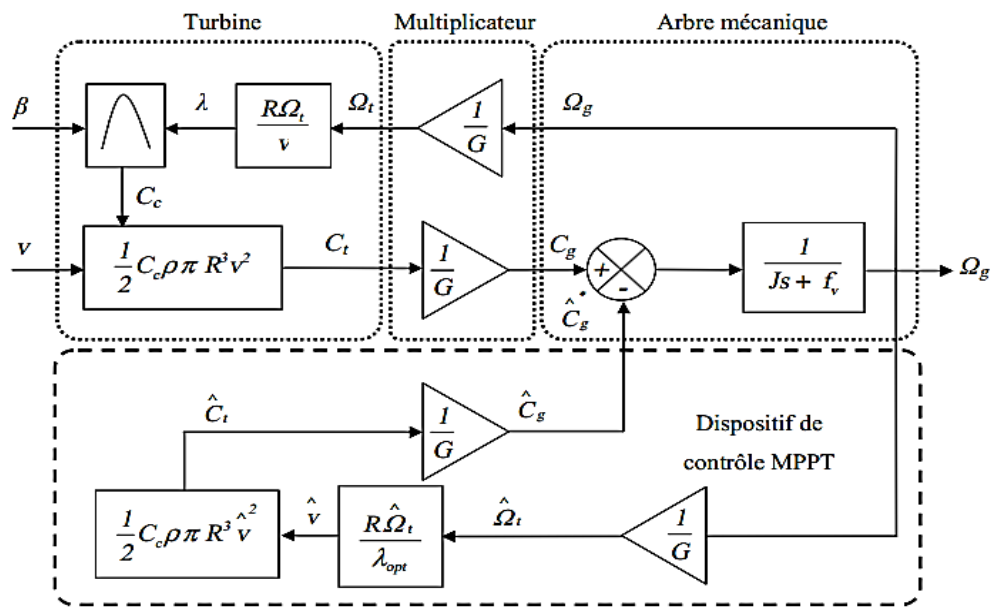


Figure.2.10 -Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique [26].

2.4.2 Contrôle MPPT Avec Asservissement De La Vitesse Mécanique :

Les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

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

Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué, comme la montre la figure 2.11 [45]. La vitesse de rotation de référence de la MADA Ω_g^* est obtenue à partir de l'équation (2.22) comme suit :

$$\Omega_g^* = G \cdot \Omega_t^* \quad (2.22)$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (2.21)$$

Le couple électromagnétique de référence C_g^* permettant d'avoir une vitesse de rotation Ω_g égale à sa valeur de référence Ω_g^* obtenue en sortie du régulateur de vitesse. Des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI), Mode Glissant(MG), Backstepping (BS) permettent ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la MADA C_g considéré comme une perturbation.

Dans ce travail, trois types d'asservissement sont envisagées pour égaler la vitesse mécanique à la consigne qui est fonction de la vitesse du vent.

- une régulation basée sur une loi linéaire de type PI (voir la synthèse dans l'annexe A)
- une régulation basée sur la technique non linéaire par mode glissant. (Voir la synthèse dans l'annexe B)
- une régulation basée sur la technique non linéaire par la méthode backstepping. (voir la synthèse dans l'annexe C)

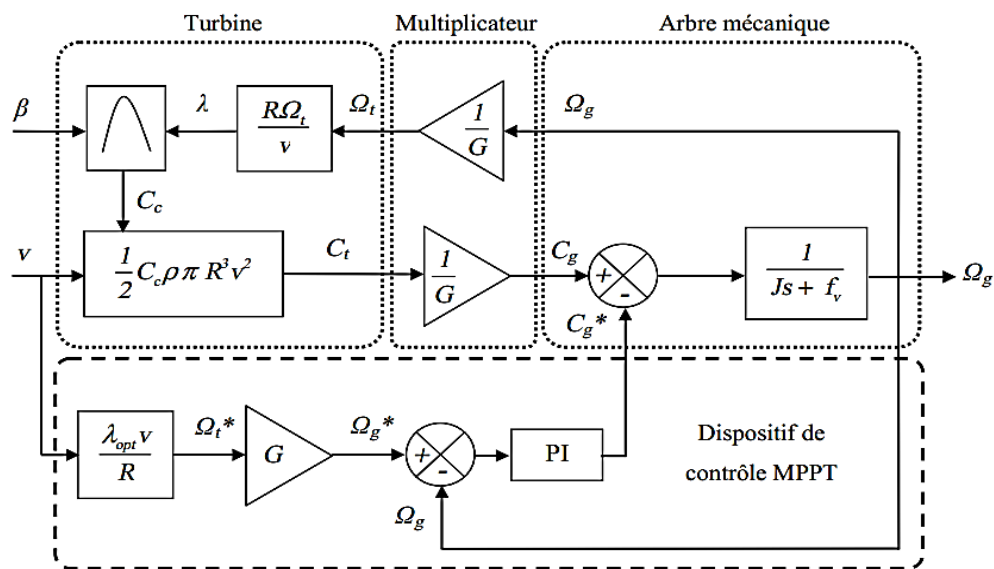


Figure.2.11-Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique [26].

2.5 RESULTATS DE SIMULATIONS

Ces deux structures de commande ont été simulées en considérant le profil de vent figure 2.3. Nous montrons les résultats obtenus pour les deux stratégies de commande MPPT utilisées.

Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés, pour une turbine éolienne, un multiplicateur et l'arbre de la génératrice, pour extraire le maximum de puissance MPPT avec les deux techniques de commande proposée, la première sans

asservissement de la vitesse mécanique et l'autre avec asservissement de la vitesse mécanique par les régulateurs suivants :

- proportionnel et intégral (PI).
- mode glissant(MG).
- méthode backstepping(Bs).

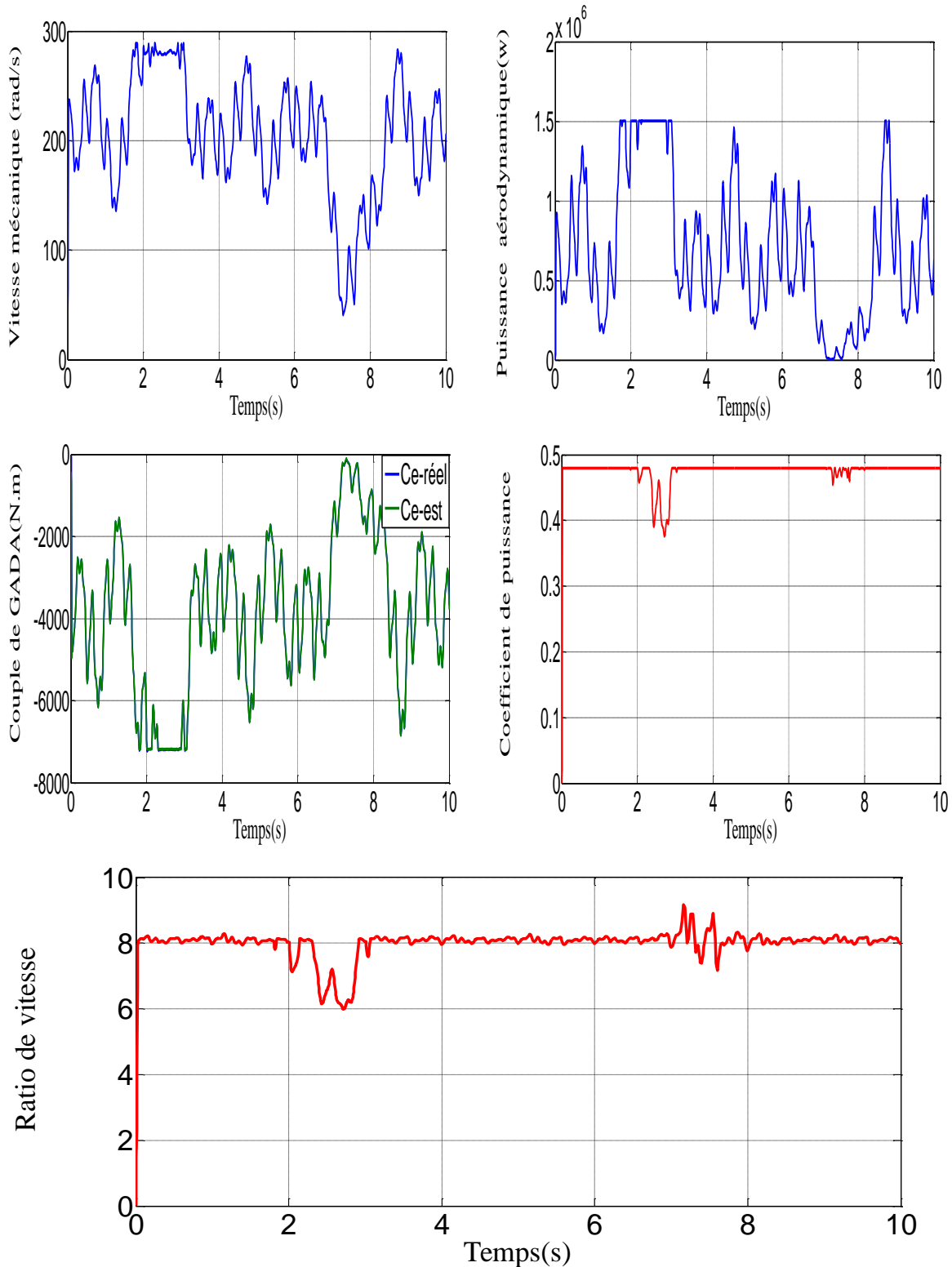


Figure.2.12- Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique

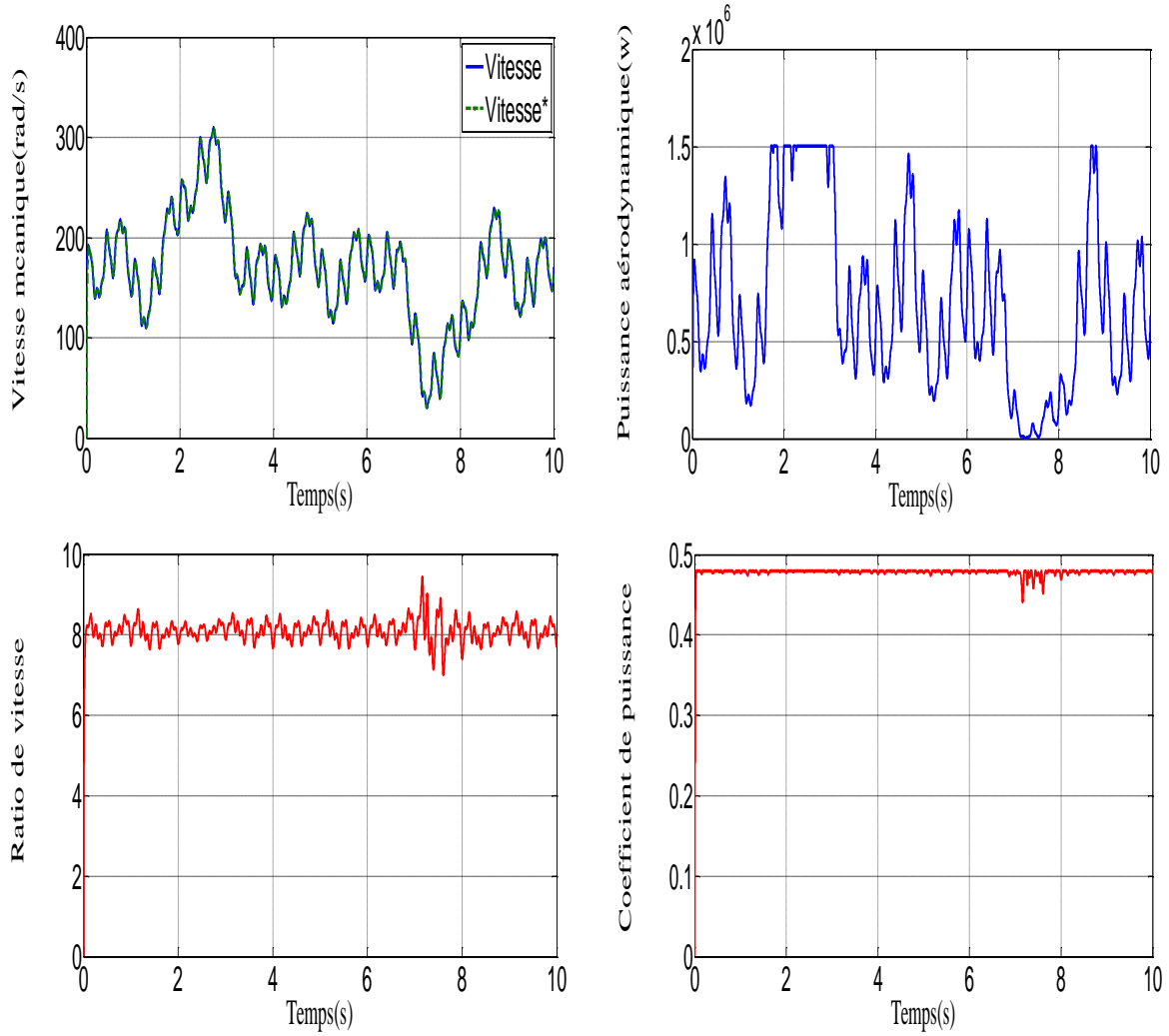
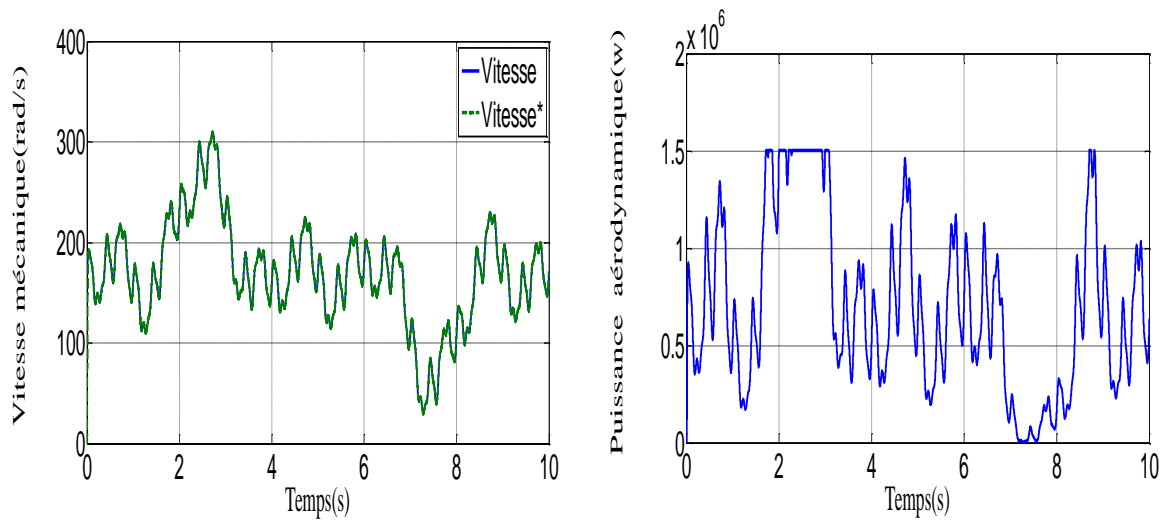


Figure.2.13- Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique(PI)



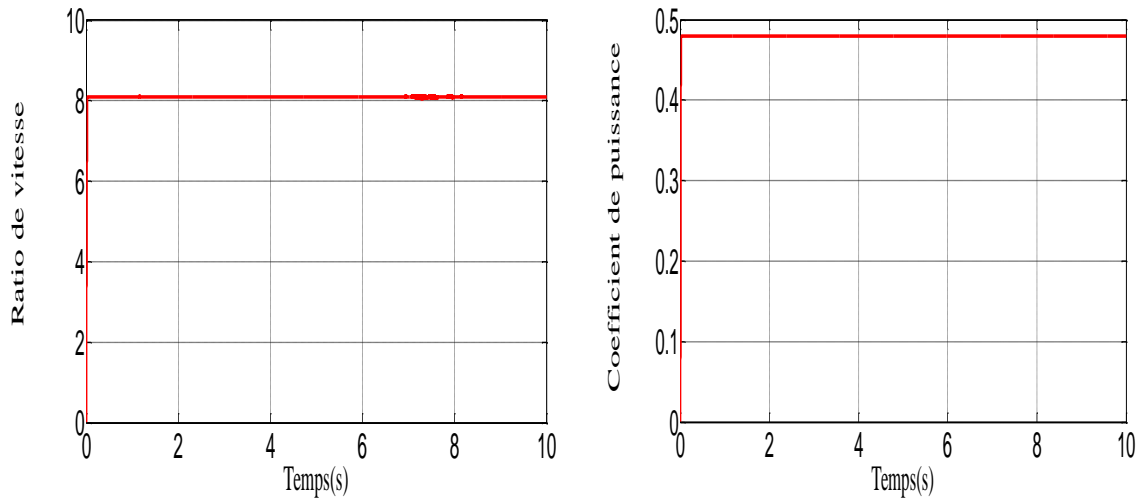


Figure.2.14- Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique(MG)

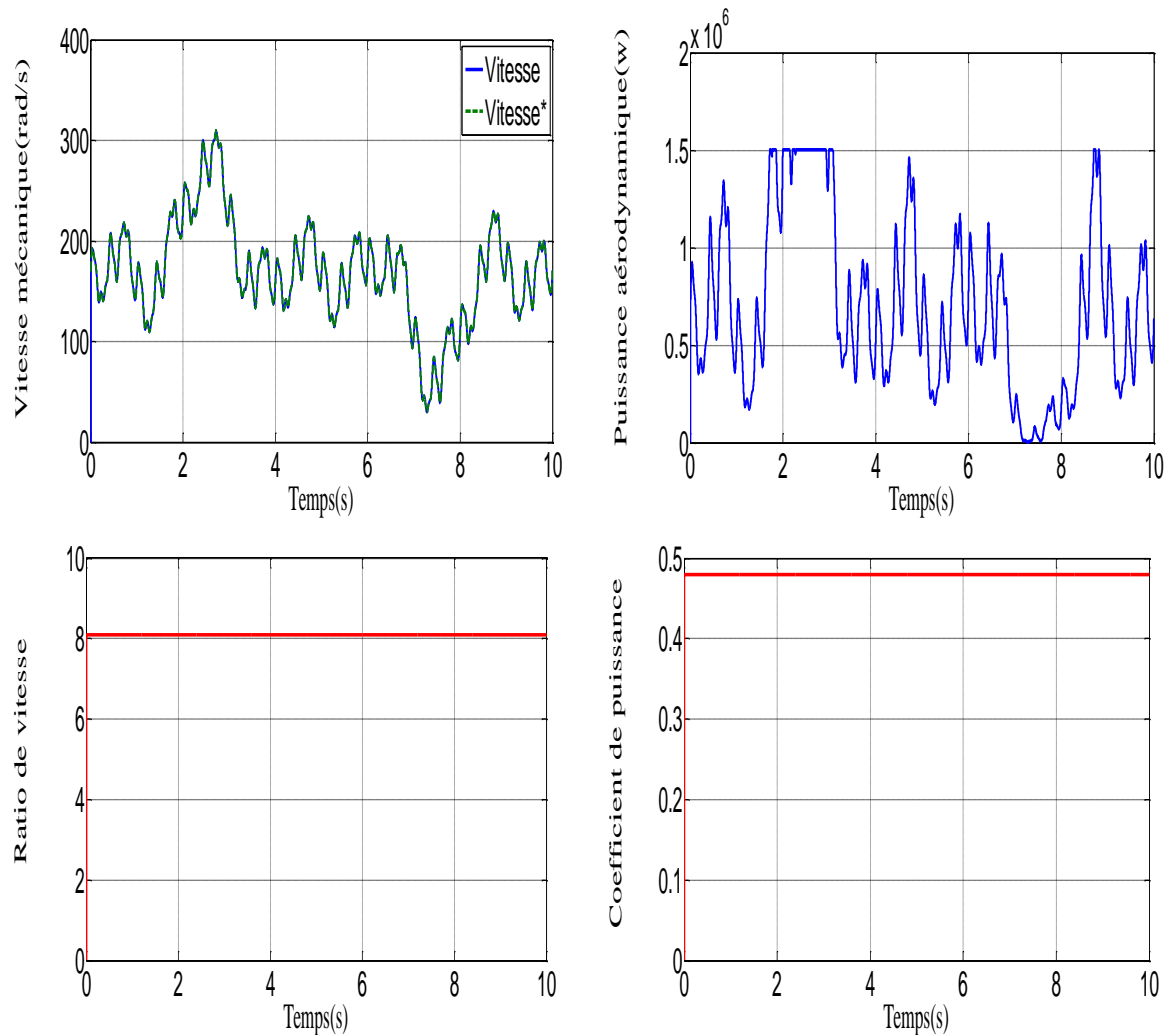


Figure.2.15-Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique(Bs).

➤ Etude Comparative Entre Les Techniques De Commande Proposées

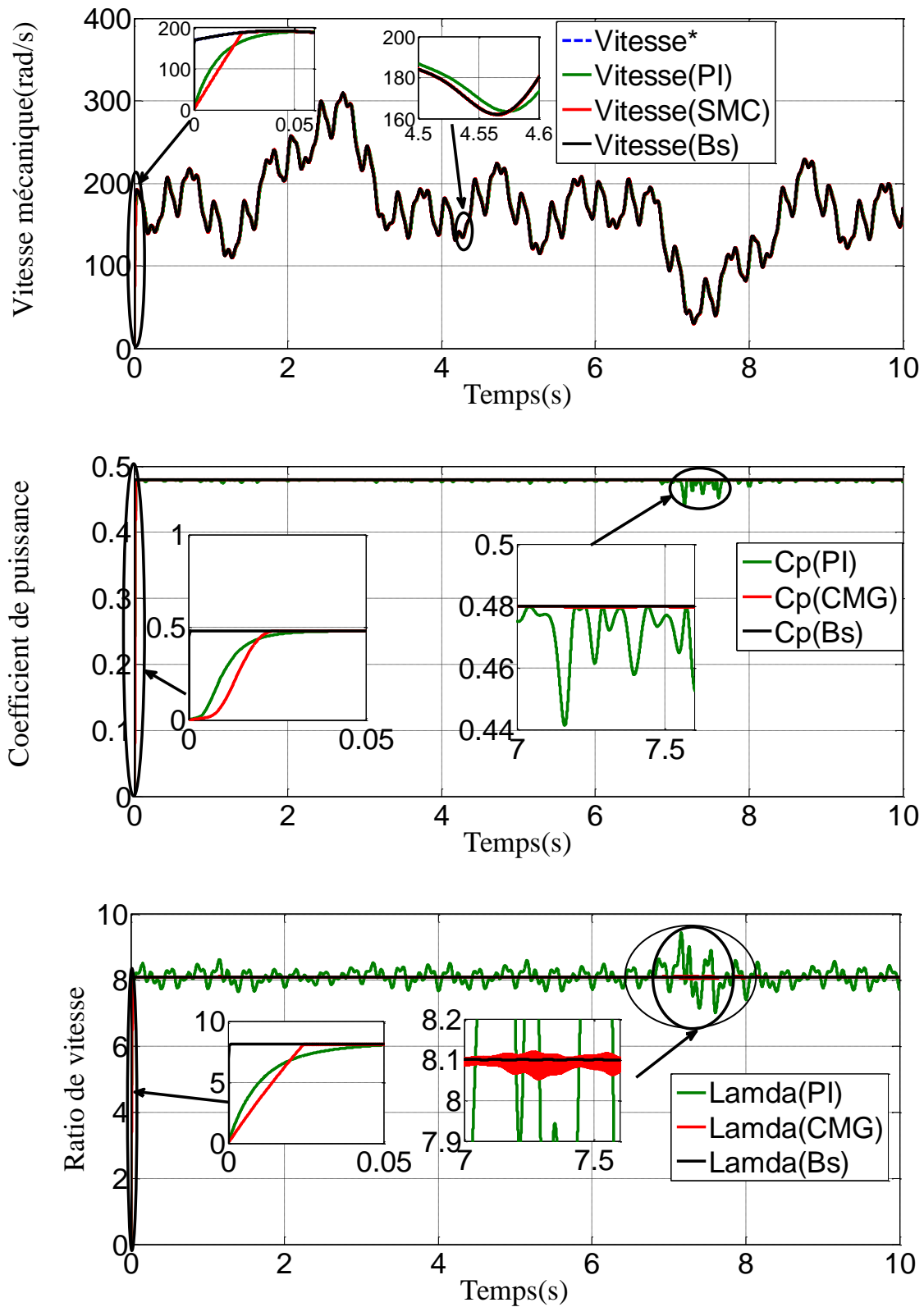


Figure.2.16-Comparaison entre les trois commandes proposées.

Ces deux structures de commandes ont été simulées en considérant un profil de vent en moyenne autour de 8.2 m/s, comme le montre la figure 2.3.

La figure 2.12 montre les résultats obtenus du contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique, on constate que les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent, ainsi que la puissance et le couple aérodynamique sont proportionnels au profil du vent proposé avec un maximum de puissance atteint. On remarque aussi, que la vitesse relative λ et coefficient de puissance C_p suivent leurs références, avec un léger temps de réponse au démarrage et une erreur statique importante en régime permanent. Ceci est dû à l'absence de régulation de la vitesse de la turbine.

Les figures (2.13), (2.14), (2.15) montrent les résultats obtenus du contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique pour les trois contrôleurs. Ce qui concerne le coefficient de puissance C_p , pour les trois stratégies de commande étudiées, ce coefficient prend une valeur maximale de 0,48 pour un angle de calage $\beta=0^\circ$. Le maximum de puissance est obtenu sans dépassement, cependant on peut remarquer que la consigne est suivie de manière identique en régime transitoire et permanent, malgré de légères fluctuations.

D'autre part, les réponses du système mettent en évidence un léger dépassement pour la vitesse relative au démarrage pour le contrôle avec le régulateur PI, alors que pour les deux autres stratégies suivent leur trajectoire sans aucun dépassement.

La figure 2.16 montre une étude comparative entre les trois types de commande proposée (PI, MG, BS) les résultats de simulations montrent l'efficacité du contrôleur par backstepping par rapport aux (PI) et mode glissant.

2.6 MODELISATION DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

2.6.1 Modèle Triphasé De La GADA :

Dans le cas de la production d'énergie par les éoliennes, la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) permet d'optimiser la puissance produite [8],[9]. En effet, compte tenu du comportement de la vitesse des courants de marée, la MADA permet de compenser ces variations dans des proportions acceptables, tout en garantissant une bonne qualité de l'énergie produite

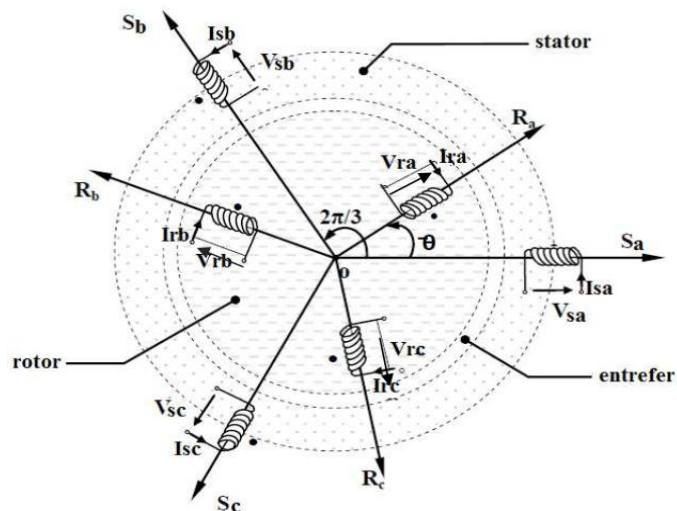


Figure.2.17- Représentation de la GADA dans le repère (a b c).

Nous admettons que la machine est bien construite et que les forces magnétomotrices sont à répartition spatiale sinusoïdale. Cela revient à considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

2.6.2 Hypothèses Simplificatrices

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet que la f.é.m. créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- L'additivité de flux.
- La constance des inductances propres
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques [46].

2.6.3 Les Equations Electriques De La GADA :

Les enroulements illustrés par la figure précédente obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$[u_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.23)$$

$$[u_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.24)$$

$[u_s] = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]^T$: Vecteur tension statorique

$[i_s] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$: Vecteur courant statorique

$[\Phi_s] = [\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}]^T$: Vecteur flux statorique

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistances du stator}$$

$[u_r] = [u_{ra} \ u_{rb} \ u_{rc}]^T$: Vecteur tension rotorique

$[i_r] = [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$: Vecteur courant rotorique

$[\Phi_r] = [\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$: Vecteur flux rotorique

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} : \text{Matrice résistances du rotor}$$

2.6.4 Equations Magnétiques Dans Le Repère (A,B,C) :

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$[\Phi_s] = [L_s] [i_s] + [M_{sr}] [i_r] \quad (2.25)$$

$$[\Phi_r] = [L_r] [i_r] + [M_{sr}] [i_s] \quad (2.26)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & L_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} : \text{La matrice d'inductances statoriques ;}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & L_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \text{ La matrice d'inductances rotoriques .}$$

$[M_{sr}]$: Est la matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor, Elle est donnée par

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Avec : $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

2.6.5 Equation Mécanique De La GADA :

L'équation du mouvement peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_g - K_f \Omega \quad (2.28)$$

J : moment d'inertie des masses tournants (Kg.m^2)

K_f : Coefficient de frottement en (Nm.s/rad)

C_{em} : Couple électromagnétique de la MADA (Nm)

C_g : Couple moteur fourni par l'organe d'entraînement en (Nm)

Ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor (Rad)

2.6.6 Modèle de la GADA dans le plan (d,q) :

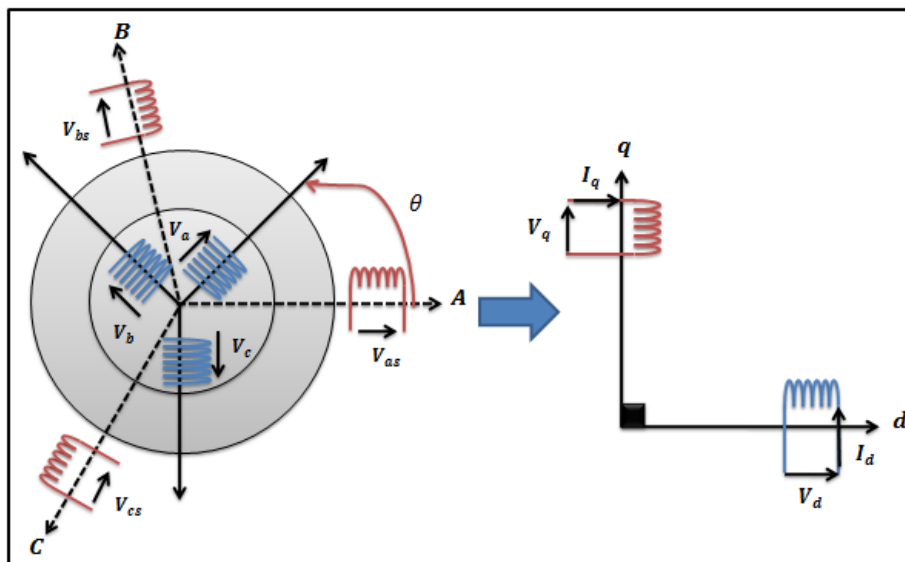


Figure.2.18- Passage de système triphasé au système biphasé [47].

La résolution de ce système d'équation est très difficile à cause de la dépendance des coefficients au temps. Ceci conduit à l'utilisation de la transformation de Park qui permettra de rendre ces paramètres constants et permet de réduire la complexité des systèmes d'équations.

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q. Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs d_s, q_s, d_r, q_r , dont les axes magnétiques sont liés aux axes (d-q) conformément à la figure 2.18 [48]. On désire transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes (d-q) lié au

champ tournant ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé, c'est à dire [49] :

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o).

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Son inverse donné par :

$$P(\theta)^{-1} = P(\theta)^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.6.7 Les équations électriques de la GADA dans le plan (dq) :

En appliquant la transformation de Park pour le système d'équations électriques du stator, rotor on aura :

➤ Stator

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \phi_{sq} \omega_s \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \phi_{sd} \omega_s \end{cases} \quad (2.31)$$

➤ Rotor

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \phi_{rq} (\omega_s - \omega_r) \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \phi_{rd} (\omega_s - \omega_r) \end{cases} \quad (2.32)$$

Avec : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ et $\theta_{sr} = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta_{sr}}{dt} = \omega_{sr} = \omega_s - \omega_r$

- u_{sd} et u_{sq} : les tensions statoriques dans le repère de Park.
- u_{rd} et u_{rq} : les tensions rotoriques dans le repère de Park.
- i_{sd} et i_{sq} : les courants statoriques dans le repère de Park.
- i_{rd} et i_{rq} : les courants rotoriques dans le repère de Park.
- ϕ_{sd} et ϕ_{sq} : les flux statoriques dans le repère de Park.
- ϕ_{rd} et ϕ_{rq} : les flux rotoriques dans le repère de Park.
- R_s et R_r : les résistances respectives des bobinages statorique et rotorique.
- θ_s et θ_r : les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les relations entre les flux et les courants sont exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (2.34)$$

2.6.8 Equation Du Couple Electromagnétique Dans Le Plan (dq) :

L'équation du couple électromagnétique (C_{em}) :

$$C_{em} = -\frac{3}{2}p \frac{M}{L_s} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (2.35)$$

2.6.9 Equation Mécanique :

Afin d'obtenir le modèle complet de la machine asynchrone doublement alimentée, il faut qu'on tienne compte de l'équation mécanique. En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est :

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_g - C_f \quad (2.36)$$

Le couple de frottement est donné par : $C_f = \frac{K_f}{p} \omega_r = K_f \Omega_{mec}$

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \left(\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \right) = -\frac{3}{2}p \frac{M}{L_s} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) - C_g - K_f \Omega_{mec} \quad (2.37)$$

2.6.10 Modèle De La MADA Avec Orientation Du Flux Statorique

En vue de la commande vectorielle de ce générateur, il convient de choisir un référentiel lié au champ tournant, lequel serait relatif à la fréquence 50Hz. Le repère de Park serait, de ce fait, synchronisé avec le flux statorique, dont l'axe d est aligné avec le vecteur de flux statorique, comme le montre la figure 2.19 [49]:

On a donc :

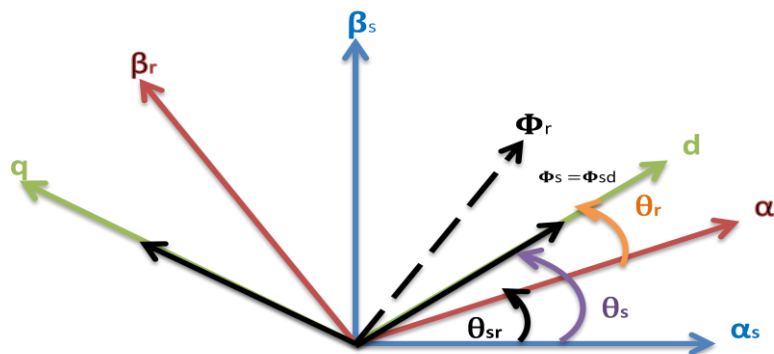


Figure2.19-Orientation du repère de Park [2].

Souvent dans le cas d'une MADA de moyenne et de grande puissance, la résistance statorique R_s est négligée lors de la synthèse de son modèle sous l'hypothèse d'orientation du flux statorique[2].

Le convertisseur côté rotor est contrôlé dans un cadre d-q à rotation synchrone, avec l'axe d orienté le long de la position du vecteur de flux statorique .

Dans cette approche, le contrôle découplé entre le stator, les puissances active et réactive sont obtenues. L'influence de la résistance du stator peut être négligée et le flux statorique peut être maintenu constant lorsque le stator est connecté à la grille. En conséquence [20]:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = 0 \\ u_{sq} = u_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\begin{cases} \phi_s = L_s \cdot i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = L_s \cdot i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (2.40)$$

A partir de l'équation (2.40), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (2.41)$$

En remplaçant dans l'équation des flux (2.33), les courants statoriques par l'expression (2.41), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \sigma \cdot L_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \phi_s \\ \phi_{rq} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (2.42)$$

$$\text{Avec : } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (2.42) par leurs expressions dans l'équation (2.31), on obtient

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_{rd} + g_s \frac{L_m u_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.43)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - g \cdot \omega_s \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} \\ u_{rd} = R_r \cdot i_{rq} + g \cdot \omega_s \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} + g \frac{L_m \cdot u_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.44)$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone, et le terme $(g L_m V_s / L_s)$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les puissances active et réactive sont donné par :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} u_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -\frac{3}{2} u_s \frac{L_m}{L_s} i_{rd} + \left(\frac{3u_s^2}{2L_s \omega_s} \right) \end{cases} \quad (2.45)$$

Le couple de la MADA aura pour expression :

$$C_e = -\frac{3}{2} p \frac{L_m u_s}{L_s \omega_s} i_{rq} \quad (2.46)$$

A partir des équations précédentes on réalise les schémas du modèle simplifié de la MADA :

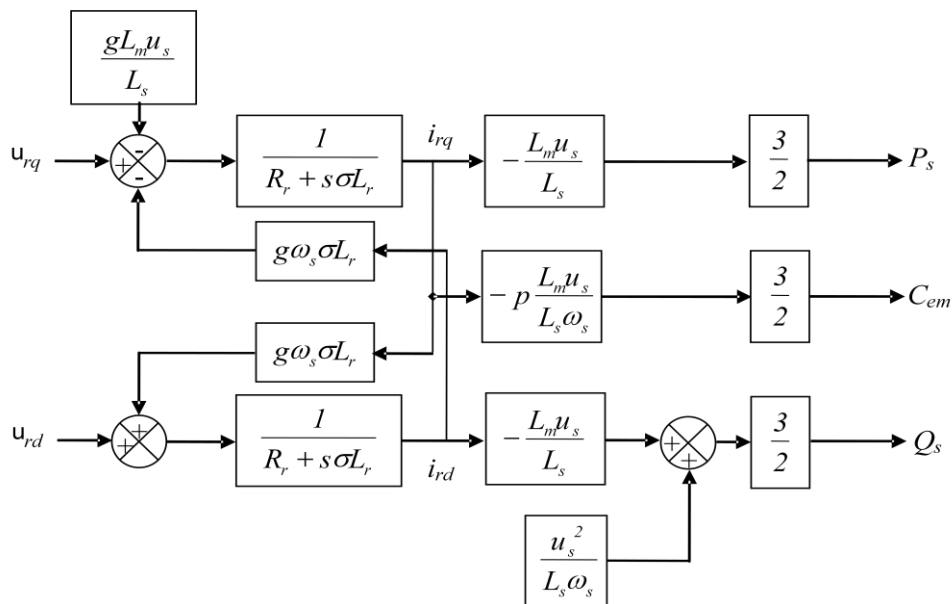


Figure.2.20-Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA

2.7 MODELISATION DE L'ALIMENTATION

Grâce au développement de l'électronique de puissance et à l'utilisation de la MLI (Modulation de largeur d'impulsion), les convertisseurs statiques permettent par un contrôle adéquat des signaux de commande des interrupteurs, d'imposer à la machine des ondes de tensions coté rotoriques à amplitudes et fréquences variables.

L'alimentation en fréquence variable se fait à l'aide des convertisseurs statiques dont le schéma de principe est donné par le convertisseur est composé d'une cascade : redresseur, filtre passe bas et onduleur.

Dans notre travail l'onduleur alimente le rotor est commandé par la technique de contrôle triangulo-sinusoidale (MLI).

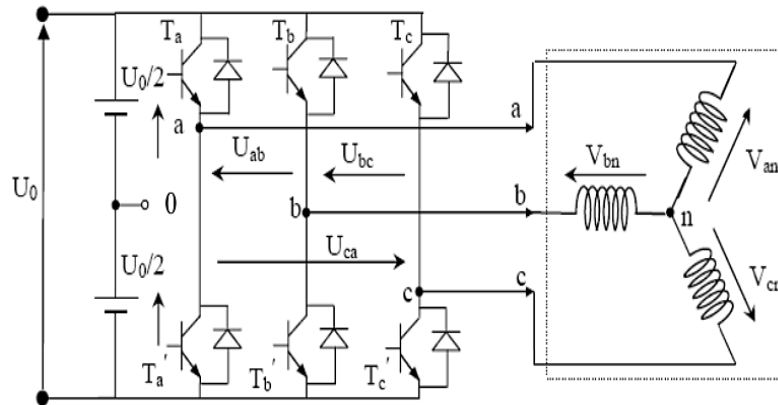


Figure.2.21- Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA

Les équations des tensions simples aux trois phases sont :

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande s_i ($i = a, b, c$)

$s_i = 1$, le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$s_i = 0$, le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Les équations des tensions simples aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2.47)$$

Soit « n » le point neutre du côté rotor (MADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2.48)$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.49)$$

La substitution de (2.48) dans (2.47) nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.50)$$

En remplaçant (2.50) dans (2.48) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.51)$$

Les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Avec V_{ao} , V_{bo} , V_{co} comme les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues) et si V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur, par conséquent l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert T donnée par :

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

2.7.1 Modulation De Largeur D'impulsion (MLI) :

L'objectif principal de la commande MLI consiste à comparer instantanément chacune des trois tensions sinusoïdales de référence que nous souhaitons imposer à un signal triangulaire de haute fréquence que nous appellerons porteuse.

Les impulsions des commandes (S_1 , S_2 , S_3) de l'onduleur sont les intersections entre les ondes modulantes (de références) avec l'onde triangulaire (porteuse). La comparaison entre les ondes de références et l'onde triangulaire détermine l'état des interrupteurs du circuit de puissance (ouverture et fermeture) [28]. L'objectif principal de la commande MLI consiste à comparer instantanément chacune des trois tensions sinusoïdaux de référence que nous souhaitons imposer à un signal triangulaire de haute fréquence que nous appellerons porteuse.

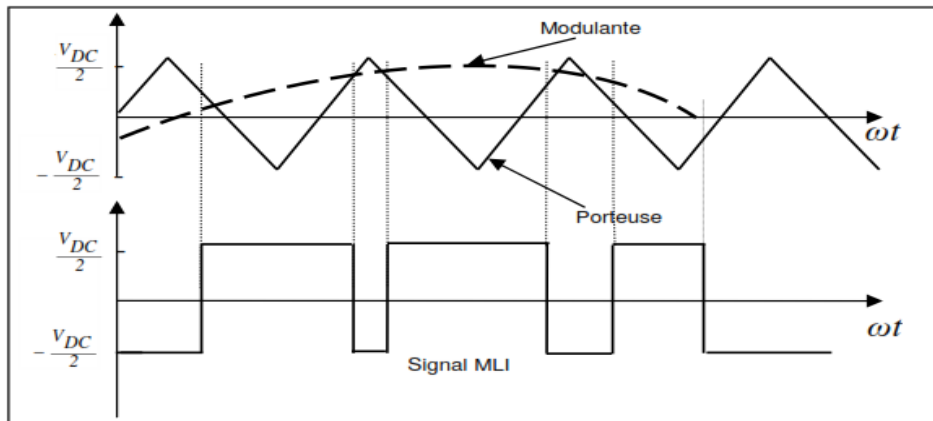


Figure.2.22-Principe de commande en MLI sinus-triangulaire

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont : La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur coté rotor. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'indice d'amplitude V_{mod} :

$$V_{\text{mod}} = \frac{V_m}{V_p} \quad (2.54)$$

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 :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (2.55)$$

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut exactement :

$$V_{\text{max}} = \frac{V_{\text{DC}}}{2} V_{\text{mod}} \quad (2.56)$$

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

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (2.57)$$

Si m est un multiple de trois nous pouvons éliminer les harmoniques d'ordre trois qui causent les majeurs inconvénients de cette technique.

2.7.2 Résultats De Simulation

Afin de visualiser le comportement de la MADA de 1.5MW, on a simulé sous MATLAB/SIMULINK. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park dans le référentiel liée au champ tournant.

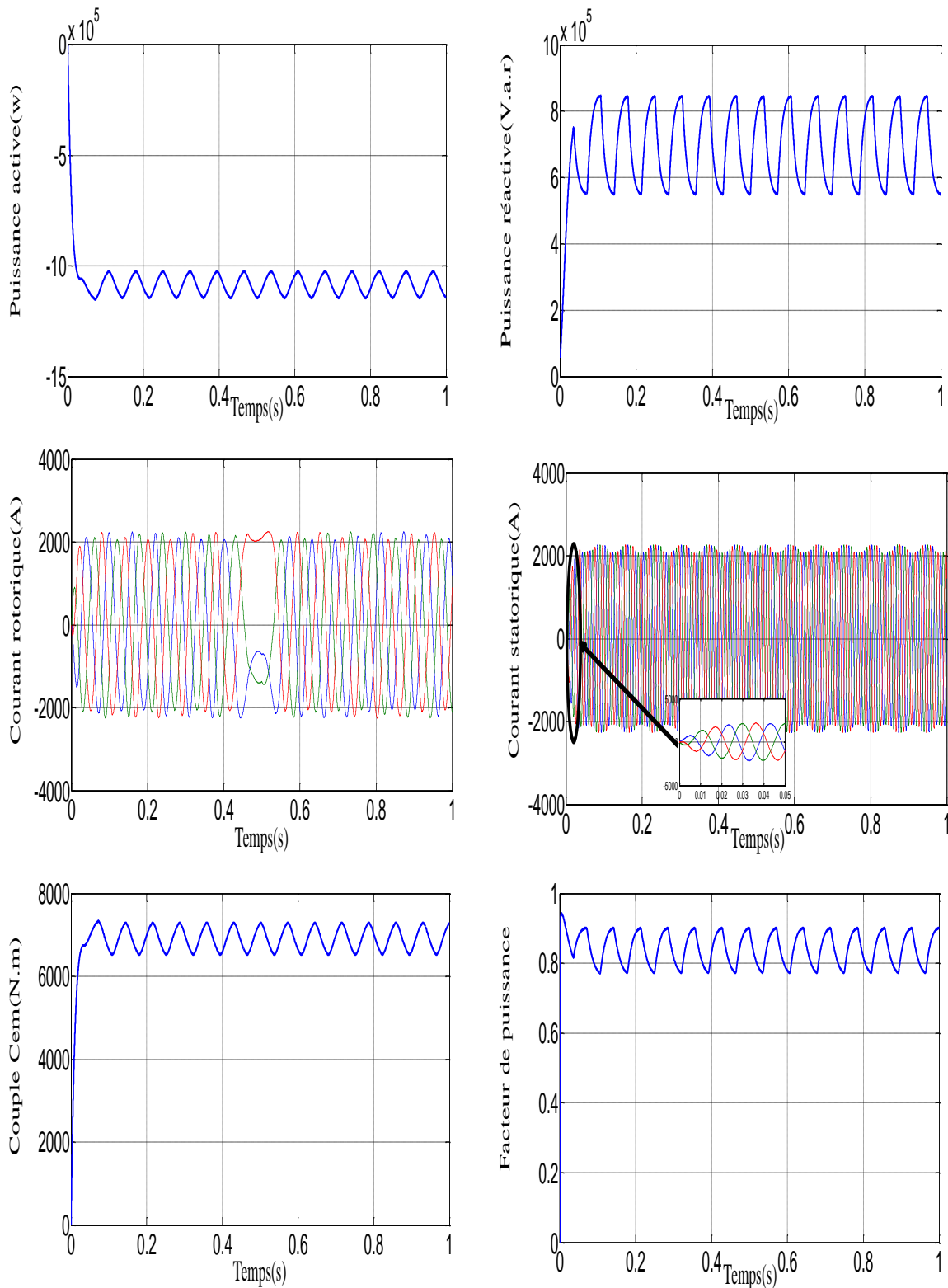


Figure.2.23-Comportement de la MADA intégrée au système éolien.

La génératrice asynchrone à double alimentation est reliée directement au niveau du stator avec un réseau triphasé de fréquence de 50Hz et une valeur tension efficace de 398V; tandis que son rotor est alimenté par un onduleur de tension commandé par MLI-ST dont

l'amplitude est de 20V et la fréquence égale à la fréquence rotorique. La figure 2.23 montre les résultats de simulation obtenus.

On remarque qu'après un régime transitoire, la puissance active de la MADA tend vers sa valeur négative. La puissance réactive tend vers une valeur positive. Le courant statorique généré par la MADA est un courant sinusoïdal. De même pour le courant rotorique qui confirme le passage doux du mode hyposynchrone au mode hypersynchrone de la MADA à l'instant 0.4s). Le couple électromagnétique appliqué au niveau de l'arbre de la MADA est illustré avec sa valeur négative. Le facteur de puissance est assuré par la MADA coté réseau.

2.8 CONCLUSION :

Ce chapitre a été consacré pour la modélisation de la turbine éolienne, la MADA et l'analyse de l'onduleur deux niveaux, commandé par la MLI-ST.

Dans une première partie, nous avons modélisé la turbine éolienne avec ses différents paramètres.

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, permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent. Deux méthodes de contrôle MPPT ont été examinées et détaillées (avec ou sans asservissement de la vitesse de rotation). Puis, dans le but d'effectuer les différents types de commandes nous avons développés le modèle de la MADA dans le repère de Park lié au champ tournant statorique. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Lors de cette modélisation, nous avons développé un modèle simplifié en vue de la commande de la MADA.

Enfin, nous avons donnés un rappel sur le convertisseur coté machine utilisé pour alimenter le rotor de la MADA.

CHAPITRE 3 :

*COMMANDE NON
LINEAIRE PAR LINEARISATION
ENTREE / SORTIE DES
PUISSANCES ACTIVE ET
REACTIVE*

3.1 INTRODUCTION

Parmi les stratégies de commande qui donnent des performances dynamiques élevées, on trouve la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie qui fut introduite par Porter. Cette commande, découplante et linéarisante, peut être appliquée sur les machines synchrones ou asynchrones [34].

L'approche de linéarisation Entrée/sortie est basée sur l'idée d'annuler les non-linéarités du système en imposant une dynamique linéaire souhaitée à la Système de contrôle. Ce contrôleur non linéaire surmonte les inconvénients des contrôleurs linéaires conventionnels qui sont la mauvaise adaptation aux variations paramétriques, ainsi assure le découplage entre les puissances actives et réactive.

Dans ce chapitre, on va présenter le principe de la technique de linéarisation au sens des Entrée/sortie , après dans une deuxième étape concevoir un contrôleur non linéaire basé sur cette technique afin de réguler les puissances d'une génératrice asynchrone à double alimentation, et on termine notre chapitre par des simulations et interprétations qui illustrent le comportement de la commande non linéaire.

3.2 COMMANDE PAR LINEARISATION ENTRÉE/SORTIE

Le but de cette partie est de rappeler le principe de la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation par linéarisation Entrée/Sortie. Cette méthode généralise les commandes de type vectoriel qui assurent le découplage et la linéarisation des relations entre les entrées et les sorties [35], [36].

Plusieurs travaux ont montré que cette technique de commande non linéaire a fait apparaître des propriétés intéressantes quand au découplage puissances active-réactive et à la robustesse paramétrique. Cette structure de commande apparaît ainsi comme une alternative intéressante à la commande par orientation du flux [37], [38], [39].

3.3 PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE LINEARISATION AU SENS DES ENTREES/SORTIES

L'idée principale de la linéarisation des commentaires est le remaniement du système non linéaire au moyen d'une transformation et d'un retour d'état afin de pouvoir obtenir une relation linéaire entre l'entrée et la sortie du système [25]. Ainsi, la linéarisation de la par retour d'état tente d'annuler les non-linéarités du système via l'entrée du système.

Après cela, une dynamique souhaitée peut être imposée au système en ajoutant une nouvelle entrée de contrôle.

Considérons un système non linéaire système avec entrées et sorties (MIMO).[61]

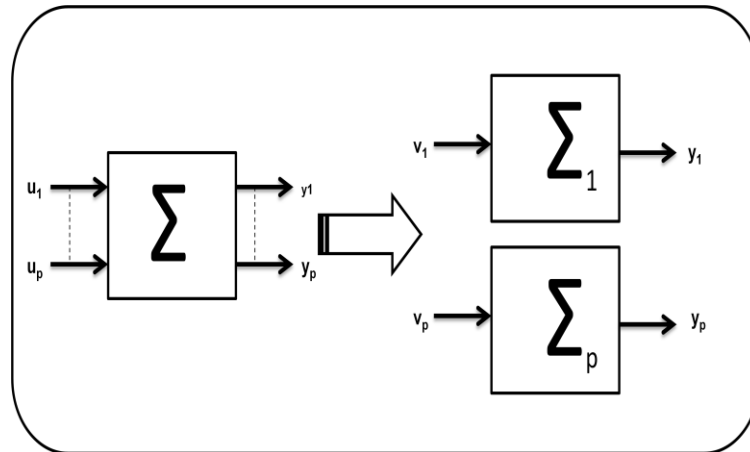


Figure.3.1-Schéma d'un système non linéaire

$$x = f(x) + \sum_{i=1}^p g_i(x) \cdot u_i \quad (3.1)$$

$$y_i = h_i(x) \quad i=1,2,3,\dots,p \quad (3.2)$$

Ou $x=[x_1,x_2,x_3,\dots, x_p]^T$ est le vecteur des états, $u=[u_1,u_2,u_3,\dots, u_p]^T$ est le vecteur des commandes et $y=[y_1,y_2,y_3,\dots, y_p]^T$ représente le vecteur des sorties f,g_i sont des champs de vecteurs lisses et h_i est une fonction lisse [42].

Considérons le modèle non linéaire de la forme suivante [19] :

$$(\Sigma) = \begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.3)$$

En dérivant la sortie y , on obtient l'équation suivante :

$$\dot{y} = A(x) + B(x)u \quad (3.4)$$

➤ **Définition :**

Le degré relatif noté r de la sortie y_i est le plus petit ordre de dérivation k tel que l'on ait :

$$\begin{cases} y_p^{(k)} = A_{(k,p)}(x) + B_{(k,p)}(x)u \\ \text{Avec } B_{(k,p)}(x) \neq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

D'après le Théorème, [Moog] :

Un système défini par (3.5) est découplable par bouclage statique si et seulement si

$$\text{Rang} = \left(\frac{\partial(y_1^{r_1}, \dots, y_p^{r_p})}{\partial(u_1, \dots, u_p)} \right) = p \quad (3.6)$$

Le problème consiste à trouver une relation linéaire entre l'entrée et la sortie en dérivant la sortie jusqu'à ce qu'au moins une entrée apparaisse, en utilisant l'expression :

$$y^r = L_f^r h(x) + L_g^{r-1} h(x) u \quad (3.7)$$

Qui peut être exprimé sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \dots \\ y_p^{(r_p)} \end{bmatrix} = A(x) + E(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ \dots \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$E(x) = \begin{bmatrix} L_{g1} L_f^{r_1-1} h_1 & \dots & \dots & L_{gp} L_f^{r_1-1} h_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{g1} L_f^{r_p-1} h_p & \dots & \dots & L_{gp} L_f^{r_p-1} h_p \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$A(x) = [L_f^{r_1} h_1 \quad \dots \quad L_f^{r_p} h_p]^T \quad (3.10)$$

La loi de linéarisation est donnée donc sous la forme :

$$u = E^{-1}(x)[A(x) + v] \quad (3.11)$$

$E(x)$ doit être une matrice inversible.

3.4 APPLICATION DE LA COMMANDE NON LINEAIRE À LA GENERATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION

L'application de la technique de linéarisation avec découplage Entrée/Sortie au modèle de la MADA, permet de pouvoir commander séparément les puissances active et réactive.

Avec cette technique de commande, le modèle de la machine est composé en deux systèmes linéaires mono variables indépendants.

Chaque sou système représente une boucle indépendante de commande d'une variable donnée (puissances active, réactive). La dynamique du système linéarisé est choisie par un placement de pôles.

3.4.1 Modèle Non Linéaire De La Machine Asynchrone A Double Alimentation

Selon (2.14) les composantes directe et en quadrature du stator et les courants de rotor sont linéaires dépendants respectivement, donc nous choisis comme suit les vecteurs d'état du GADA

$$x = [x_1 \quad x_2]^T = [i_{rd} \quad i_{rq}]^T \quad (3.12)$$

En remplaçant les équations (2.33), (2.34), (2.38) et (2.41) à (2.32), on obtient

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \sigma L_r i_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (3.13)$$

Arranger (3.13) sous la forme de (3.1)

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = -\frac{R_r}{\sigma L_r} i_{rd} + \frac{\omega_s}{L_r} i_{rq} - \frac{\omega_r}{L_r} i_{rq} + \frac{u_{rd}}{\sigma L_r} \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -\frac{R_r}{\sigma L_r} i_{rq} - \omega_s L_r i_{rd} + \omega_r L_r i_{rd} + \frac{u_{rq}}{\sigma L_r} \end{cases} \quad (3.14)$$

Définir l'entrée du système de la GADA

$$x = [u_1 \quad u_2]^T = [u_{rd} \quad u_{rq}]^T \quad (3.15)$$

De (3.14), on a

$$\begin{cases} f(x)_1 = -\frac{R_r}{\sigma L_r} i_{rd} + \frac{\omega_s}{L_r} i_{rq} - \frac{\omega_r}{L_r} i_{rq} \\ f(x)_2 = -\frac{R_r}{\sigma L_r} i_{rq} - \omega_s L_r i_{rd} + \omega_r L_r i_{rd} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

3.4.2 Choix Des Grandeurs De Sortie

Afin d'atteindre les objectifs de contrôle qui consistent en la commande des deux grandeurs puissances réactive et active, on choisit les variables de sorties suivantes :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix} = -\frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

La méthode de linéarisation par entrée-sortie est développée à partir de théories de la géométrie différentielle. Elle consiste à utiliser les dérivées de Lie pour exprimer le modèle de la machine en relation Entrée/Sortie [42].

➤ Définition 1 :

Dérivée de Lie : La dérivée directionnelle de $h(x)$ suivant le champ du vecteur $f(x)$ est définie comme suit :

$$L_f h_j(x) = \sum_{i=1}^p \frac{\partial h_j}{\partial x_i} f_i(x) \quad (3.19)$$

Par itération, on a la relation suivante :

$$L_f^i h_j = L_f(L_f^{i-1} h_j) \quad (3.20)$$

La dérivation des sorties y_i du système par rapport au temps s'exprime alors par la relation suivante

$$\dot{y}_j = L_f h_j + \sum_{i=1}^p (u_i) \quad (3.21)$$

p : nombre des sorties

➤ **Définition 2 :**

Le degré relatif (i.e. le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie y pour faire apparaître l'entrée u) est égal à l'ordre n du système. Le système peut donc être linéarisé exactement [43]:

$$L_{g_i} L_f^{r_i-1} h_j(x) \neq 0 \quad (3.22)$$

L'élément r_i correspond à la première dérivée de y_j faisant apparaître explicitement la commande u dans l'expression :

$$y_f^{(r_j)} = L_f^{r_j} h_j + \sum_{i=1}^p (L_{g_i} L_f^{r_i-1} h_j) u_i \quad (3.23)$$

En appliquant la procédure dans le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation, il est facile de vérifier que les commandes apparaissent pour la première fois dans les dérivées primaires \dot{y}_1 et \dot{y}_2 .

3.4.3 Calcul Du Degré Relatif

La condition de linéarisation permet de vérifier si un système non linéaire admet une linéarisation entrée/sortie et l'ordre du degré relatif du système.

On calcul le degré relatif r_i associé à chaque grandeur de sortie y_i choisie, lequel correspond au nombre de fois qu'il faut dériver. Cette sortie fait apparaître explicitement une des grandeurs de commande. Dans notre cas, les commandes apparaissent pour la première fois dans la première dérivée.

De (2.41) et (3.18)

$$\begin{cases} y_1 = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} i_{rq} \\ y_2 = \frac{\Phi_s}{L_s} u_{sq} - \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} i_{rd} \end{cases} \quad (3.24)$$

Différenciation (3.25) jusqu'à l'apparition d'une entrée

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{L_s} f_2 - \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rq} \\ \dot{y}_2 = -\frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{L_s} f_1 - \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rd} \end{cases} \quad (3.25)$$

Le degré relatif associé aux grandeurs de sortie y_1 et y_2 sont respectivement $r_1=1$ et $r_2=1$.

L'ordre de la dynamique interne associé à cette linéarisation est égale à : $n-(r_1+r_2) = 1$

n : étant l'ordre du système à contrôler ($n=3$).

Réécrire (3.25) sous la forme de (3.8)

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = A(x) + E(x) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Ou

$$A(x) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} -\frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 \\ -\frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$E(x) = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} -\frac{L_m u_{sd}}{\sigma L_s L_r} & -\frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} \\ -\frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m u_{sd}}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.4.4 Linéarisation Du Système

Puisque E (x) n'est pas singulier, la commande est donnée à partir de (3.11)

$$\begin{bmatrix} u_{rq} \\ u_{rd} \end{bmatrix} = E(x)^{-1} \left[-A(x) + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right] \quad (3.29)$$

E(x) est une matrice carrée, d'ordre p, appelée 'matrice de découplage'.

Où $v = [v_1 \quad v_2]^T$ représente le nouveau vecteur des variables d'entrée. Ce régulateur linéarise et découple le système tel que :

$$\begin{cases} \dot{h}_1 = v_1 \\ \dot{h}_2 = v_2 \end{cases} \quad (3.30)$$

Les degrés relatifs de chaque sortie étant de 1, les variables v_1 et v_2 peuvent être déterminés par une poursuite de trajectoire :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1^{ref} + k_{11} e_1 \\ \dot{y}_2^{ref} + k_{21} e_2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Avec e_1 est l'erreur entre la puissance active demandée et la puissance active obtenue, et e_2 est celle qui se rapporte à la puissance réactive [50].

Les coefficients Kij donnent respectivement la dynamique du système pour la réponse en puissances active et réactive.

3.5 RESULTATS DE SIMULATION

La simulation est faite en utilisant Matlab / Simulink pour un générateur 1.5MW, dont les paramètres sont donnés dans le tableau 3 de l'annexe couplé à une grille 398V / 50. Figure 3.2 montre le schéma de principe de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie.

Par la suite les tests sont effectués, test de suivi de consigne et de robustesse face aux variations des paramètres et le spectre harmonique des courants.

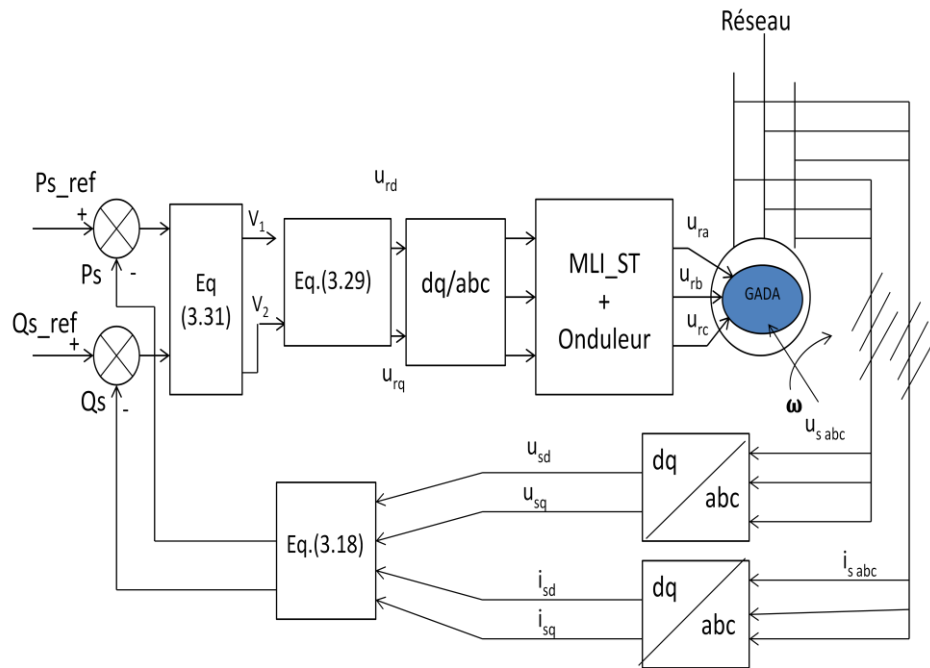
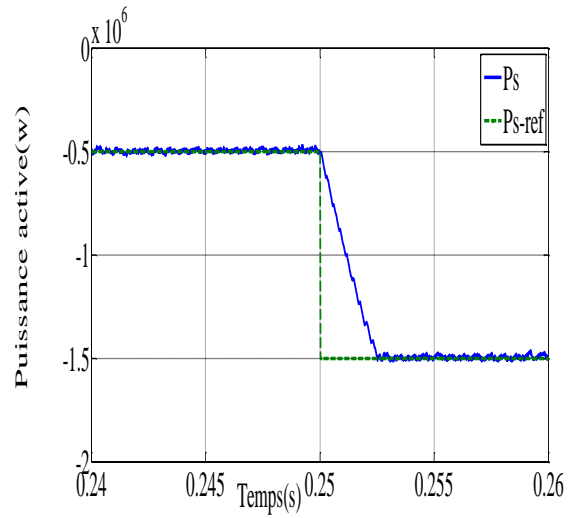
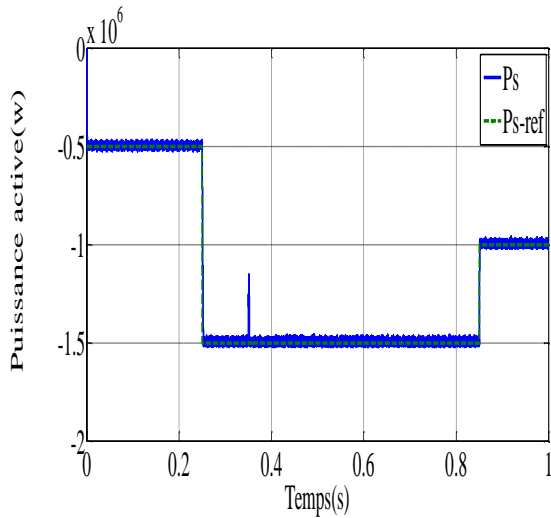


Figure.3.2- Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie appliquée à la GADA

3.5.1 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Fixe



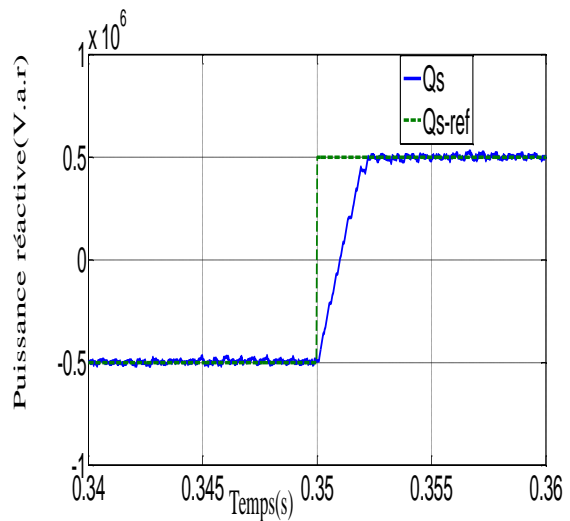
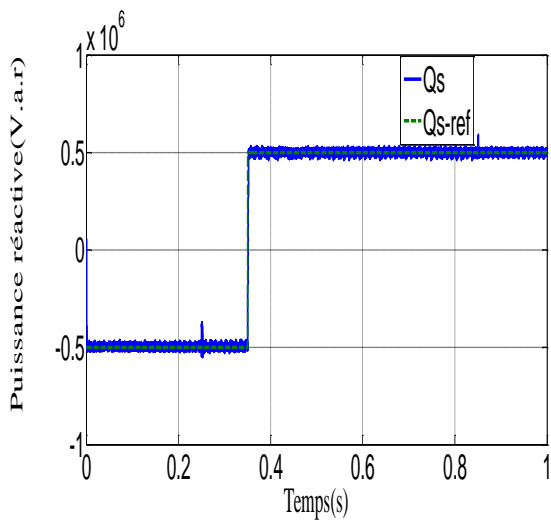
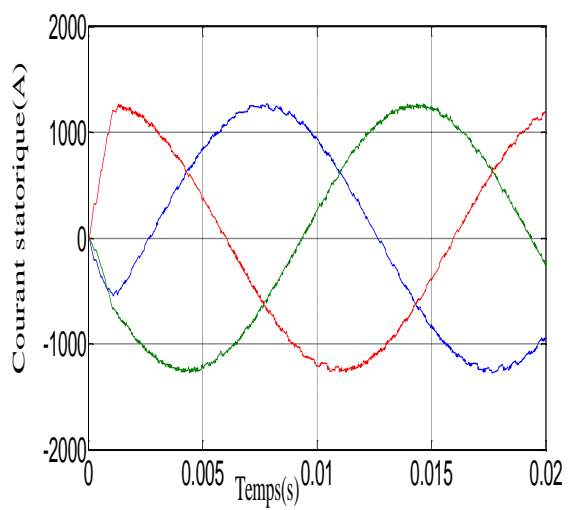
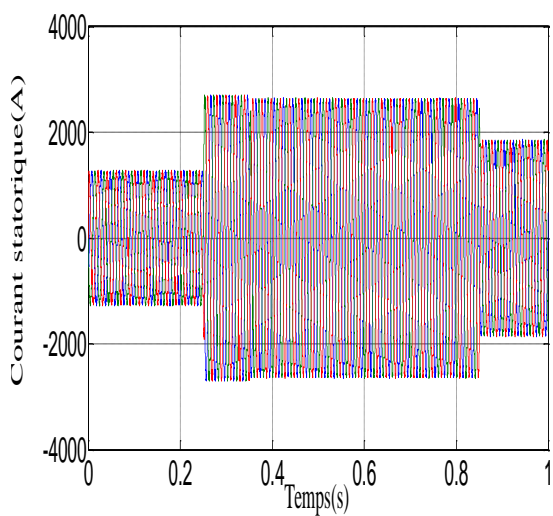
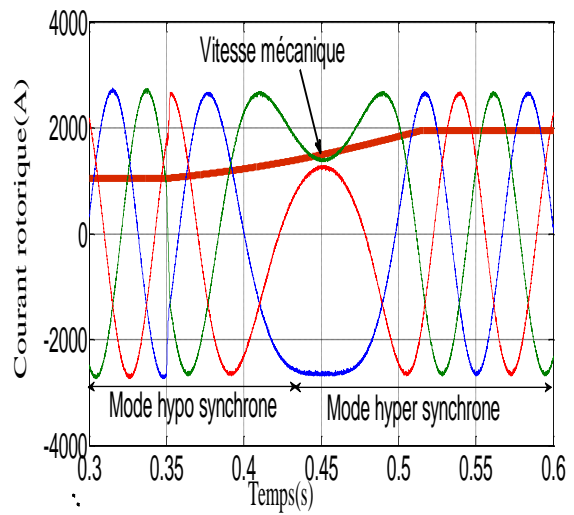
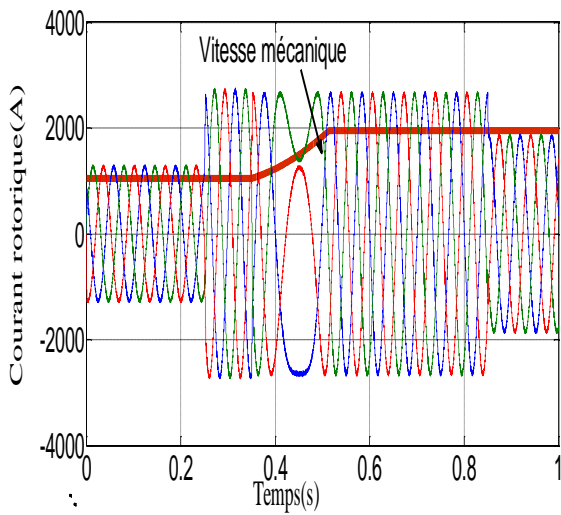


Figure.3.3- Découplage de la puissance active et réactive de la GADA par la CNL.



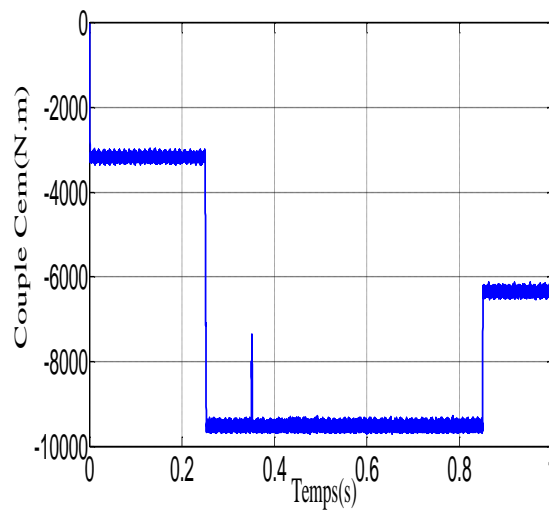


Figure.3.4-Comportement de la GADA avec la commande non linéaire

Pour évaluer les performances de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/sortie de la machine asynchrone à double alimentation. Nous avons procédé à une série de simulations sous environnement MATLAB/Simulink. D'après les résultats de simulation obtenus de la figure 3.3, on peut dire que le découplage entre la puissance active et réactive est assuré avec des grandes performances. Dans le teste de suivi des consigne les grandeurs commandées suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances active et réactive. Le temps de réponse est rapide et erreur statique est minimale mais avec présence des fluctuations au niveau des puissances et du couple électromagnétique de la machine dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs.

La figure 3.4 représente le comportement de la GADA dans le cas de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/sortie. Au régime transitoire, l'appelle du courant triphasé statorique possède une forme sinusoïdale et inferieur à celle de régime permanant. Le courant rotorique parait aussi sinusoïdale, le passage du hyposynchronisme au hypersynchronisme est bien illustré autour de l'instant 0.4s.

Le couple électromagnétique et la puissance active, étant proportionnelles, sont de même allure à vitesse constante.

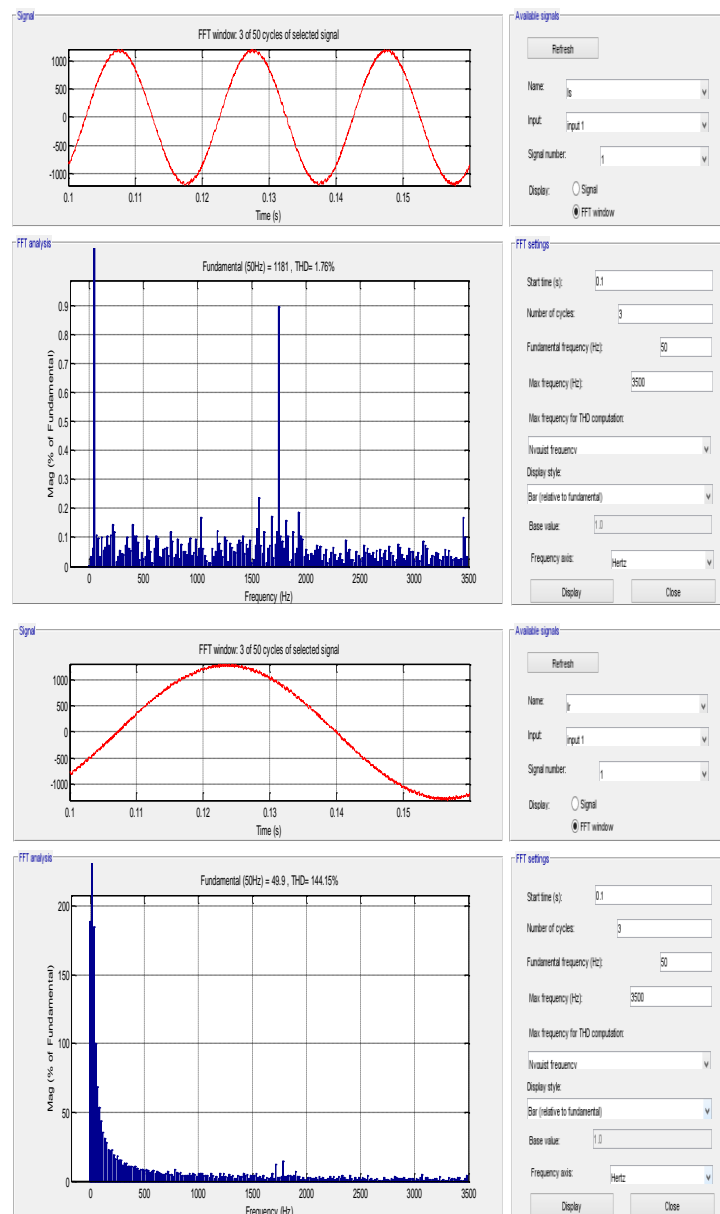


Figure.3.5-Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique

La figure 3.5 montre respectivement l'analyse spectrale pour le courant de la phase statorique et rotorique. Les résultats obtenus montrent l'influence de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie, sur la qualité de l'énergie fournit au réseau électrique. Le taux de distorsion harmonique (THD) est plus important (144.15%) au niveau du courant rotorique, pour (1.76%) au niveau du courant statorique.

3.5.2 Test De Robustesse De La Commande Non Linéaire

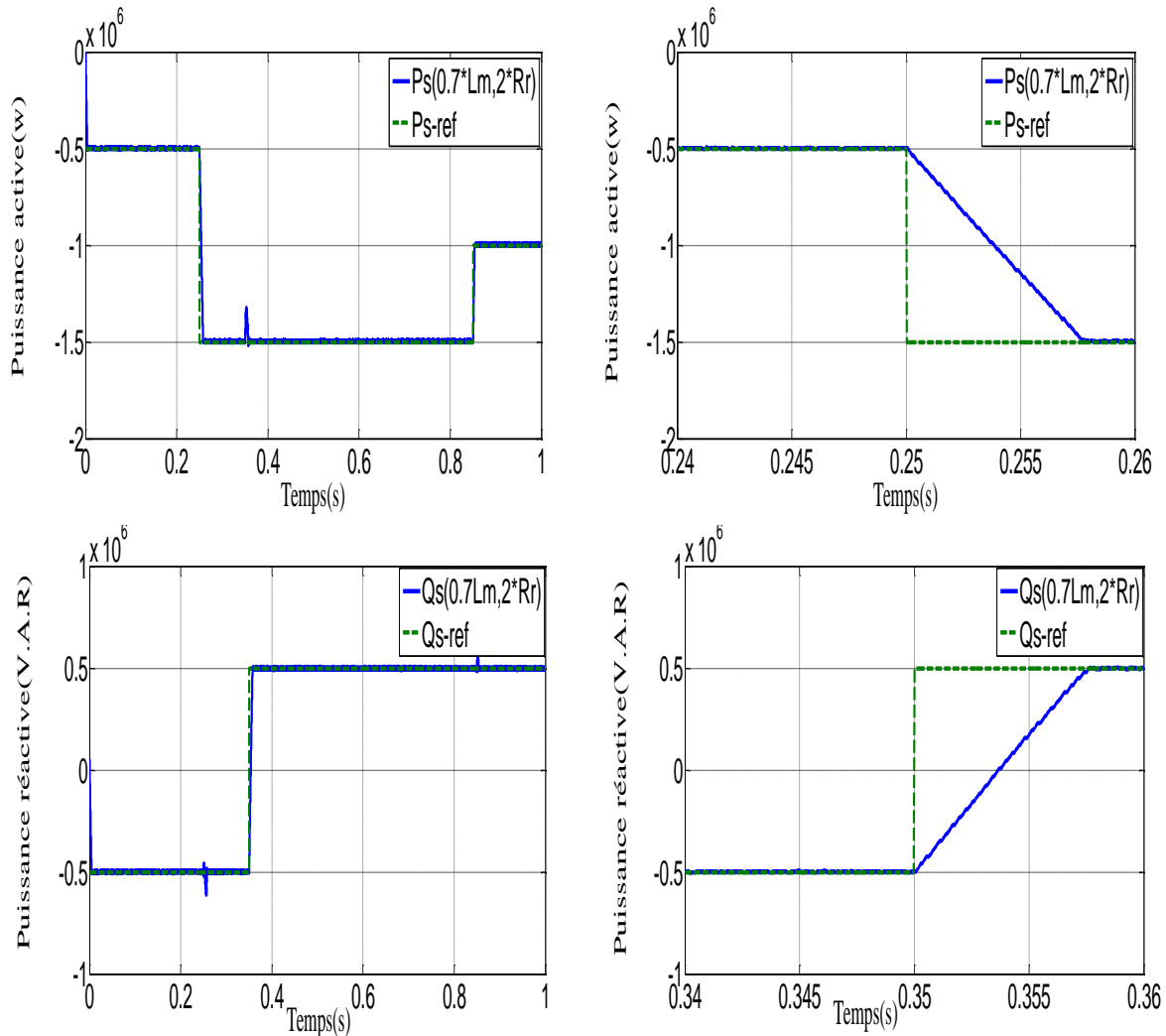


Figure.3.6- Commande non linéaire vis-à-vis des variations paramétriques de la GADA

Pour tester la robustesse de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/sortie nous avons étudié l'influence des variations paramétriques (résistance rotorique et inductance mutuelle). La robustesse de la technique précédente est testée avec une variation simultanée de 100% de la résistance rotorique ($2 \times R_r$) et de 30% de l'inductance mutuelle ($0.7 \times L_m$).

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la variation de résistance (R_r) et l'inductance (L_m) n'ont qu'une légère augmentation dans le temps de réponse, mais les autres performances sont gardés ainsi que le découplage entre la puissance active et réactive est toujours maintenu.

3.5.3 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Variable :

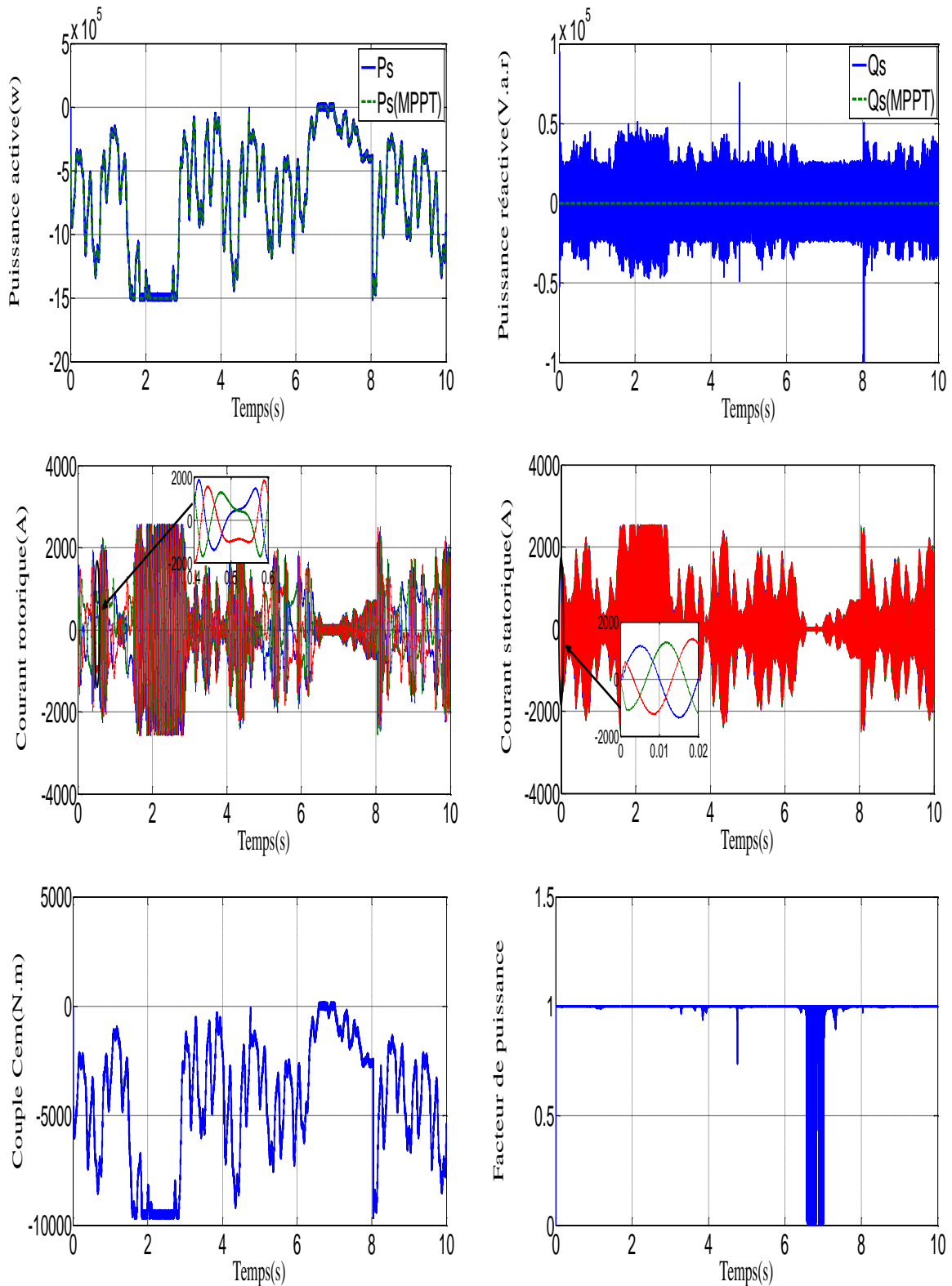


Figure.3.7 - Commande non linéaire de la GADA avec (contrôle MPPT).

Pour évaluer les performances de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, munie de la MPPT et du convertisseur côté machine. Nous avons procédé à une série de simulations dans l'environnement MATLAB, avec un profil du vent choisi pour une vitesse moyenne de 8.2 m/s.

Les résultats obtenus sont sensiblement identiques. Toutefois, l'approche non linéaire présente un temps de réponse rapide.

La puissance active statorique suit correctement sa référence générée par la turbine. Le facteur de puissance unitaire est mis en évidence pour une puissance réactive nulle obtenue après la fin de son régime transitoire.

Les courants statoriques sont sinusoïdaux, malgré les variations du profil de vent avec une fréquence 50 Hz. Les courants rotoriques sont également sinusoïdaux.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la commande par linéarisation Entrée/Sortie de la machine asynchrone à double alimentation a été présentée. D'après les résultats de simulation on peut remarquer que l'application de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie de la GADA a permis de mettre en évidence les propriétés statiques et dynamiques de la commande linéarisante. Il apparaît dans les résultats un excellent découplage entre les puissances actives et réactive.

Pour remédier au problème des fluctuations au niveau des puissances et le couple et dont le but d'améliorer les performances de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie on va associer cette stratégie aux régulateurs flous dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4 :

*COMMANDE NON LINEAIRE
PAR LINEARISATION
ENTREE / SORTIE DES
PUISSANCES ACTIVE ET
REACTIVE BASEE SUR LA
LOGIQUE FLOUE.*

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre le système de contrôle est basé sur la logique floue. Ce type de contrôle, approchant le raisonnement humain utilise la tolérance, l'incertitude, l'imprécision et le flou dans le processus de prise de décision, gère pour offrir une performance très satisfaisante, sans besoin d'un modèle mathématique détaillé du système, juste en intégrant les connaissances des experts dans les règles floue. En outre, il a des capacités inhérentes à faire face pour des données imprécises ou bruyantes; ainsi, il est capable d'étendre son capacité de contrôle même à ces conditions de fonctionnement où les techniques de contrôle linéaire échouent (c.-à-d, variations de paramètres).

Afin d'améliorer les performances de la commande non linéaire par linéarisation entrée-sortie, le présent chapitre sera consacré à l'application de la technique de la logique floue à la commande non linéaire appliqué à une génératrice asynchrone à double alimentation d'un système de conversion d'énergie éolienne.

4.2 INTERET DE LA COMMANDE FLOUE

- La commande est simple à réaliser, facilement adaptable aux conditions de fonctionnement, un petit nombre de règle suffit à décrire le système.
- La coordination de plusieurs objectifs est possible (système multi-variable)
- Cette commande reconnue comme robuste.

4.3 COMMANDE LINEARISANTE ENTREE/SORTIE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

Cette commande est une solution attractive pour obtenir des résultats performants dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable basés sur la machine asynchrone double alimentation. Nous allons appliquer cette commande non linéaire pour contrôler la qualité d'énergie produite. Pour ce faire, on va utiliser la structure de la commande non linéaire par linéarisation Entée/Sortie tout en remplaçant les régulateurs PI vu dans le chapitre précédent par des régulateurs flous.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux fondamentaux de la logique floue où nous exposerons la notion d'ensembles flous, les fonctions d'appartenances, les variables linguistiques, et les opérateurs employés dans ce type de logique, puis décrire la structure de la commande floue. Nous expliquerons les notions de fuzzification d'inférences floues et

de défuzzification, pour manipuler une commande adéquate pour le réglage indépendant des puissances [22].

4.4 NOTIONS FONDAMENTALES DE LA LOGIQUE FLOUE

Dans cette section, nous présentons les notions de base de la logique floue. Nous aborderons uniquement les points les plus importants pour la compréhension d'un raisonnement flou à savoir :

4.4.1 Ensembles Flous

Dans la théorie classique des ensembles, ces derniers sont définis par une fonction caractérisée par un élément appartient, et un élément n'appartient pas (0) ; par contre un ensemble flou est défini sur un univers de discours X, et par une fonction d'appartenance (μ) qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1. Il est permis qu'une chose appartienne partiellement à un certain ensemble; ceci s'appelle le degré d'appartenance. Dans un domaine continu, les ensembles flous sont définis analytiquement par leurs fonctions d'appartenance [51].

4.4.2 Fonction D'appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques. Il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles. Soit une variable x qui varie dans un domaine appelé univers de discours, ce dernier est partagé en sous-ensembles flous de façon que dans chaque zone il y ait une situation dominante. Ces zones sont décrites par des fonctions convexes, généralement sous forme triangulaire ou trapézoïdale, elles admettent comme argument la position de la variable x dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de x à la situation décrite par la fonction ; noté [52] :

$\mu(x)$: degré d'appartenance de x

Le choix de la répartition des fonctions, leurs chevauchements ainsi que leurs formes doit être judicieux comme indiqué dans la figure (4.3) donne quelques fonctions d'appartenance

➤ Fonction triangulaire : elle est définie par trois paramètres (a,b,c) :

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad (4.1)$$

➤ Fonction trapézoïde : est définie par quatre paramètres (a,b,c,d) :

$$\mu(x) = \max \left[\min \left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad (4.2)$$

➤ Fonction gaussienne : est définie par deux paramètres (m,s) :

$$\mu(x) = \exp \left[-\left(\frac{x-m}{2a^2} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

➤ Fonction sinusoïdale : est définie par deux paramètres (a,b) :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a(a-c))} \quad (4.5)$$

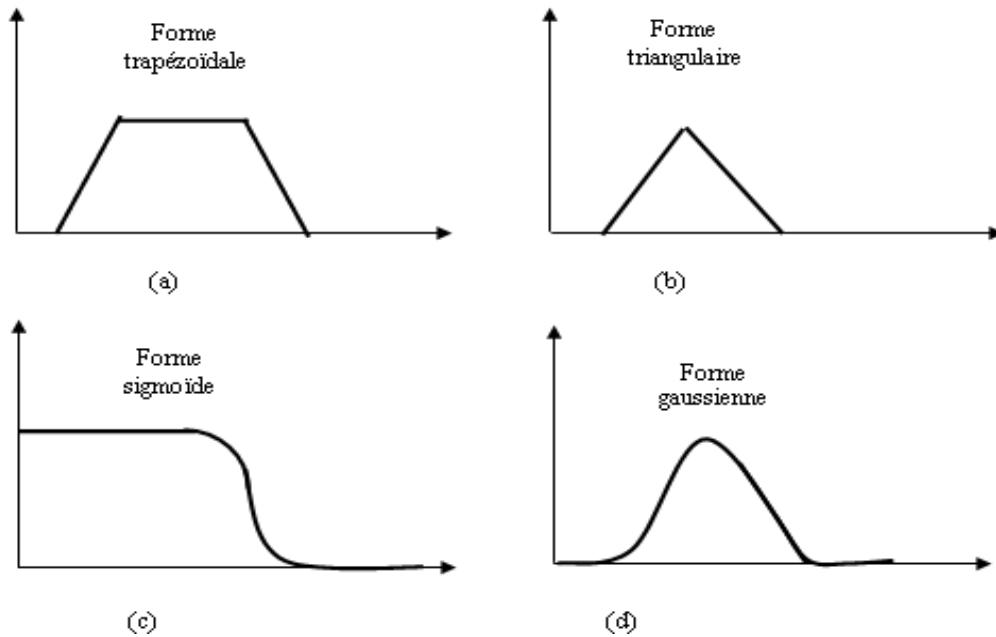


Figure.4.1-Forme des fonctions d'appartenance

4.4.3 Caractéristiques D'un Sous Ensemble Flou

Soit A un sous ensemble flou de x. On définit les caractéristiques suivantes propres à cet ensemble flou, (figure 4.4) [53].

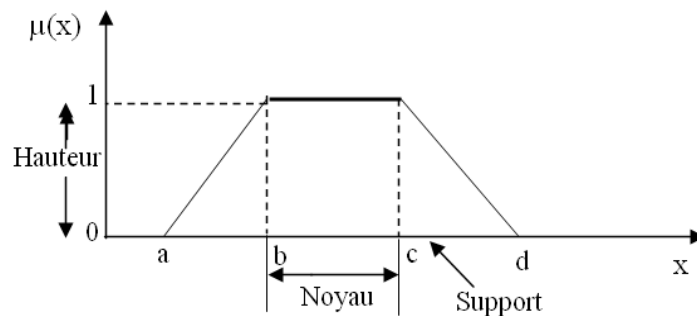


Figure.4.2-Format d'un ensemble flou normalisé.

- **Support d'un ensemble flou :** le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour les quelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle. Il est donné par :

$$\text{Supp}(A) = \{x \in X; \mu_A(x) \neq 0\} \tag{4.6}$$

- **Noyau d'un ensemble flou :** Le noyau d'un ensemble flou A de X est un sous-ensemble ordinaire de X dont chaque élément à un degré d'appartenance égale à 1.

$$\text{Noy}(A) = \{x \in X; \mu_x(x) = 1\} \quad (4.7)$$

- **Hauteur d'un ensemble flou** : C'est la borne supérieure de la fonction d'appartenance de A:

$$H(A) = \max(\mu_A(x); x \in X) \quad (4.8)$$

- **Le cardinal** : est définie par la somme des degrés d'appartenance

$$|A| = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) \quad (4.9)$$

Pour un domaine continu, la cardinalité sera définie par

$$|A| = \int \mu_A(x) dx \quad (4.10)$$

- **Couple de niveau α** : On appelle couple de niveau α ou α -coupe de l'ensemble flou A, les éléments qui possèdent un degré d'appartenance supérieur ou égal α . Le sous ensemble A_α de X défini par :

$$A_\alpha = \{x / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad x \in [0 \quad 1] \quad (4.11)$$

4.4.4 Variables Linguistiques :

La description d'une certaine situation imprécise ou incertaine peut contenir des expressions floues comme par exemple: très grand, grand, moyen, petit. Ces expressions forment les valeurs d'une variable x, appelée "linguistique", soumise à des fonctions appelées fonctions d'appartenance [54].

Une variable linguistique est représentée par un triplet (V, X, T_V)

V : nom de la variable (âge, taille, température, longueur, ...)

X ; univers des valeurs prises par V(R,...)

T_V={A₁,A₂.....}: Ensemble de X_V, utilisé pour caractériser V

Par exemple :(Age-Personne, [0,100], {Très-jeune, Jeune Agé})

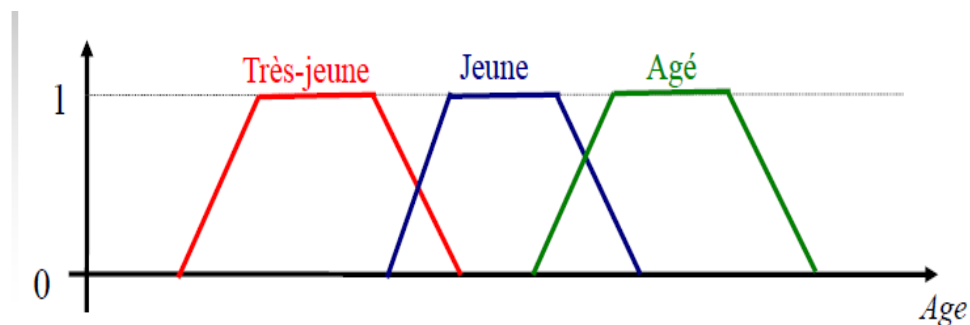


Figure4.3-Forme des Variable flous ou linguistique

4.4.5 Différence Entre Ensembles Classique Et Ensemble Flou

Ensemble classique: 1 fonction caractéristique unique

Ex. : ensemble des réels compris entre 1 et 3

Fonction caractéristique : $g : \mathbb{R} \rightarrow \{0,1\}$

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.12)$$

Ensemble flou: 1 infinité de fonctions d'appartenances

Ex. : ensemble des réels plus ou moins égaux à 2

Fonction d'appartenance : $f : \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$

$f(x)$ pas unique

4.4.6 Raisonement En Logique Floue

La logique floue permet le traitement souple de connaissances imprécises ou incertaines, ce qui serait impossible avec la logique classique.

On peut considérer que la logique floue est une extension de la logique classique. Les propositions sont des propositions floues définies à partir d'un ensemble L de variable linguistiques(x, T(x), X). Leurs valeurs de vérité appartiennent à tout l'intervalle [0,1] et elle est fournie par la fonction appartenance de la caractérisation floue utilisée dans la proposition floue.

Soit x une valeur linguistique et A une caractéristique.

➤ Proposition :

Une proposition floue est définie à partir d'une variable linguistique(x, T(x), X) par la qualification «x est A»

➤ Conjonction :

La conjonction de deux propositions floue est réalisée par l'opérateur ET par exemple : « x_1 est A_1 **ET** x_2 est A_2 »

➤ La disjonction de deux propositions floue est réalisée par l'opérateur OU par exemple : « x_1 est A_1 **OU** x_2 est A_2 »

➤ Implication :

Une implication entre deux propositions floue aussi une proposition floue que l'on peut exprimer par : «Si x_1 est A_1 **ALORS** x_2 est A_2 »

➤ Implication floue :

L'implication floue est un operateur qui permet d'évaluer le degré de vérité d'une règle de la forme : Si x est A ALORS y est B

A partir des valeurs de la prémisse d'une part, et de celle de la conclusion d'autre part.

Ce degré de vérité est évalué à partir des degrés d'appartenance de x de A et B comme suit

$$\mu_R(x, y) = \text{imp}[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (4.13)$$

Les operateurs les plus utilisés en commande floue sont les implications de Mamdani et Larsen :

➤ Implication de Mamdani :

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.14)$$

➤ Implication de Larsen :

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (4.15)$$

4.4.7 Opérateur En Logique Floue

Comme dans la théorie des ensembles classique, on définit l'intersection, l'union des ensembles floue ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites par les opérateurs "ET", "OU" et "NON" [55].

➤ Opérateur OU :

L'opérateur OU correspond à l'union de deux ensembles floues A et B définis dans l'univers de discours X. L'union ($A \cup B$) est aussi un ensemble floue de X, avec une fonction d'appartenance donnée par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) \quad (4.16)$$

Où le symbole « U » est l'opérateur maximum.

➤ Opérateur ET :

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensemble floues A et B défini dans l'univers de discours X. l'intersection ($A \cap B$) est aussi un ensemble floue de X, avec une fonction d'appartenance donnée par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) \quad (4.17)$$

Où le symbole « \cap » est l'opérateur minimum.

➤ Opérateur NON :

Le complément d'un ensemble flou A dans l'univers de discours X est dénommé \bar{A} et à la fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.18)$$

Dans la logique floue, on peut définir d'autre opérateur tels que :

La fonction arithmétique « somme » : $\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad (4.19)$

La fonction arithmétique « produit » : $\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (4.20)$

4.5 STRUCTURE DE BASE D'UN CONTROLEUR FLOU

L'avantage de la commande floue par comparaison avec les commandes classiques est qu'elle ne nécessite pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre elle a besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur la connaissance d'un opérateur qualifié manipulant le système [56].

La figure 4.6 représente, à titre d'illustration la structure d'un régulateur flou à deux entrées et une sortie : où x_1 et x_2 représentent les variables d'entrée, et x_r celle de la sortie ou la commande

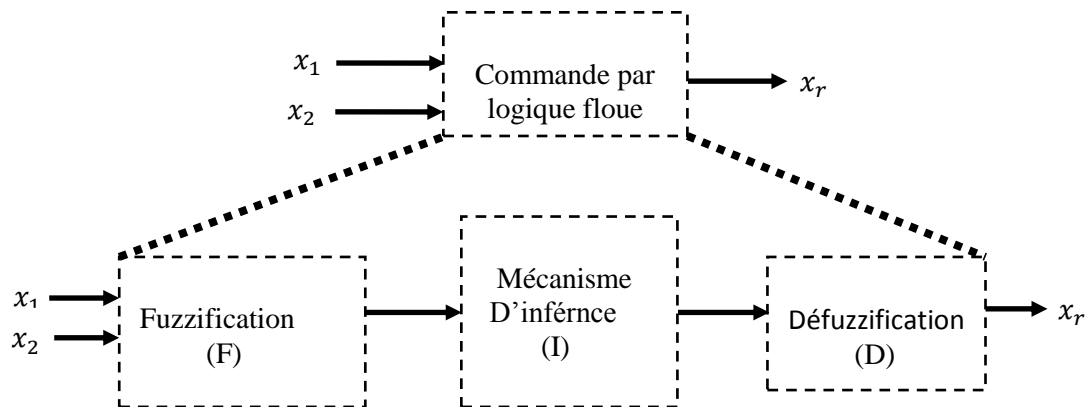


Figure.4.4-Structure interne d'un régulateur flou

On peut noter que le calcul de la commande s'effectue à partir de trois étapes fondamentales :

- Une interface de Fuzzification.
- Un mécanisme d'interface (règle)
- Et une interface de Défuzzification

4.5.1 Interface De Fuzzification

L'interface de fuzzification inclut les fonctions suivantes [23]

- Mesure des variables d'entrée
- Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variations d'entrée aux univers de discours correspondants
- Transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

La fuzzification est une démarche qui transforme une mesure ou une évaluation de valeur subjective. De là, elle peut être définie comme une cartographie d'un espace d'entrée observé sur des ensembles flous dans un univers de discours.

La fuzzification proprement dite consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrées et de sorties.

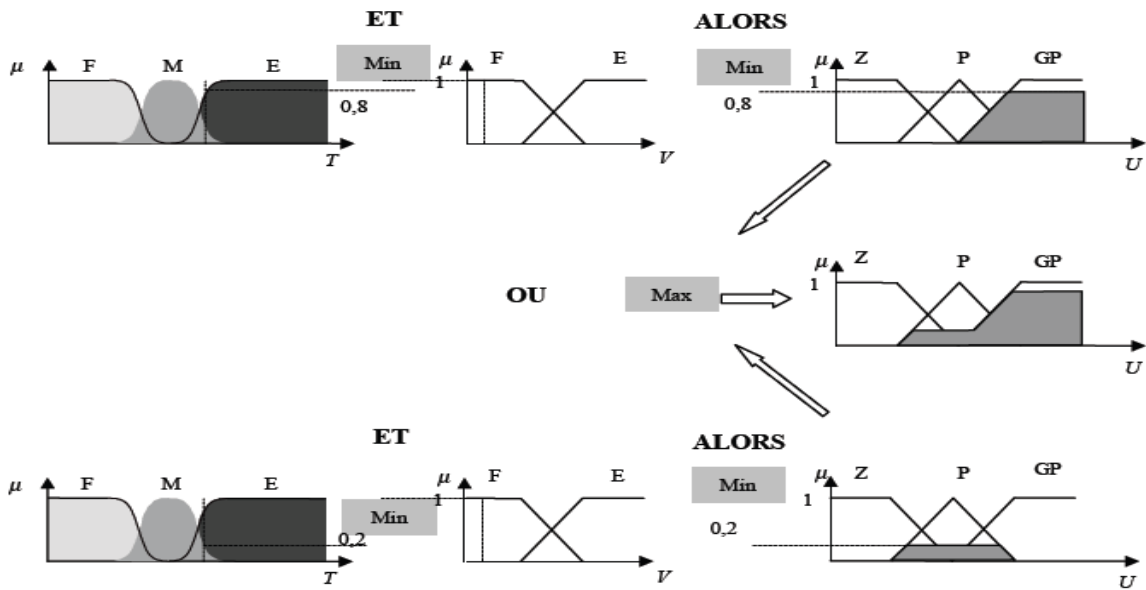


Figure.4.6-Exemple d'interface Max-Min

La fonction d'appartenance résultante correspond au maximum des deux fonctions d'appartenance partielles puisque les règles sont liées par l'opérateur OU.

➤ **Méthode D'inférence MAX-Produit (Méthode de Larsen)**

Cette méthode représente l'opérateur "ET" par la fonction "Min", l'opérateur "OU" par fonction "Max" et la conclusion "ALORS" par la fonction "Prod"

La représentation de cette méthode est schématisée par la figure ci-dessous.

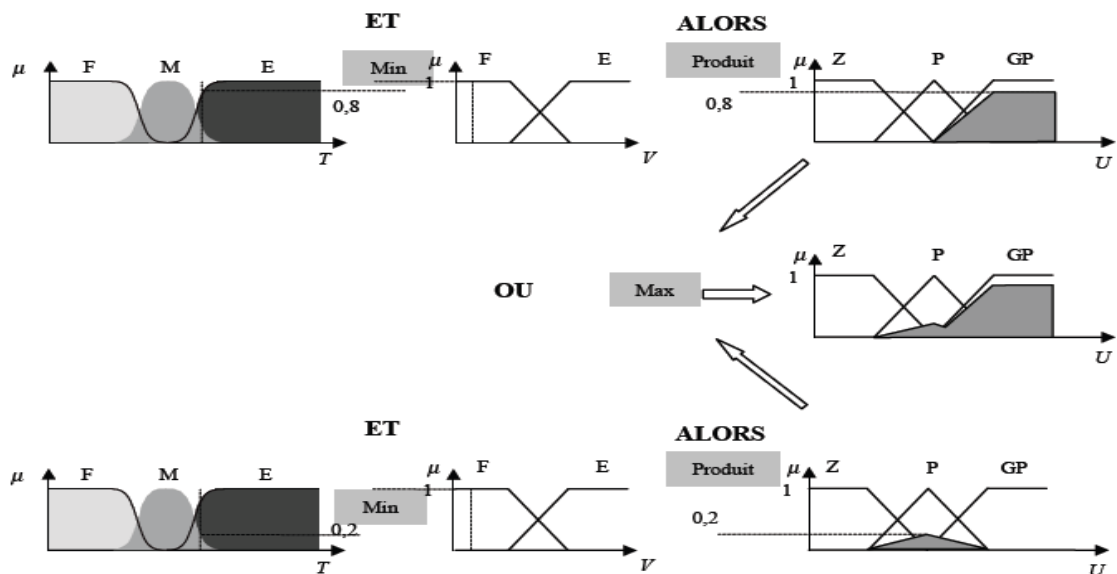


Figure.4.7- Exemple d'interface Max-Produit

4.5.3 Défuzzification

La méthode d'interface génère une fonction d'appartenance, il faut transformer cette grandeur floue en grandeur physique réelle. L'opération de défuzzification permet de calculer à partir des degrés d'appartenance à tous les sous-ensembles flous de la variable de sortie, la valeur de sortie à appliquer au système. Il y a plusieurs méthodes de défuzzification à savoir la méthode du maximum, la méthode des hauteurs pondérées et la méthode de centre de gravité, cette dernière est la plus utilisée dans plusieurs travaux pour cela nous avons opté pour l'utilisation de cette méthode dans notre travail.

L'expression de la sortie dans cette méthode est donnée par l'équation suivante :

$$u = \frac{\int x u_z(x).dx}{\int u_R(x).dx} \quad (4.21)$$

4.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA LOGIQUE FLOUE

La logique floue n'est pas une solution à tous les problèmes que l'on peut rencontrer lors de la conception d'une régulation.

Elle présente des avantages mais aussi certains inconvénients.

a. Avantages

- La théorie est simple et s'applique à des systèmes complexes.
- Pas de modèles mathématiques requis du procédé à asservir
- Robustesse de la commande floue vis à vis des incertitudes
- Possibilité de commande auto-adaptative aux variations du procédé

b. Inconvénients

- Technique de réglage essentiellement empirique.
- Performances dépendant de l'expertise
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse.

4.7 APPLICATION DE LA COMMANDE NON LINEAIRE PAR LA LOGIQUE FLOUE À LA GENERATRICE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION:

Pour appliquer cette commande à notre système, on a utilisé la même structure de commande non linéaire par linéarisation entrée-sortie présentée dans le chapitre précédent avec un changement des régulateurs PI par des régulateurs flous de mêmes types (régulateur de type Mamdani à trois classes), qui possèdent les mêmes fonctions d'appartenances.

L'objectif de notre travail est d'appliquer cette commande pour contrôler en permanence et indépendamment les puissances actives et réactives générées par la machine asynchrone

à double alimentation. Les hypothèses de simulation ont été effectuées sous les mêmes conditions, et avec les mêmes profils dans le but de voir les nouvelles qualités de poursuite et de régulation ainsi que la robustesse de la commande.

4.7.1 Régulateur À Trois Classes

➤ Interface de fuzzification

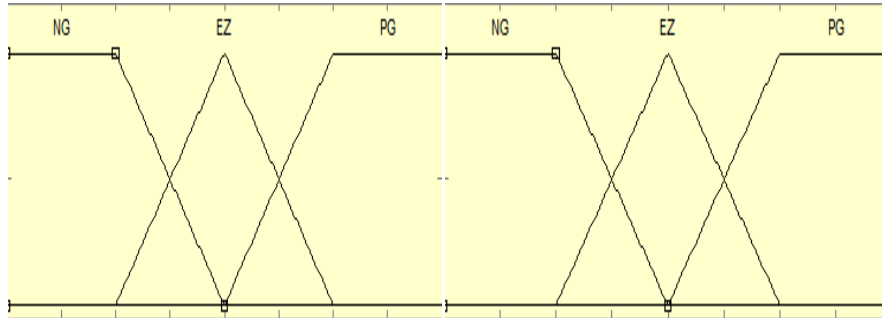


Figure.4.8-interface de fuzzification

➤ Base de règle

Les règles décisionnelles se composent de l'implication (si-alors) ou situation/action définies de la forme suivante :

Si e est A Et de est B ; alors du est C

Pour le cas de notre application nous avons opté pour la base de règles de MACVICAR-Whelan. Elle est organisée sous la forme d'une table de décision diagonale symétrique tableau 4.1 inspirée du comportement d'une réponse d'un système dans le plan de phase linguistique.

| | | | |
|--|----|----|----|
| $\begin{matrix} & \text{de} \\ \text{e} & \diagdown \\ & \text{du} \end{matrix}$ | | | |
| | NG | EZ | PG |
| NG | NG | NG | EZ |
| EZ | NG | EZ | PG |
| PG | EZ | PG | PG |

Tableau.4.1-Tableau de décision diagonale de Macvicar-Whelan(3*3)

e : Erreur

de : Variation de l'erreur

du : Variation de la commande

NG : Négatif Grand

EZ : Environ Zéro

PG : Positif Grand

➤ **Les règles d'inférences**

SI (e est NG ET de est NG) ALORS du=NG **SI (e est NG ET de est EZ) ALORS du=NG**
OU **OU**

SI (e est NG ET de est PG) ALORS du=EZ **SI (e est EZ ET de est NG) ALORS du=NG**
OU **OU**

SI (e est EZ ET de est EZ) ALORS du=EZ **SI (e est EZ ET de est PG) ALORS du=PG**
OU **OU**

SI (e est PG ET de est NG) ALORS du=EZ **SI (e est PG ET de est EZ) ALORS du=PG**
OU

SI (e est PG ET de est PG) ALORS du=PG

➤ **Interface de défuzzification**

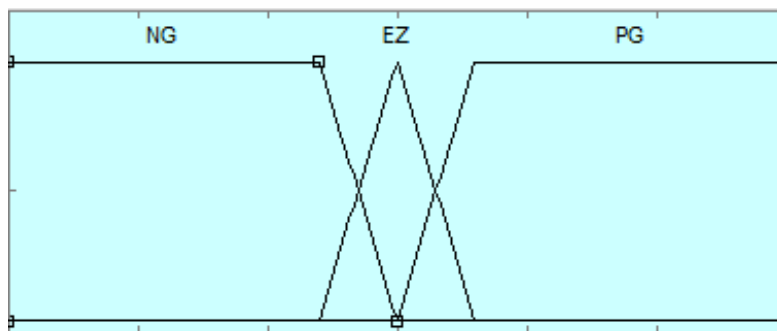


Figure.4.9-Interface de défuzzification

4.8 RESULTATS DE SIMULATION

La simulation est faite en utilisant Matlab / Simulink pour un générateur 1.5MW, dont les paramètres sont donnés dans tableau 3 de l'annexe, couplé à une grille 398V / 50. Figure 4.10 montre le schéma de principe de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie en utilisant des régulateurs par logique floue.

Par la suite les tests sont effectués, test de suivi de consigne et robustesse face aux variations des paramètres et le spectre harmonique des courants.

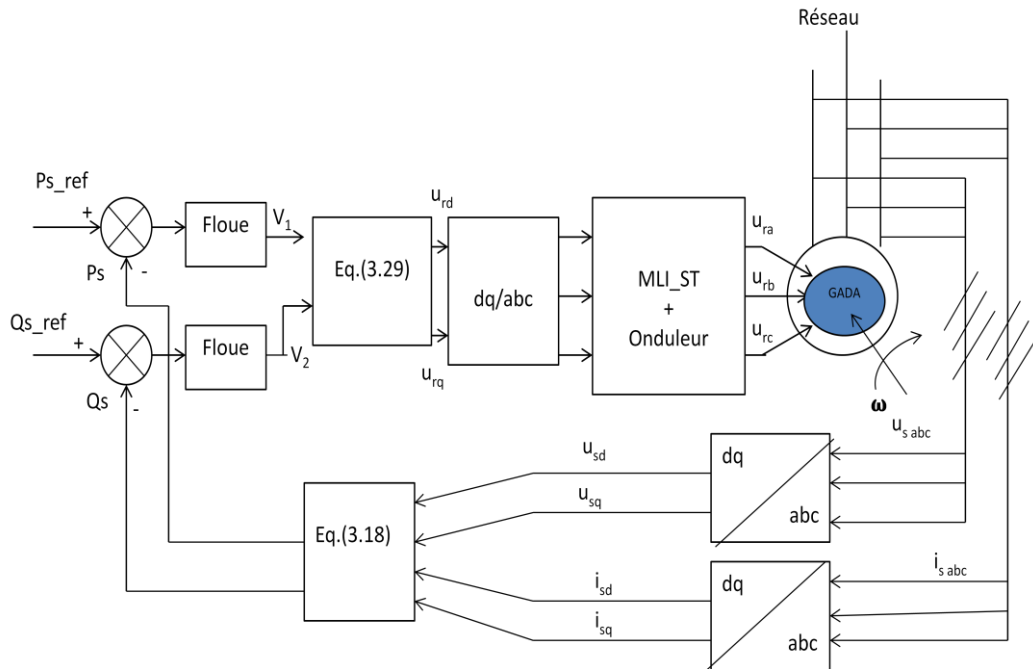
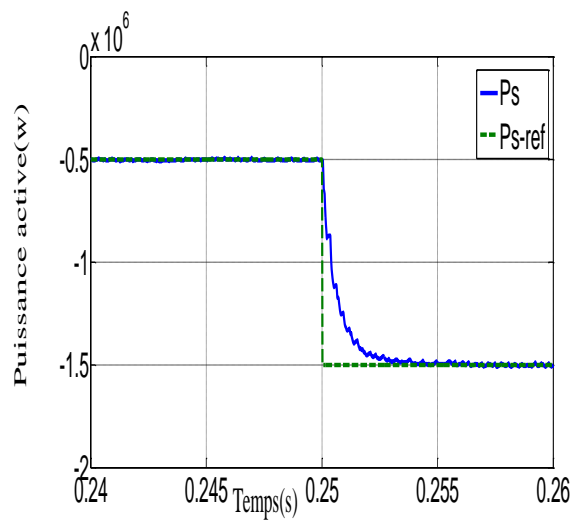
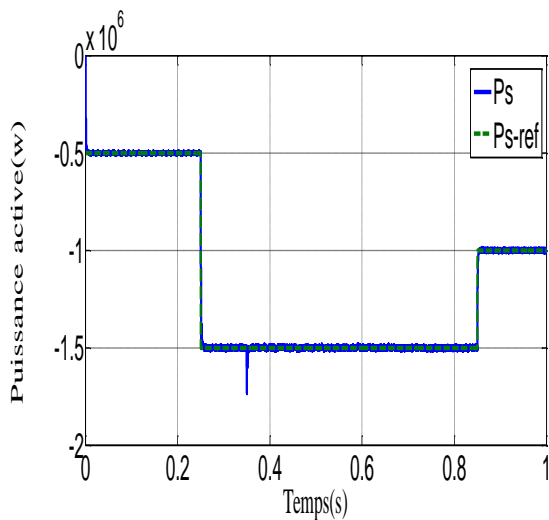


Figure.4.10- Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie basée sur logique floue appliquée à la GADA

4.8.1 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Fixe



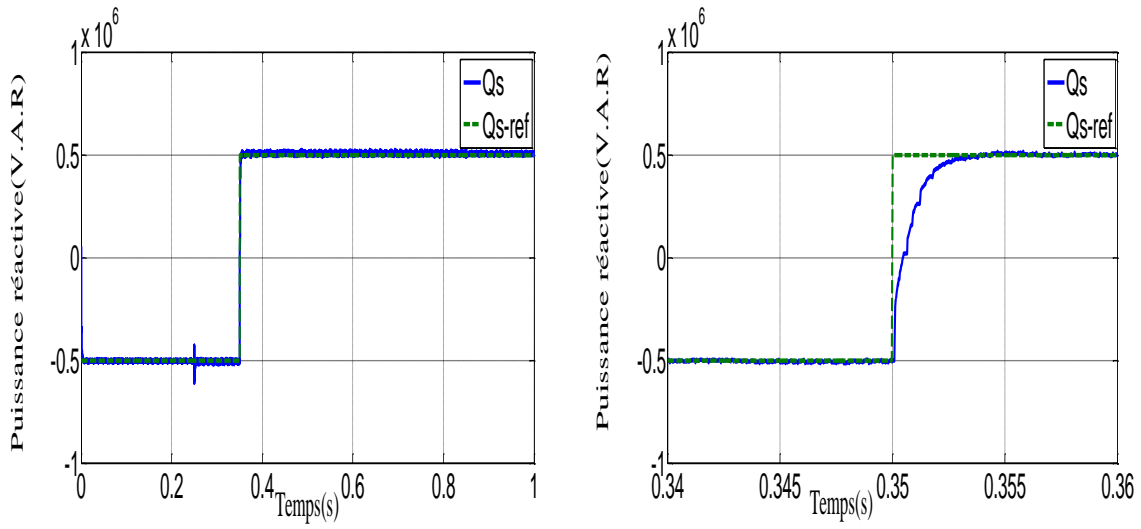
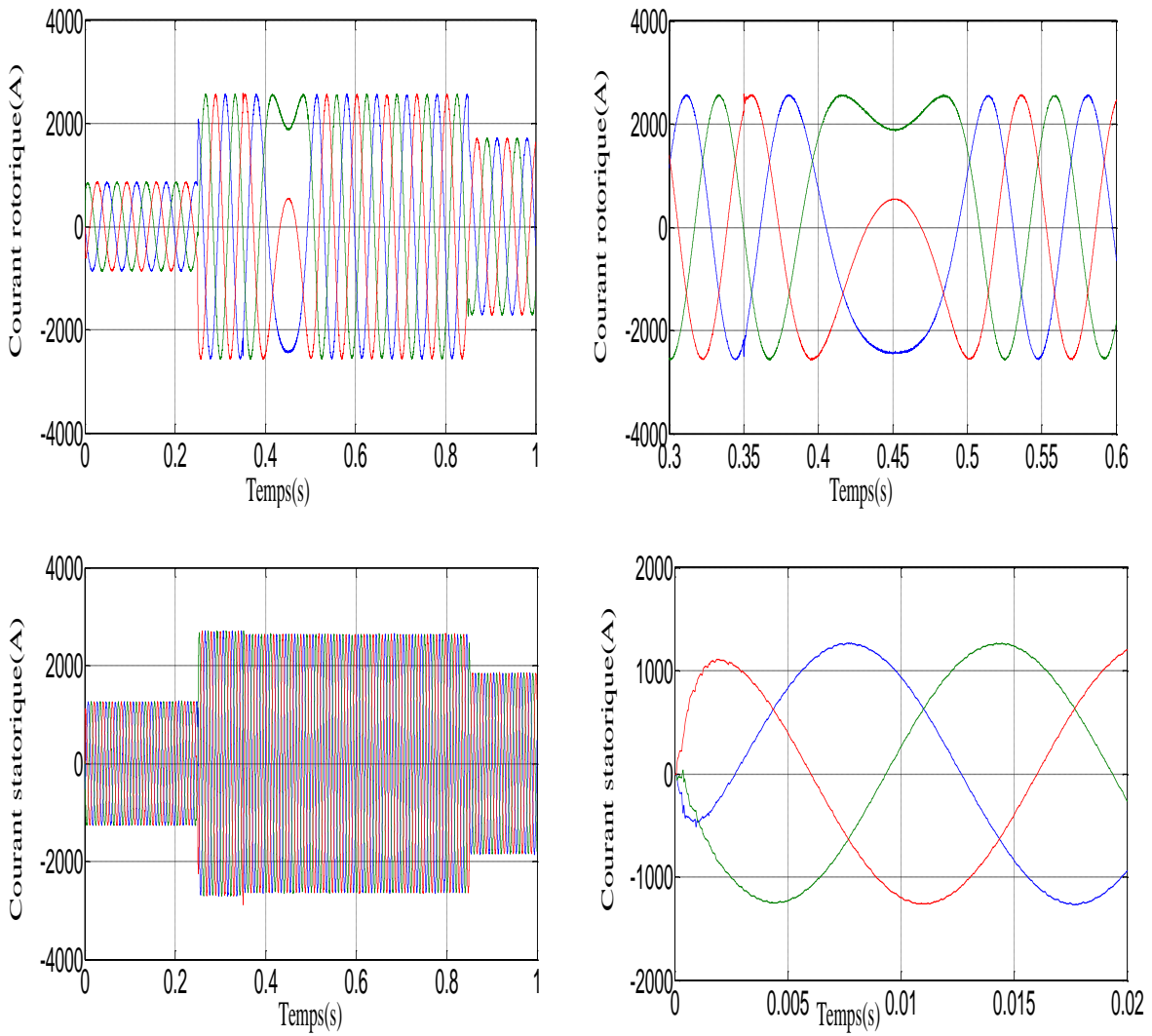


Figure.4.11- Découplage de la puissance active et réactive de la GADA par la (CNL+LF).



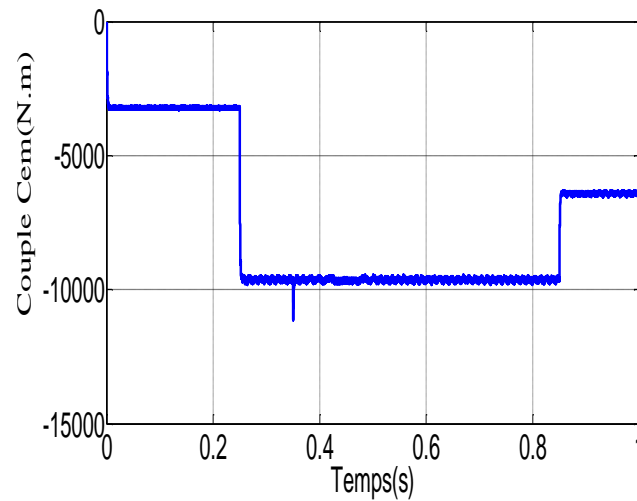


Figure.4.12-Comportement de la GADA avec la (CNL+LF)

Les résultats de simulation obtenus de la figure 4.11, on peut constater que le découplage entre la puissance active et réactive est maintenu avec des grandes performances. Dans le teste de suivi des consigne les grandeurs commandées suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances active et réactive, mais avec une légère augmentation du temps de réponse.

La figure 4.12 représente l'attitude de la MADA dans le cas de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie. Au régime transitoire, l'appelle du courant triphasé statorique est moindre et de forme sinusoïdale au régime permanent. Le couple électromagnétique et la puissance active, étant proportionnelles, sont de même allure à vitesse constante.

Le courant statorique généré par la GADA qui possède une allure sinusoïdale. Le courant rotorique semble aussi sinusoïdale, le passage du hyposynchronisme au hypersynchronisme est bien illustré.

**CHAPITRE 4 : COMMANDE NON LINEAIRE PAR LINEARISATION ENTREE SORTIE DES PUISSANCES
ACTIVE ET REACTIVE BASEE SUR LA LOGIQUE FLOUE.**

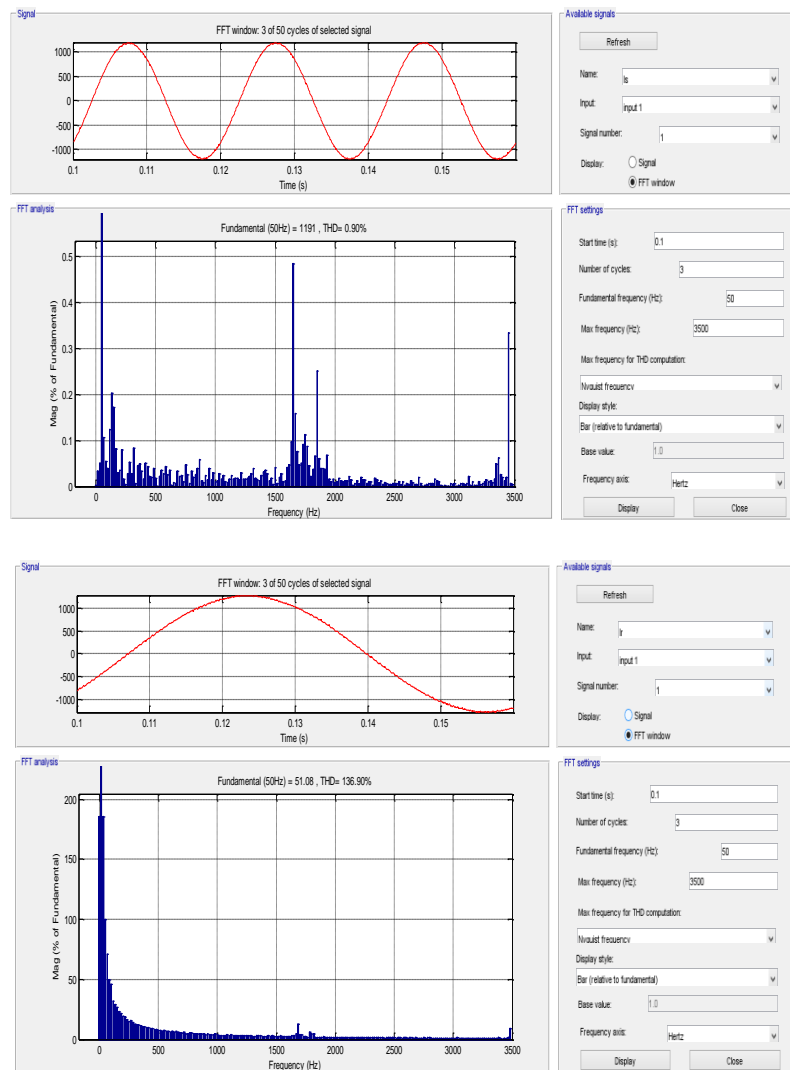


Figure.4.13-Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique

La figure 4.13 montre l'analyse spectrale pour le courant de la phase statorique et rotorique respectivement. Les résultats ont montré que la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie en utilisant des régulateurs par logique floue, on remarque une diminution du THD, dont il passe de 1.79% pour la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie à 0.92% pour la commande non linéaire par linéarisation entrée/sortie en utilisant la logique floue pour le courant statorique, et de 144.15% à 136.90% pour les courants rotorique ce qui garantit une bonne qualité de la forme d'onde.

4.8.2 Test De Robustesse De La Commande Non Linéaire par la logique floue

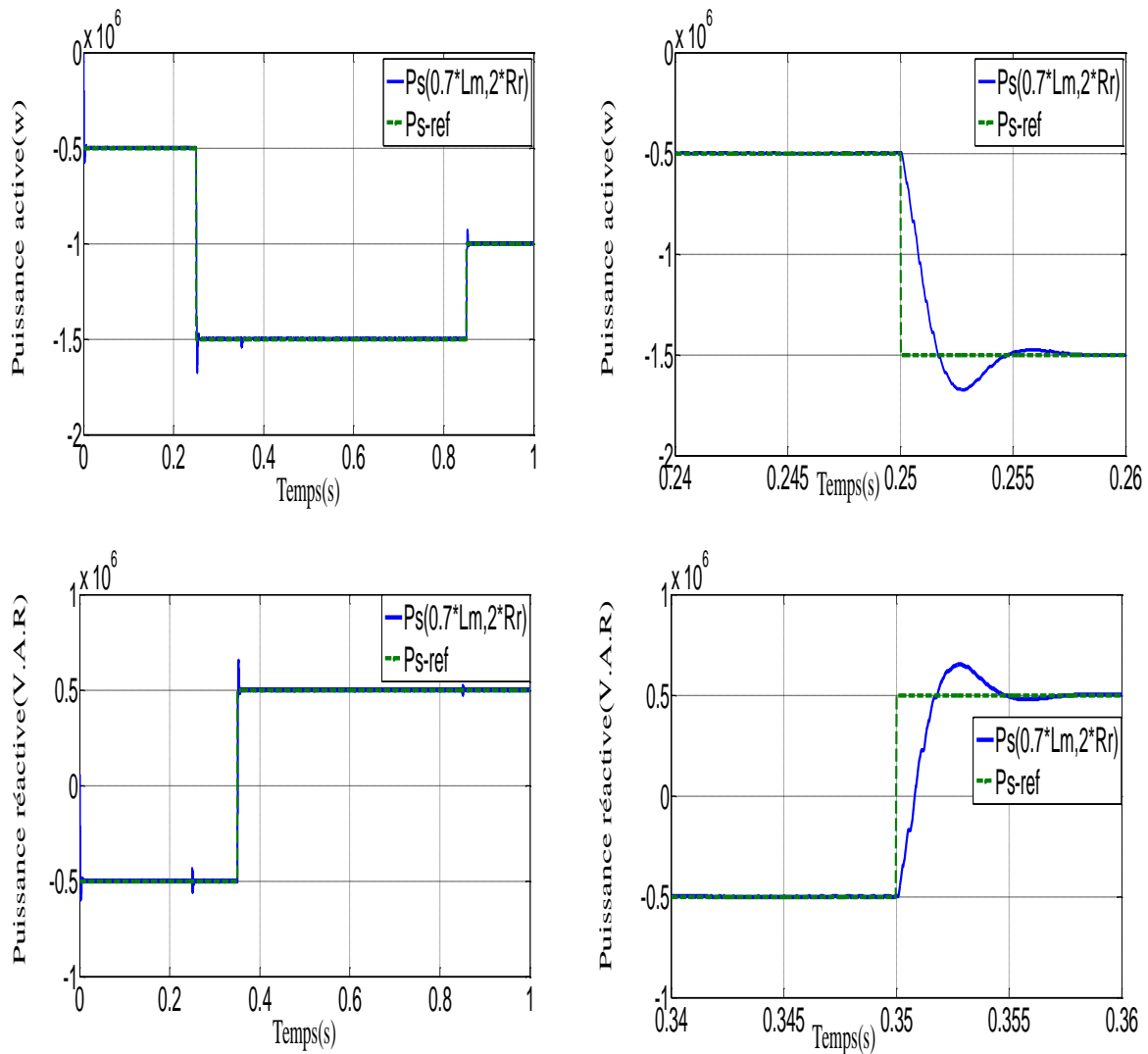


Figure.4.14-Commande non linéaire (CNL+LF) vis-à-vis les variations paramétriques de la GADA.

Les simulations sont effectuées avec les mémés conditions utilisé dans les chapitres 3.

D'après les résultats obtenus dans la figure 4.16, on peut conclure que la variation de la résistance (R_r) et l'inductance (L_m) n'ont qu'une légère influence sur le dépassement, mais le découplage entre la puissance active et réactive est toujours maintenu, se qui montre la robustesse de la commande floue.

4.8.3 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Variable

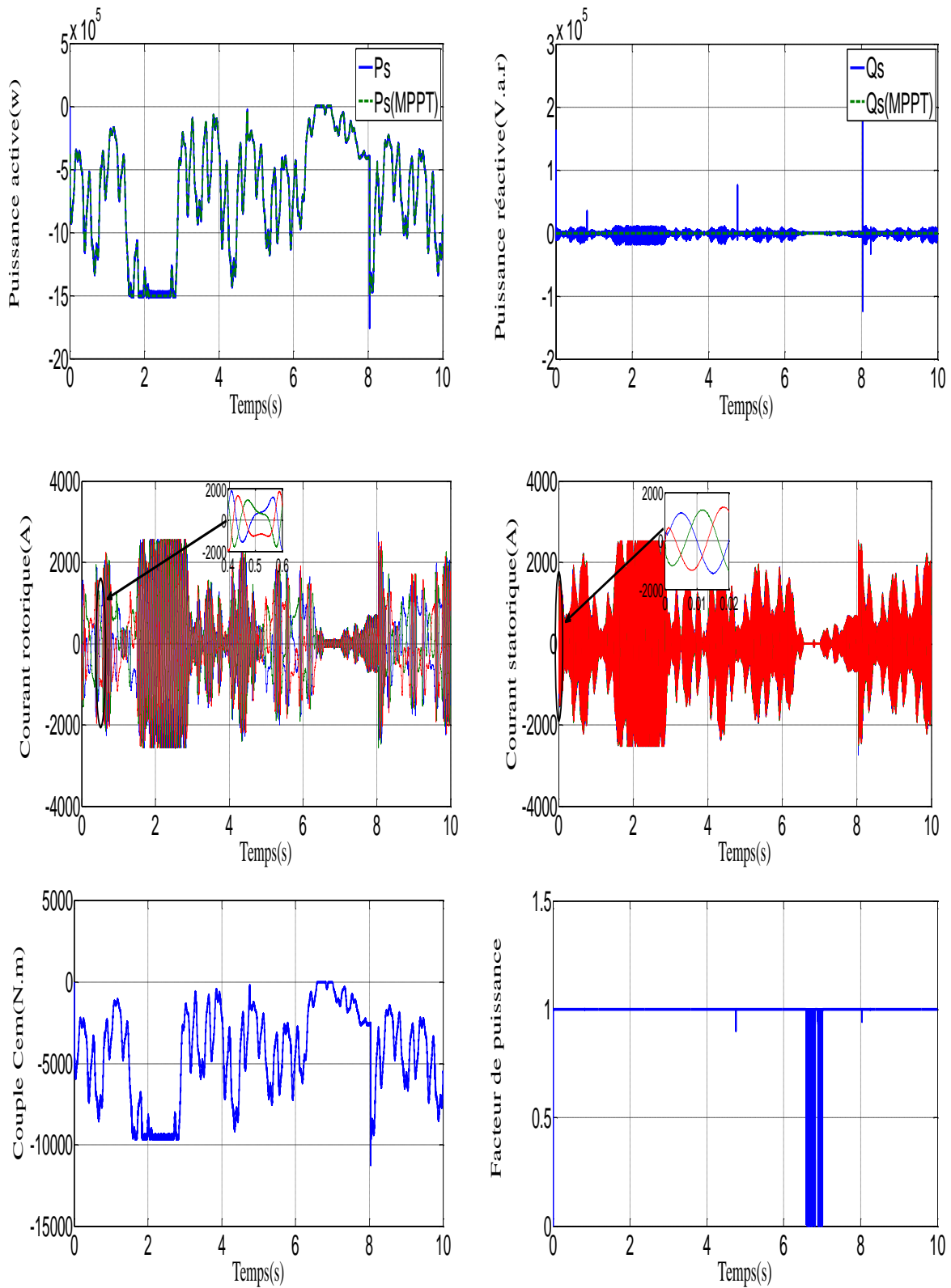


Figure.4.15 - Commande non linéaire (CNL+LF) de la GADA avec contrôle MPPT à FP=1.

Les résultats obtenus sont identiques. La puissance active statorique suit correctement sa référence générée par la turbine. Le facteur de puissance unitaire est mis en évidence pour une puissance réactive nulle obtenue après la fin de son régime transitoire.

Les courants statoriques sont sinusoïdaux, malgré les variations du profil de vent avec une fréquence 50 Hz. Les courants rotoriques sont également sinusoïdaux.

4.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande du système éolien en se basant sur la structure la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie, la technique de la logique floue a été exposée. Un contrôleur à logique floue utilisant la notion de table de décision hors ligne est implantée dans la commande linéarisante pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Ce choix de la commande a été justifié par la capacité de la logique floue à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague.

Les résultats obtenus montrent que la commande par logique floue présente des performances très satisfaisantes en terme de découplage, de suivie de consigne, erreur statique, robustesse, et le THD par rapport à la commande précédente.

Le problème majeur dans la conception d'un contrôleur flou est le choix des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sorties, qui se fait généralement grâce à l'expertise du processus.

Cependant, un système flou est difficile à appréhender. Sa commande et son réglage peuvent être relativement long. Il s'agit parfois beaucoup plus de tâtonnement que d'une réelle réflexion. Il manque donc à la logique floue une commande performante pour régler un système flou, c'est le mode glissant qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5 :

*COMMANDE NON LINEAIRE
PAR LINEARISATION ENTREE
/SORTIE DES PUISSANCES
ACTIVE ET REACTIVE BASEE
SUR MODE GLISSANT.*

5.1 INTRODUCTION

Pour éliminer l'inconvénient majeur de la commande floue, qui est le long réglage qui provoque l'augmentation du temps de réponse, on a développé une commande qui résout ce problème en assurant des résultats avec moins d'erreurs statiques, une réponse ferme et rapide, un système de contrôle stable et robuste.

La théorie de ces systèmes a été étudiée et développée en ex-union soviétique, tout d'abord le professeur EMELYANOV, puis par d'autres collaborateurs comme UTKIN, à partir des résultats des études du mathématicien FILIPPOV sur les équations différentielles à second membre discontinu. Ensuite, les travaux ont été repris ailleurs tant aux états unis par SLOTINE qu'au Japon par TONG HARASHIMA et HASHIMOTO. Ce n'est qu'à partir des années quatre-vingt que la commande des structures variables par mode de glissement est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis. [57],

Dans ce chapitre, au premier temps on va présenter le principe de la commande par mode glissant, après dans une deuxième étape on va appliquer cette commande à la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie afin de réguler les puissances d'une génératrice asynchrone à double alimentation d'un système de conversion d'énergie éolienne, et on termine notre chapitre par des simulations et interprétations qui illustrent le comportement de la commande non linéaire.

5.2 PRINCIPE DU CONTROLEUR A MODE GLISSANT

La commande par mode glissant est une classe de la commande à structure variable, elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires. La tâche principale de la commande par mode glissant est de fournir une surface de commutation, selon des lois d'existence, de convergence et de stabilité. La surface de commutation peut être atteinte par la trajectoire d'état grâce aux changements appropriés de la structure du système commandé.

Le principe de la commande à mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état à évoluer vers une surface et la faire commuter autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre à l'aide d'éléments de commutation discontinue. La surface considérée, correspondant aux dynamiques souhaitées, est alors désignée comme étant la surface de glissement et la

commande garantit que le point représentatif du système atteint l'hyper-surface en un temps fini [63].

Quand l'état du système est maintenu sur cette hypersurface, le système est dit en régime glissant, ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation dans une gamme qui reste relativement plus large, et à certaines perturbations.

Ce type de commande (CSV) présente plusieurs avantages tels que robustesse, précision importante, stabilité et simplicité, temps de réponse très faible.

Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause du problème d'identification des paramètres, soit à cause de simplification sur le modèle du système.

Ainsi, la conception de contrôleur à mode glissant passe par deux étapes essentielles :

- Déterminer le choix et le nombre des surfaces représentées par un vecteur $S(x)=0$
- Déterminer la loi de commande par une nouvelle entrée discontinue $u_n(x)$ pour attirer la trajectoire d'état vers la surface.

5.3 BASES THEORIQUES DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT

Soit un système de commande continue, représenté par le système d'état (5.1):

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t). u \quad (5.1)$$

Où: $x \in \mathbb{R}_n$ est le vecteur d'état du système, $u \in \mathbb{R}_m$ est le vecteur de commande, et $y \in \mathbb{R}_m$ est le vecteur de sortie.

Dans la commande à structure variable, la réponse d'un tel système passe en général par trois phases ou modes appelés, mode d'atteinte (Reaching Mode, RM), mode de glissement (Sliding Mode, SM) et le mode du régime permanent (steady-state mode, SS), ces modes sont illustrés dans le plan de phase sur figure 5.1.

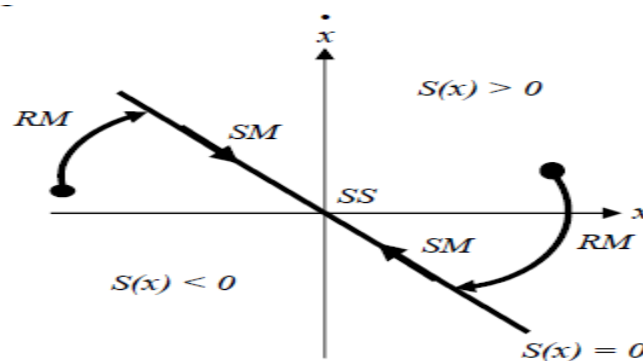


Figure.5.1 : Trajectoire d'un système de deuxième ordre à VSC

5.4 LES MODES DE LA TRAJECTOIRE DANS LE PLAN DE PHASE

La technique de la commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation approprié jusqu'au point d'équilibre [40].

Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes:

- **Mode de convergence (MC)** : Dont la variable à réguler se déplace à partir du point d'équilibre initial, en d'autres termes c'est le comportement durant lequel la variable à réguler se déplace à partir d'un état initial vers la surface de commutation.
- **Mode de régime permanent (MRP)** : Il est nécessaire pour l'étude du comportement d'un système autour du point d'équilibre.
- **Mode de glissement (MG)** : C'est le mouvement (comportement) du système le long de la surface de commutation. La dynamique dans ce mode du choix de la surface de glissement. Il apparaît quand la commande ramène l'état x sur la surface de commutation et s'efforce de l'y maintenir.

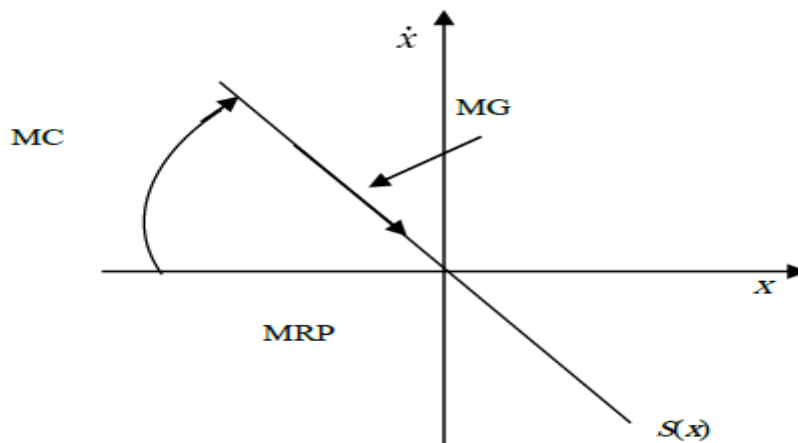


Figure.5.2- Les modes de trajectoire dans le plan de phase.

5.5 LA CONCEPTION DE LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT DE LA MADA

L'algorithme de la commande par mode glissant prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche, qui s'effectue principalement en trois étapes complémentaires définies par [58] :

- Le choix de la surface de glissement.
- L'établissement des conditions d'existence.
- La détermination de la loi de commande.

5.5.1 Choix de la surface de glissement

La surface de glissement $S(x)=0$ représente le comportement dynamique désiré du système, Stolone propose une forme générale pour déterminer la surface de glissement qui

assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur désirée $x_d(t)$ cette fonction est donnée par l'équation [56]

$$\dot{x} = A(x, t) + B(x, t). u \quad (5.2)$$

Il existe plusieurs variantes de surface. Nous trouvons dans la littérature des différentes formes de la surface de glissement, et chaque surface présente de meilleures performances pour une application donnée. Dans ce travail, nous nous intéressons à une surface du glissement de forme non linéaire suivante

$$S(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{R-1}. e(x) \quad (5.3)$$

Où :

$e(x)$: est l'erreur entre la variable à réguler et sa référence : $e(x)=x_d(t)-x(t)$

λ : est une constante strictement positive.

R : est un degré relatif.

Toutefois il y a plusieurs variantes de surfaces, citons une, qui utilise une composante intégrale définie par, elle sera traitée par la suite.

5.5.2 Condition d'existence du mode glissant

Les conditions de convergences et d'existences des critères qui garantissent les trajectoires du système et tendent $S(x)=0$ indépendamment des perturbations. Il y a deux considérations correspondantes au mode de convergence de l'état de système :

5.5.2-a Fonction directe de commutation :

C'est la première condition de convergence. Elle consiste à donner à la surface une trajectoire de convergence vers le zéro. Elle est donnée par :

$$\dot{S}(x, t) > 0 \text{ et } S(x, t) < 0 \quad (5.4)$$

$$\dot{S}(x, t) < 0 \text{ et } S(x, t) > 0 \quad (5.5)$$

Les deux équations citées ci-dessus ,peuvent être reformulées de la manière suivante :

$$\dot{S}(x, t). S(x, t) < 0 \quad (5.6)$$

5.5.2-b Fonction de Lyapunov :

la fonction de Lyapunov est donnée comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}. S(x)^2 \quad (5.7)$$

Avec $V(x)$ est une fonction scalaire positive

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (5.8)$$

5.5.3 Determination De La Loi De Commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants.

La structure d'un contrôleur par mode glissant est composée de deux termes, le premier concernant la linéarisation exacte et la deuxième concerne la stabilisation telle :

$$u = u_{eq} + u_n \quad (5.9)$$

U_{eq} : Commande équivalente pour compenser les dynamiques indésirables quand le système entre dans le mode de glissement et elle est déduite en posant la surface $S(x,t)=0$

La commande u_n est déterminée afin de vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle.

Le dérivé de la surface est :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (5.10)$$

Par substitution nous obtenons :

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} [A(x, t)x + B(x, t)u_{eq}] + \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)u_n \quad (5.11)$$

Sachant que la surface est nulle pendant le mode de glissement et en régime permanent, la dérivée et la partie discontinue u_n sont aussi nulle :

$$\begin{cases} u_n = 0 \\ \dot{S}(x, t) = 0 \end{cases} \quad (5.12)$$

L'expression de la commande équivalente peut donc donner par :

$$u_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} A(x, t) \quad (5.13)$$

Avec $\frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x, t) \neq 0$

Durant le mode convergence, en remplaçant la commande équivalente par son expression, nous obtenons une nouvelle expression de $\dot{S}(x, t)$:

$$\dot{S}(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)u_n \quad (5.14)$$

On obtient :

$$S(x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)u_n < 0 \quad (5.15)$$

5.5.4 Commande discontinue de base

Plusieurs choix pour la commande discontinue u_n peuvent être faits. La forme la plus simple que peut prendre la commande u_n est :

$$u_n = K \text{sign}(S(x, t)) \tag{5.16}$$

Où

$\text{Sign}(S(x,t))$ est la fonction définie par :

$$\text{sign}(S(x, t)) = \begin{cases} -1 & \text{si } S(x, t) < 0 \\ 1 & \text{si } S(x, t) > 0 \end{cases} \tag{5.17}$$

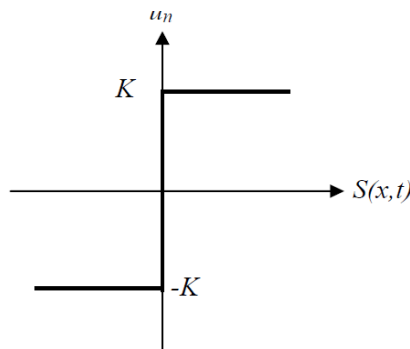


Figure.5.3-Définition de La fonction « sign »

L'utilisation de la fonction 'sign' signifie que la commande u_n commute entre deux valeurs $\mp K$ avec une fréquence théoriquement infinie causant un phénomène appelé « Chattering ». Pour surmonter cet inconvénient il suffit d'introduire une couche limite autour de la surface de glissement ($S = 0$).

5.5.5 Commande avec seuil

Cette commande est caractérisée par un seuil ϵ dans la bande qui entoure la surface de glissement $S(x)$, seule la composante continue (u_{eq}) de la commande $u = u_{eq} + u_n$ agit. La partie discontinue (u_n) étant égale à zéro, les oscillations sur les réponses sont fortement atténuées. Cependant lorsque ϵ augmente, il apparaît un écart statique sur la réponse en régulation.

La commande discontinue est définie par :

$$\begin{cases} u_n = 0 & \text{si } \left| \frac{S}{\phi} \right| < 1 \\ u_n = K \text{sign}(S(x)) & \text{si } \left| \frac{S}{\phi} \right| > 1 \end{cases} \tag{5.18}$$

Ce type de commande n'est pas très utilisée car entre le problème d'erreur statique en présence d'une perturbation u_n intervient avec toute sa valeur et des oscillations peuvent persister en régime permanent.

Un adoucissement de la commande u_n est donc nécessaire.

5.5.6 COMMANDE ADOUCIE

Cette commande est caractérisée par un seuil ε ou deux seuils ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) pour diminuer progressivement la valeur de la commande u_n . Dans cette configuration, on peut distinguer trois zones qui dépendent de la distance du point à la surface de glissement. Soit la distance est supérieure au seuil ε_2 et alors la fonction « sign » est effective. Soit la distance est inférieure au seuil ε_1 et alors u_n est nulle (zone morte) soit le point est la bande ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) et alors u_n est une fonction linéaire de la distance (droit de pente $K/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$).

Dans cette méthode d'adoucissement utilisée pour limiter les oscillations, on remarque que plus le seuil est grand, moins il y a des commutations. Néanmoins s'il est trop important, il y a problème de précision. En effet le système va évaluer dans la bande et risque donc de ne jamais atteindre le point désiré (origine du plan de phase).

En conclusion, nous pouvons résumer que les commandes adoucies :

- Limitent voire éliminer les oscillations de glissement
- Le système ayant deux point d'équilibre (P_1, P_2) et par conséquent, en régime permanent, un écart statique apparait et dépend du seuil utilisé.
- Du point de vue théorique, le mode de glissement n'existe plus parce que la trajectoire d'état n'est pas forcé de rester sur $S(x)=0$.

5.5.7 Commande continue avec composante intégrale :

Les oscillations de haute fréquence qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évitées en rendant continu la commande discontinue u_n , en remplaçant la fonction « sign » par la fonction continue voisine :

$$u_n = K \frac{S(x)}{|S(x)+\lambda|} \quad (5.19)$$

Où λ est un paramètre définissant le degré d'atténuation des oscillations. Lorsque λ tend vers zéro, on tend vers la même commande discontinue définie par, la fonction u_n continue est illustrée sur la figure :

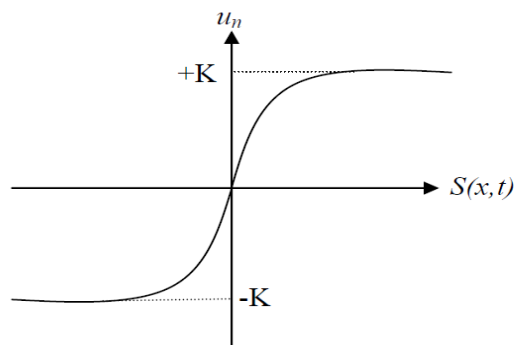


Figure. 5.4- Commande u_n intégrale

Pour augmenter la précision de la réponse du système, on peut utiliser une commande continue incluant une composante intégrale qui devient active lorsque le point est proche de la surface.

Le compensateur intégral diminue l'erreur en régime permanent, mais il est souvent indésirable pour les régimes transitoires brusques car il provoque des oscillations supplémentaires sur la réponse. La commande u_n dans ce cas devient :

$$u_n = \frac{S(x)}{|S(x)+\lambda|} + \eta \quad (5.20)$$

5.6 APPLICATION DE LA REGULATION PAR MODE GLISSANT A LA COMMANDE NON LINEAIRE DE LA GADA

Le contrôle du mode glissant est un contrôle puissant non linéaire, qui a été analysé par de nombreux chercheurs. La loi de contrôle du mode glissant comprend deux parties principales qui sont le calcul de la puissance active et réactive :

➤ Puissance active P_s

$$S_1 = (P_s^{ref} - P_s) + K_1 \int (P_s^{ref} - P_s) dt \quad (5.21)$$

Si on introduit l'erreur en puissance active :

$$e_{P_s} = P_s^{ref} - P_s \quad (5.22)$$

On aura

$$S_1 = e_{P_s} + K_2 \int e_{P_s} dt \quad (5.23)$$

➤ Puissance réactive Q_s

$$S_2 = (Q_s^{ref} - Q_s) + K_2 \int (Q_s^{ref} - Q_s) dt \quad (5.24)$$

Si on introduit l'erreur en puissance réactive :

$$e_{Q_s} = Q_s^{ref} - Q_s \quad (5.25)$$

On aura

$$S_2 = e_{Q_s} + K_2 \int e_{Q_s} dt \quad (5.26)$$

Où : K_1 et K_2 sont des gains positifs

Pour que les variables choisies convergent vers leurs valeurs de référence il faut que les deux surfaces de glissement soient nulles [61].

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = 0 \\ \dot{S}_2 = 0 \end{cases} \quad (5.27)$$

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 \quad (5.28)$$

$$\dot{e}_2 = -K_2 e_2 \quad (5.29)$$

Par conséquent pour une surface de glissement nulle ($S(P)$ et $S(Q)=0$) les puissances active et réactive statorique convergeant exponentiellement vers leurs références. Alors pour suivre P_s^{ref} et Q_s^{ref} il suffit de rendre la surface de glissement attractive et invariante.

Le concept de contrôle équivalent d'une surface glissante est le contrôle continu qui permet la maintenance de l'état de la trajectoire sur la surface de glissement $S=\dot{S}=0$. Nous pouvons obtenir le contrôle équivalent de (5.21) et (5.24)

$$\dot{S}_1 = \dot{e}_1 + K_1 e_1 = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 + \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s} u_{rq} + v_1 \quad (5.30)$$

$$\dot{S}_2 = \dot{e}_2 + K_2 e_2 = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 + \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rd} + v_2 \quad (5.31)$$

En remplaçant l'expression de u_{rq} et u_{rd} par les commandes équivalente et discrète ($u_{rreq} + u_{rqn}$), ($u_{rdeq} + u_{rdn}$) dans l'équation précédente, on trouve :

$$\dot{S}_1 = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 + \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} (u_{rreq} + u_{rqn}) + v_1 \quad (5.32)$$

$$\dot{S}_2 = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 + \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} (u_{rdeq} + u_{rdn}) + v_2 \quad (5.33)$$

Où v_1 et v_2 coïncident avec les nouvelles entrées du système défini en (3.11) et (3.29), dont les expressions sont $v_1 = \dot{P}_s^{ref} + K_1 e_1$, $v_2 = \dot{Q}_s^{ref} + K_2 e_2$. Finalement, le contrôle équivalent est obtenu en posant $\dot{S}_1 = \dot{S}_2 = 0$, donc :

$$u_{rreq} = -\frac{2}{3} \frac{\sigma L_s L_r}{L_m u_{sq}} \left(-\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 + v_1 \right) \quad (5.34)$$

$$u_{rdeq} = -\frac{2}{3} \frac{\sigma L_s L_r}{L_m u_{sq}} \left(-\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 + v_2 \right) \quad (5.35)$$

Il est intéressant de noter que le contrôle équivalent obtenu est le même que celui obtenu en que ceux obtenus en (3.29). Maintenant, afin de conduire les variables d'état à la surface de glissement $S_1=S_2=0$, les lois de contrôle suivantes sont définies:

$$u_{rq} = u_{rreq} + u_{rqn} = u_{rreq} + k_1 \text{sign}(S_1) \quad (5.36)$$

$$u_{rd} = u_{rdeq} + u_{rdn} = u_{rdeq} + k_2 \text{sign}(S_2) \quad (5.37)$$

Où $k_1 > 0$ et $k_2 > 0$ et sont des fonctions de commutation qui assurent que les trajectoires d'état sont maintenues sur les surfaces de glissement.

À ce moment, la loi attractive peut être dérivée en substituant (5.36) en (5.31) et (5.37) en (5.30), on obtient

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = k_1 \text{sign}(S_1) \\ \dot{S}_2 = k_2 \text{sign}(S_2) \end{cases} \quad (5.38)$$

Maintenant, la stabilité du contrôle par mode glissant peut être testée en utilisant la fonction de Lyapunov

$$V_1 = \frac{1}{2} S^T S \tag{5.39}$$

dont la dérivée temporelle est

$$\dot{V}_1 = S^T \dot{S} = -K_1 |s_1| - K_2 |s_2| \tag{5.40}$$

5.7 RESULTATS DE SIMULATION

La simulation est faite en utilisant Matlab / Simulink pour un générateur 1.5MW, dont les paramètres sont donnés dans tableau 3 de l'annexe, couplé à une grille 398V/ 50. Figure 5.5 montre le schéma de principe de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie en utilisant des régulateurs à mode glissant.

Par la suite, les tests sont effectués, test de suivi de consigne et robustesse face aux variations des paramètres et le Spectre harmonique des courants.

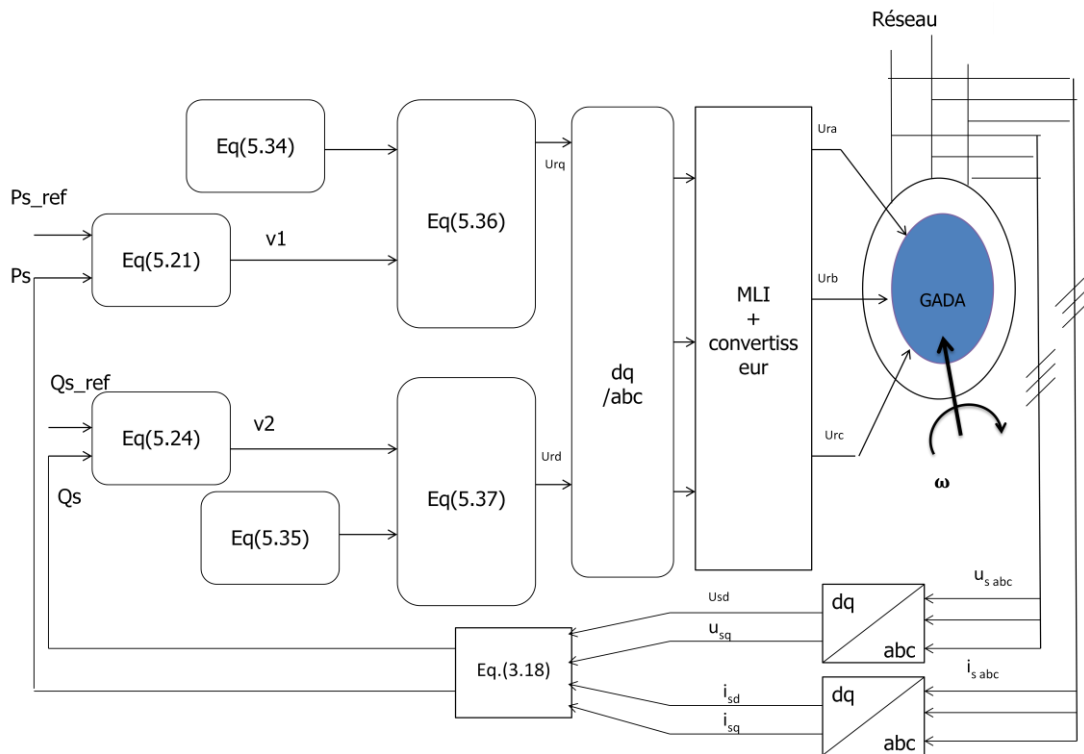


Figure.5.5- Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie basée sur mode glissant appliquée à la GADA

5.7.1 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Fixe

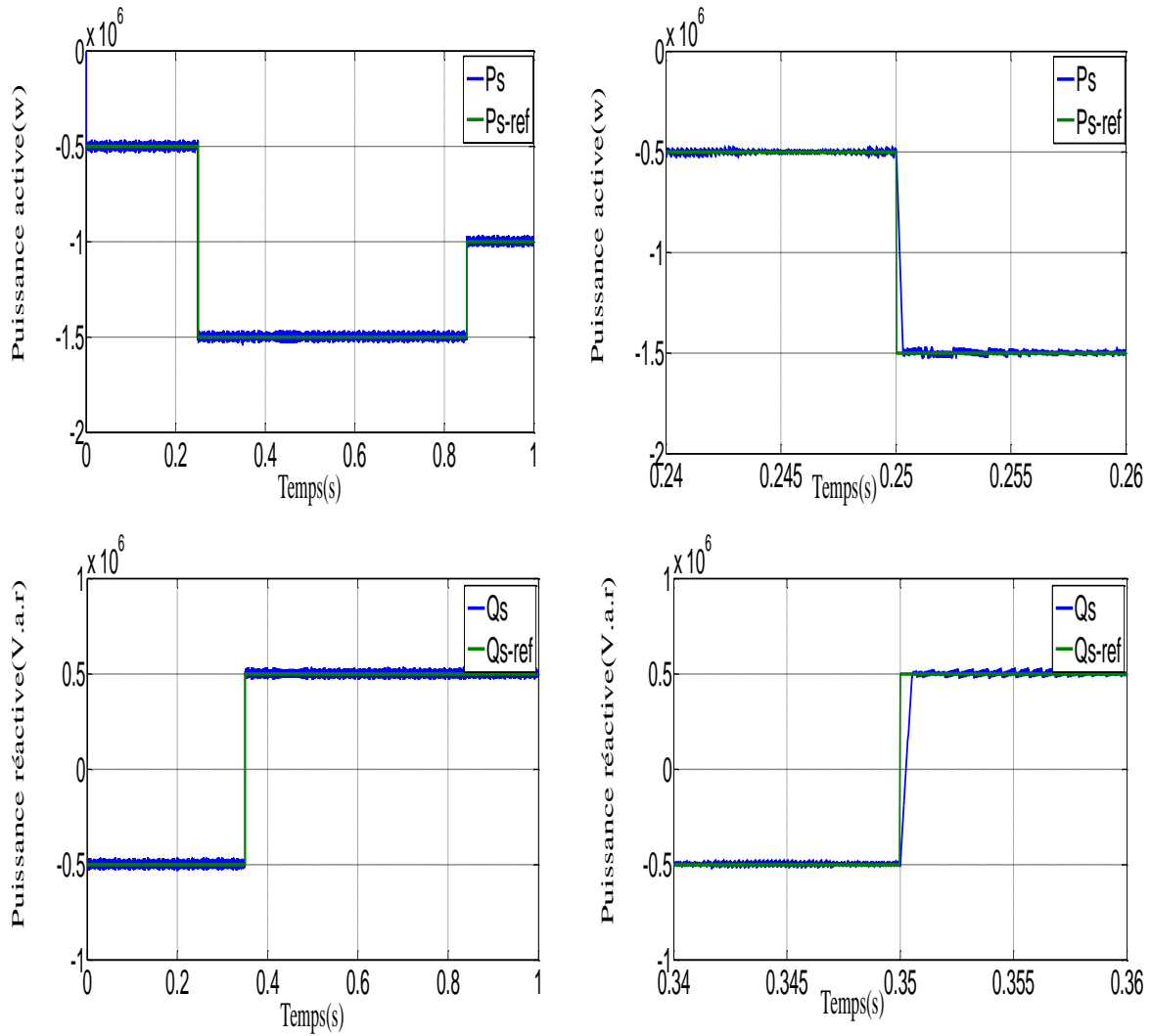
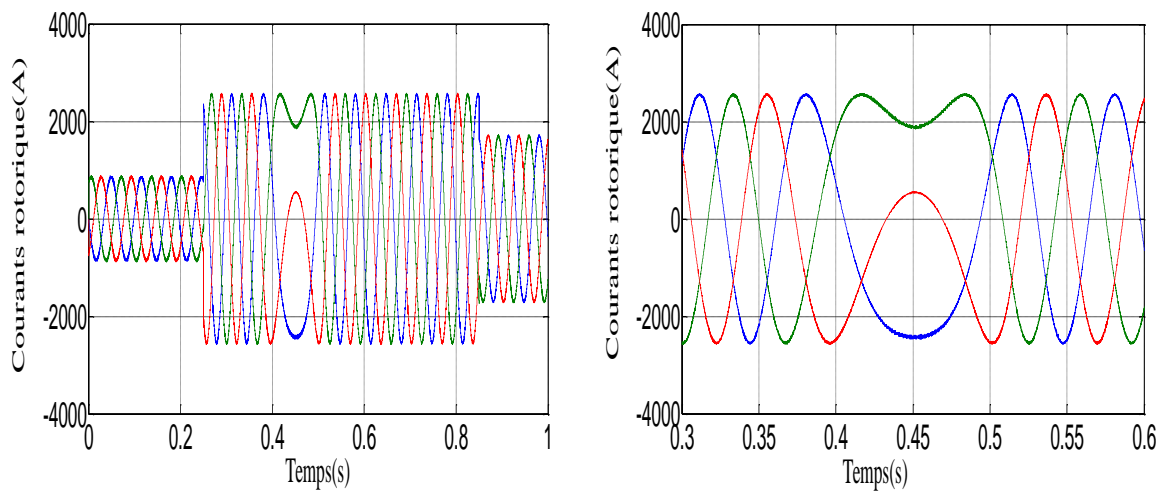


Figure.5.6- Découplage de la puissance active et réactive de la GADA par la(CNL+MG).



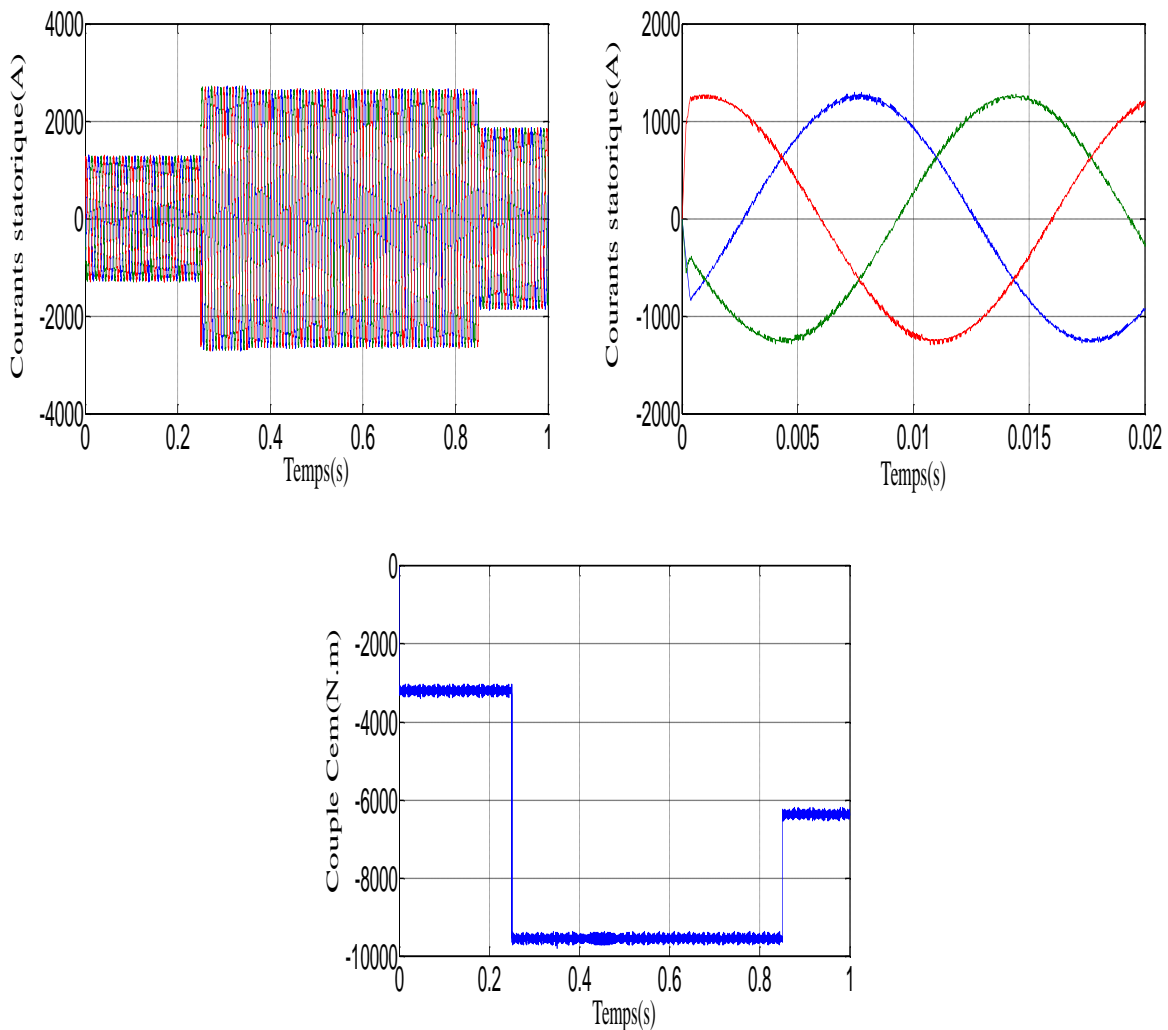


Figure.5.7-Comportement de la GADA avec la commande non linéaire(CNL+MG)

Les résultats de simulation obtenus de la figure 5.6 sont identiques à ceux trouvés dans les commandes précédentes ,ou le découplage entre la puissance active et réactive est maintenu avec des grandes performances. Dans le teste de suivi des consigne les grandeurs commandées suivent bien leurs trajectoires de référence, sans dépassement des puissances active et réactive, temps de réponse très rapide par raport aux techniques vue précédament.

La figure 5.7 représente l'attitude de la GADA dans le cas de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie par mode glissant. Au démarrage, l'appelle du courant triphasé statorique est moindre et de forme sinusoïdale au régime permanent. Le couple électromagnétique et la puissance active, étant proportionnelles, sont de même allure à vitesse constante.

Le courant statorique généré par la GADA possède une allure sinusoïdale. Le courant rotorique semble aussi sinusoïdale, le passage du hyposynchronisme au hypersynchronisme est très clair autour de l'instant 0.4s.

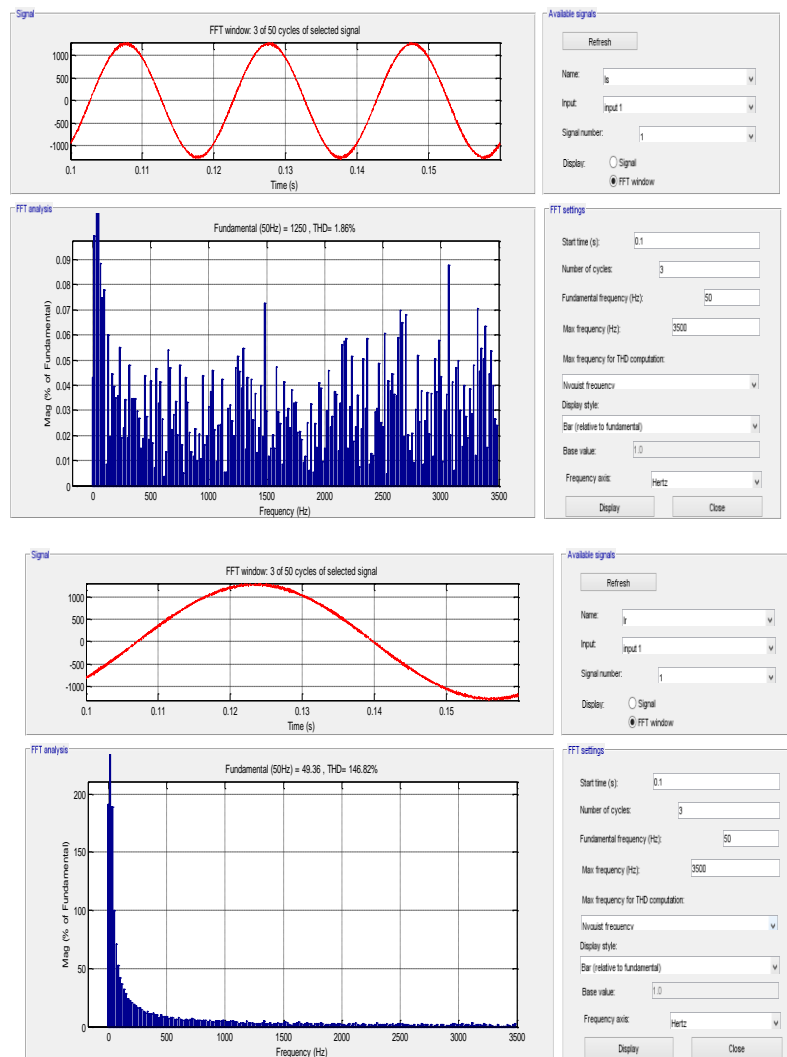


Figure.5.8-Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique

La figure 5.8 montre respectivement l'analyse spectrale pour le courant de la phase statorique et rotorique. Les résultats ont montré que la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie en utilisant des régulateurs par mode glissant provoque une augmentation du THD pour les courants rotoriques et statoriques, dont le taux de distorsion harmonique (THD) passe de 0.90% pour la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie avec la logique floue à 1.87%, pour la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie en utilisant la mode glissant, et pour les courants rotoriques passe de 136.90 à 146.82% à cause de l'effet de chattering.

5.7.2 Test De Robustesse De La Commande Non Linéaire par le mode glissant

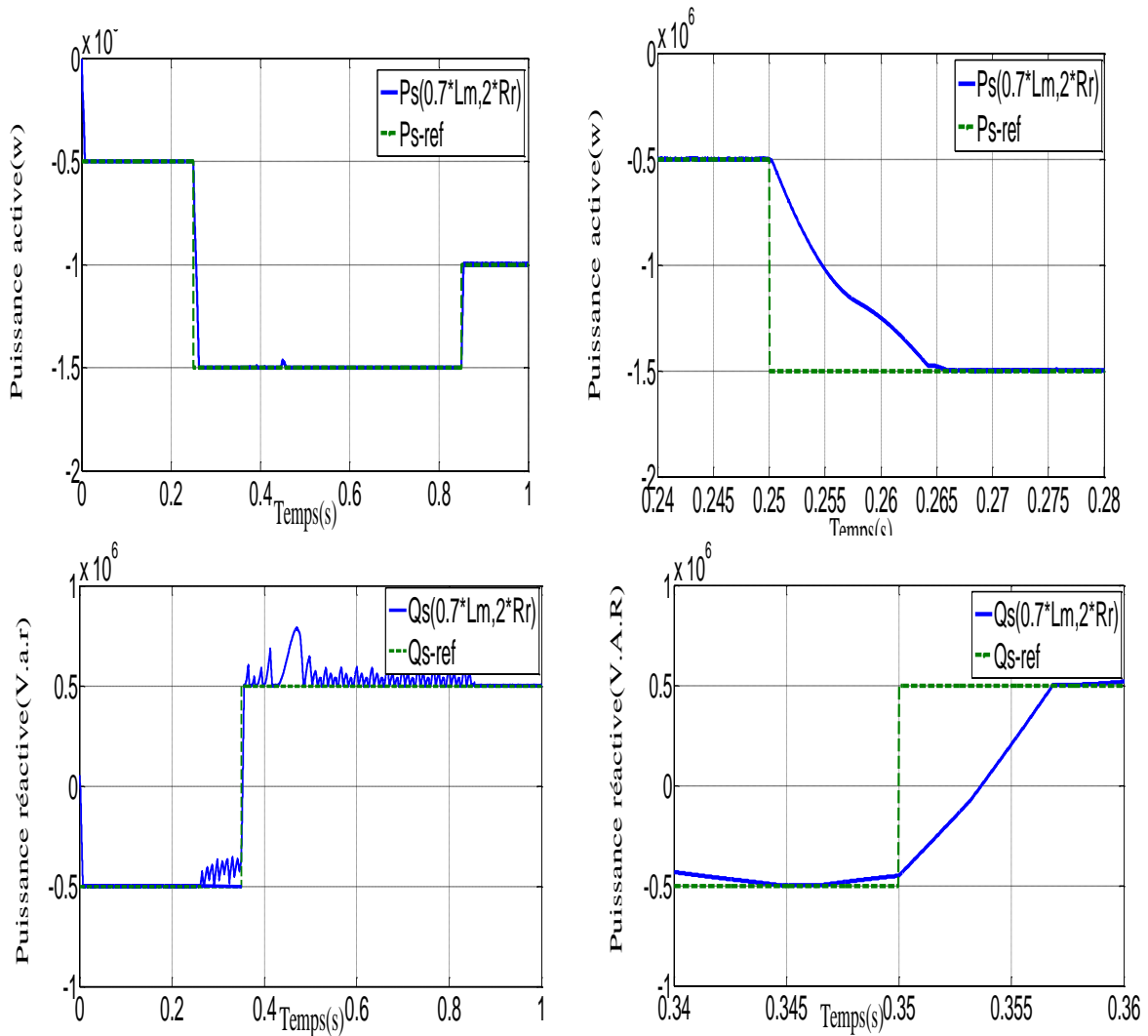


Figure.5.9- Commande non linéaire vis-à-vis les variations paramétriques de la GADA(CNL+MG)

Les simulations sont effectuées avec les mêmes conditions utilisé dans les chapitres 3 et 4

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la variation de résistance (R_r) et l'inductance (L_m) ont que très peu d'influence sur le temps de réponse et sur la puissance réactive au régime permanent, mais le découplage entre la puissance active et réactive est toujours maintenu ce qui montre la robustesse de la commande par mode glissant.

2.7.3 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Variable

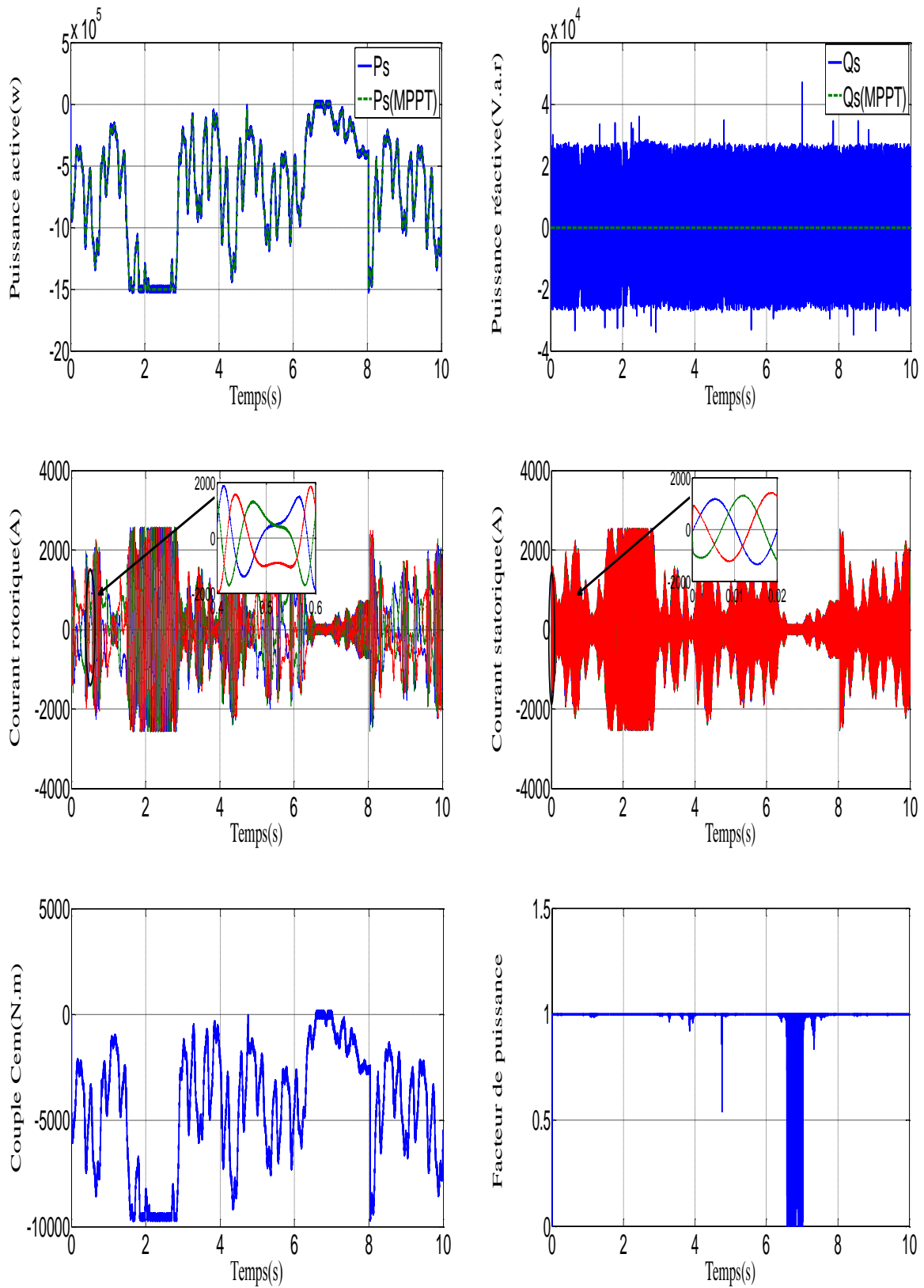


Figure.5.10 - Commande non linéaire de la GADA avec(CNL+MG) .

Pour évaluer les performances de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, munie de la MPPT et du convertisseur côté machine. Nous avons procédé à une série de simulations dans l'environnement MATLAB, avec un profil du vent choisit pour une vitesse moyenne de 8.2 m/s.

Les résultats obtenus sont sensiblement identiques. Toutefois, l'approche non linéaire présente un temps de réponse plus court.

La puissance active statorique suit correctement sa référence générée par la turbine. Le facteur de puissance unitaire est mis en évidence pour une puissance réactive nulle obtenue après la fin de son régime transitoire.

Les courants statoriques sont sinusoïdaux, malgré les variations du profil de vent avec une fréquence 50 Hz. Les courants rotoriques sont également sinusoïdaux, leur fréquence varie avec le glissement.

5.8 CONCLUSION

La régulation des puissances active et réactive de la commande non-linéaire par linéarisation Entrée/Sortie utilisant des régulateurs par mode glissant, a permis d'améliorer les performances par rapport aux régulateurs floue. Car, les régulateurs par mode de glissement offrent de bonnes performances statiques et dynamiques (suivi des consignes, temps de réponse très rapide, erreur statique éliminée...etc.),

Les résultats de la simulation montrent aussi la robustesse de la commande non-linéaire par linéarisation Entrée/Sortie utilisant des régulateurs par mode glissant vis-à-vis des variations paramétriques. Ceci prouve que l'hypothèse précédente n'affecte pas les performances de la commande des puissances de la GADA.

On peut ce pendant noter que les performances du système peuvent être altérées à cause des oscillations fortes de l'organe de commande, (l'effet Chattering). Pour remédier ce problème on fait appel à une autre technique de commande qui permet de réduire ce phénomène, cette technique est appelée control par backstepping de la GADA et qui sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 6 :

*COMMANDE NON
LINEAIRE PAR LINEARISATION
ENTREE / SORTIE DES
PUISSANCES ACTIVE ET
REACTIVE BASEE SUR
BACKSTEPPING.*

6.1 INTRODUCTION

Le mécanisme de backstepping contrôleur pour la régulation des puissances active et réactive a également été appliqué à la commande des entraînements des générateurs en raison de leurs bonnes performances dans une large gamme de conditions de fonctionnement. L'idée de base de la conception de ce contrôle est l'utilisation du «contrôle virtuel» pour décomposer systématiquement un problème de conception de contrôle non linéaire complexe en plus simples et plus petits. La conception de contrôle de backstepping est divisée en différentes étapes de conception. Chaque étape traite d'un seul problème de conception d'entrée-sortie, et chaque étape fournit une référence pour l'étape de conception suivante. La stabilité globale et la performance sont obtenues par la théorie de Lyapunov pour l'ensemble du système [46].

Ce chapitre est consacré à l'étude de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie basée sur des régulateurs à Backstepping de la MADA. Cette approche consiste à trouver une fonction de Lyapunov qui permet de déduire une loi de commande pour le système tout en montrant la stabilité globale de cette commande. La commande ainsi obtenue, permet d'assurer le suivi des puissances active et réactive en assurant à chaque fois des dynamiques stables pour les erreurs entre des grandeurs réelles et de références. Des résultats de simulation seront présentés à la fin de ce chapitre.

6.2 GENERALITES SUR LE PRINCIPE DU BACKSTEPPING

6.2.1 Historique

Le backstepping a été développé par Kanellakopoulos et al. (1991) et inspiré par les travaux de Feurer et Morse (1978) d'une part et Tsiniias (1989) et Kokotovii & Sussmann (1989) d'autre part. Elle offre une méthode systématique pour effectuer le design d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires. L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction (de Lyapunov) soit définie positive et que cette dérivée soit toujours négative. La méthode consiste à fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant.

6.3 CONCEPTION DE LA COMMANDE DE TYPE BACKSTEPPING

Cette méthode s'applique à des systèmes ayant une forme dite triangulaire, telle que l'indique la représentation d'état suivante:

$$x_1 = f_1(x_1, x_2) + g_0(x_1, x_2)x_3 \quad (6.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 \\ x_2 = f_1(x_1, x_2) + g_0(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n = f_1(x_1, \dots, x_n) + g_0(x_1, \dots, x_n)u \end{array} \right. \quad (6.2)$$

Avec $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$

On désire faire suivre à la sortie $y=x$ le signal de référence y_{ref} supposée connue. Le système étant d'ordre n , la conception s'effectue en n étapes.

On commence par la première équation du système (6.2) où x_2 sera considéré comme une commande virtuelle intermédiaire. On définit la première référence désirée du sous système x_2 qui doit suivre la référence définie y_{ref} telle que :

➤ **1^{ère} étape : Réglage de la variable x_1**

$$(x_1)_d = y_{ref} = \alpha_0 \quad (6.3)$$

Où $(x_1)_d$ est l'état désiré

La première variable d'erreur du sous système est défini par :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (6.4)$$

$$\dot{e}_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (6.5)$$

Pour un tel sous système, nous choisissons d'abord la fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique

$$V_1 = \frac{1}{2}e_1^2 \quad (6.6)$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 \\ \dot{V}_1 &= e_1 \cdot [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] \end{aligned} \quad (6.7)$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système, il faut d'après Lyapunov, que \dot{V}_1 soit négative.

Pour cela on choisit \dot{V}_1 sous la forme :

$$\dot{V}_1 = -K_1 e_1^2 \leq 0 \quad (6.8)$$

Où $k_1 > 0$ est un paramètre constante. En substituant (6.8) dans (6.7) on trouve :

$$\dot{V}_1 = e_1 \cdot [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] = -K_1 e_1^2 \leq 0 \quad (6.9)$$

Cela donne la commande virtuelle x_2

$$x_2 = \frac{1}{g_0(x_1)} \cdot [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \quad (6.10)$$

D'où la stabilité asymptotique à l'origine.

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée x_{2ref} du sous système suivant.

➤ **2^{ème} étape : Réglage de la variable x_2**

On considère les deux premières équations du système définie en (6.2)

$$x_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 \quad (6.11)$$

$$x_2 = f_1(x_1, x_2) + g_0(x_1; x_2)x_3 \quad (6.12)$$

Où la nouvelle référence désirée α_1 sera la variable de commande pour le sous système précédent x_{2ref} tel que:

$$y_{2ref} = \alpha_1 \quad (6.13)$$

Et la nouvelle variable d'erreur :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (6.14)$$

De la même manière, on définit la fonction de Lyapunov pour assurer la stabilité du sous système suivant :

$$x_2 = f_1(x_1, x_2) + g_0(x_1, x_2)x_3 \quad (6.15)$$

Ces fonctions dépendent forcément des états précédents du sous système définie par :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad (6.16)$$

$$V_2 = \frac{1}{2}[e_1^2 + e_2^2] \quad (6.17)$$

Cette dernière a pour dérivée :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ \dot{V}_2 &= -k_1 e_1^2 + e_2 [f_1(x_1, x_2) + g_0(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad (6.18)$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système, il faut que \dot{V}_2 soit négative. Pour cela on choisit \dot{V}_2 sous la forme :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (6.19)$$

Où $k_2 > 0$ est un paramètre constante. En substituant (6.19) dans (6.18) on trouve :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2 [f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1] = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \quad (6.20)$$

Cela donne la commande virtuelle x_3

$$x_3 = \frac{1}{g_0(x_1, x_2)} \cdot [-K_2 e_2 - f_1(x_1, x_2) + \dot{\alpha}_1] \quad (6.21)$$

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} = \frac{g_0(x_1)[-k_1 \dot{e}_1 + \ddot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] \dot{g}_1(x_1)}{g_0^2(x_1)} \quad (6.22)$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée x_{3ref} du sous système suivant. On pose $x_{3ref} = \alpha_2$ et on continue jusqu'à la dernière expression du sous système (6.2) où on atteindra le calcul de la loi de commande réelle [59].

➤ **n^{ieme} étape : Réglage de la variable n^{ieme}**

L'extension de la procédure récursive de conception de la commande par backstepping à un système d'ordre n du type [22]:

$$(x_n)_d = \alpha_{n-1} \quad (6.23)$$

La variable d'erreur de régulation :

$$e_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (6.24)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_n = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_3 - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (6.25)$$

$$\dot{e}_n = f_1(x_1 \dots \dots x_n) + g_0(x_1 \dots \dots x_2)u - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (6.26)$$

Avec la fonction de Lyapunov augmentée :

$$V_n = V_1 + \dots \dots \frac{1}{2}e_n^2 \quad (6.27)$$

$$V_n = \frac{1}{2}[e_1^2 + \dots + e_n^2] \quad (6.28)$$

La dérivée devient

$$\dot{V}_n = \dot{V}_1 + \dots e_n \dot{e}_n \quad (6.29)$$

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 + \dots + e_n [f_n(x_1 \dots x_n) + g_0(x_1 \dots x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1}] \quad (6.30)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande réelle u qui permet d'atteindre les objectifs de conception pour le système global qui contrairement aux lois x_i qui sont des lois virtuelles. Un bon choix de celle-ci doit satisfaire :

$$f_n(x_1 \dots \dots x_n) + g_n(x_1 \dots \dots x_n) - \dot{\alpha}_{n-1} = -k_n e_n^2 \quad (6.31)$$

Où $k_2 > 0$ est un paramètre de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_n(x_1 \dots x_n)} \cdot [-K_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(x_1 \dots \dots x_n)] \quad (6.32)$$

Ce qui garanti la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov augmentée

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - \dots - k_n e_n^2 \leq 0 \quad (6.33)$$

6.4 APPLICATION DE LA METHODE BACKSTEPPING POUR LA COMMANDE DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE LA MADA :

Dans cette partie on va appliquer la méthode du backstepping à la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie vue dans le chapitre trois pour une génératrice asynchrone à double alimentation et nous établirons les expressions de valeur de

commande en s'appuyant sur le modèle établi au chapitre deux pour détermine la commande des puissances active et réactive.

➤ **Etape 1**

Cette étape consiste à identifier les erreurs "e₁" et "e₂", qui représentent respectivement l'erreur entre la puissance active statorique réelle "P_s" et la puissance de référence "P_s^{ref}" qui sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, ainsi que la puissance réactive statorique "Q_s" et celui de référence "Q_s^{ref}" qui sera proportionnelle au courant rotorique d'axe d.

$$\begin{cases} e_1 = P_s^{\text{ref}} - P_s \\ e_2 = Q_s^{\text{ref}} - Q_s \end{cases} \quad (6.34)$$

La dérivée de cette erreur est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{P}_s^{\text{ref}} - \dot{P}_s \\ \dot{e}_2 = \dot{Q}_s^{\text{ref}} - \dot{Q}_s \end{cases} \quad (6.35)$$

La première fonction de Lyapunov est définie par :

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2) \quad (6.36)$$

Pour avoir la dérivée de la fonction de Lyapunov nulle, il faut choisir les erreurs comme suit

$$\dot{e}_1 = -K_1 e_1 \quad \text{et} \quad \dot{e}_2 = -K_2 e_2 \quad (6.37)$$

Alors la dérivée de la fonction de Lyapunov par rapport au temps devient :

$$\dot{V} = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \quad K_1 > 0 \text{ et } K_2 > 0 \quad (6.38)$$

La dérivée des erreurs "e₁", "e₂" devient:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{P}_s^{\text{ref}} - \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 - \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rq} \right) \\ \dot{e}_2 = \dot{Q}_s^{\text{ref}} - \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 - \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rd} \right) \end{cases} \quad (6.39)$$

➤ **Etape 2**

$$\begin{cases} -K_1 e_1 = \dot{P}_s^{\text{ref}} - \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 - \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rq} \right) + v_1 \\ -K_2 e_2 = \dot{Q}_s^{\text{ref}} - \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 - \frac{3}{2} \frac{L_m u_{sq}}{\sigma L_s L_r} u_{rd} \right) + v_2 \end{cases} \quad (6.40)$$

$$\begin{cases} u_{rq} = -\frac{2}{3} \frac{\sigma L_s L_r}{L_m u_{sq}} \left(\dot{P}_s^{\text{ref}} - \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_2 \right) + v_1 + K_1 e_1 \right) \\ u_{rd} = -\frac{2}{3} \frac{\sigma L_s L_r}{L_m u_{sq}} \left(\dot{Q}_s^{\text{ref}} - \left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} f_1 \right) + v_2 + K_2 e_2 \right) \end{cases} \quad (6.41)$$

Pour assurer la convergence de la fonction candidate de Lyapunov, en remplaçant l'expression (6.41) dans (6.38) on obtient :

$$\dot{V}(e_1) = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 < 0 \quad (6.42)$$

Avec k₂ constante positive.

6.5 RESULTATS DE SIMULATION

La simulation est faite en utilisant Matlab / Simulink pour un générateur 1.5MW, dont les paramètres sont donnés dans tableau 3 de l'annexe, couplé à une grille 398V/ 50. Figure 6.1 montre le schéma de principe de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie en utilisant des régulateurs à backstepping.

Par la suite, les tests sont effectués, test de suivi de consigne et robustesse face aux variations des paramètres et le Spectre harmonique des courants.

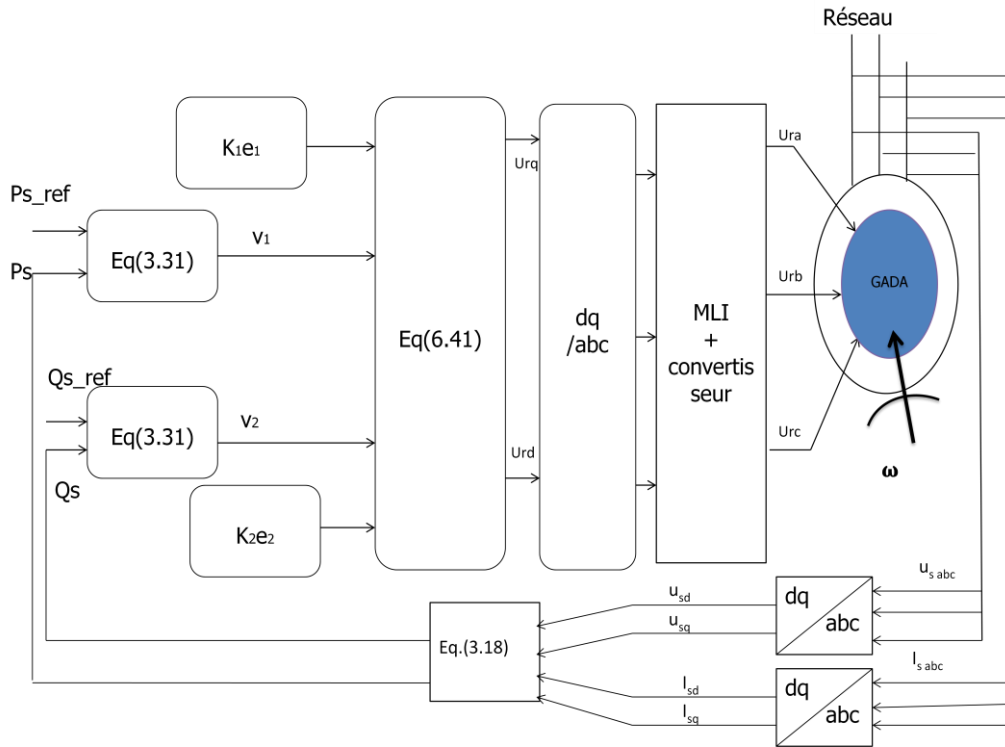
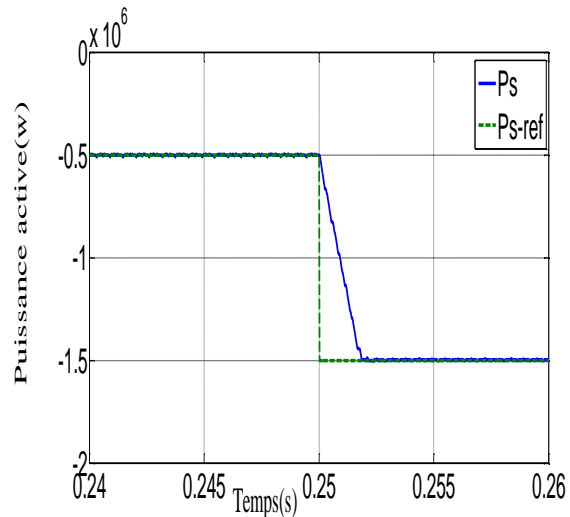
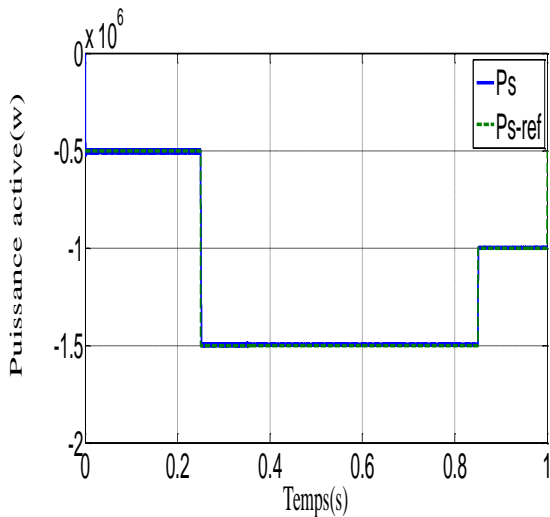


Figure.6.1- Schéma bloc de linéarisation Entrée/Sortie basée sur backstepping appliquée à la GADA

6.5.1 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Fixe



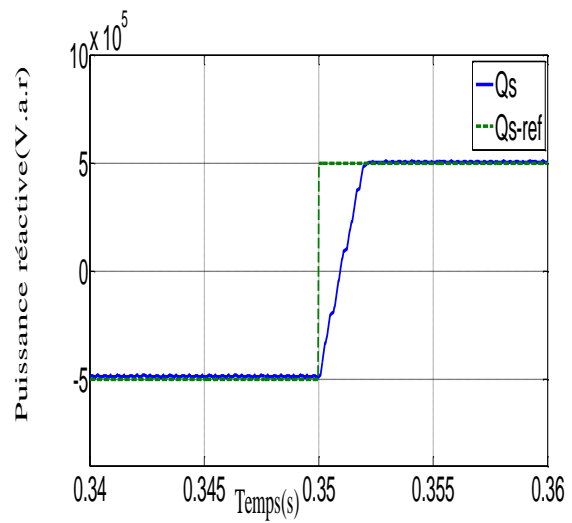
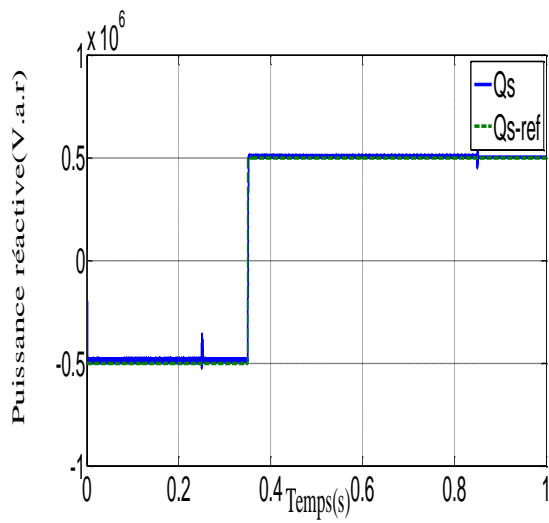
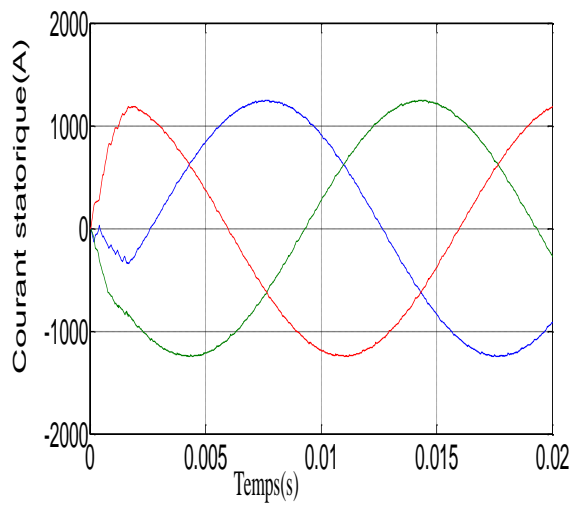
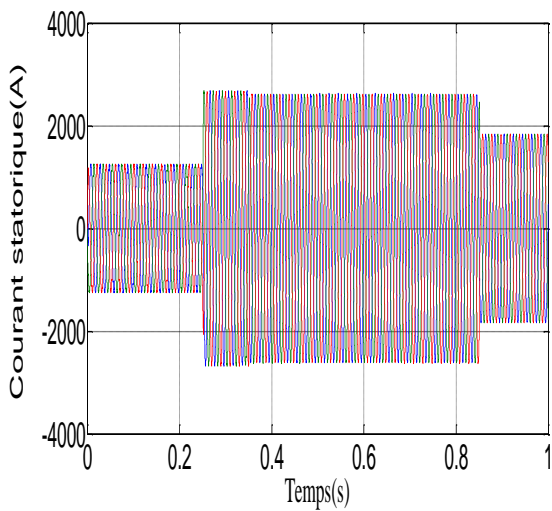
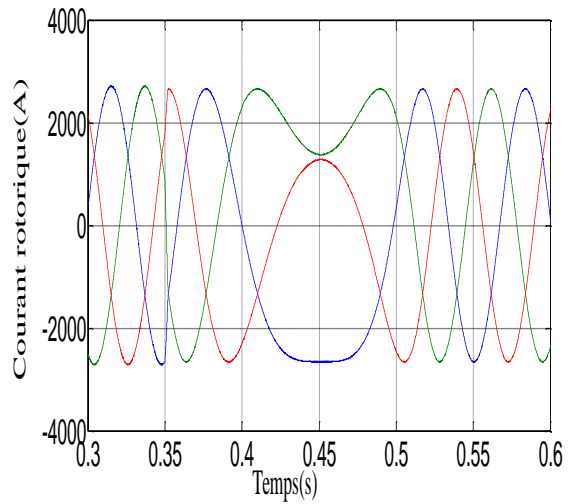
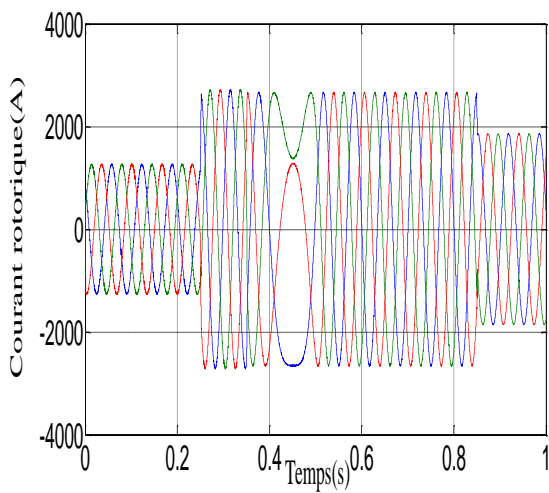


Figure.6.2- Découplage de la puissance active et réactive de la MADA par la (CNL+Bs).



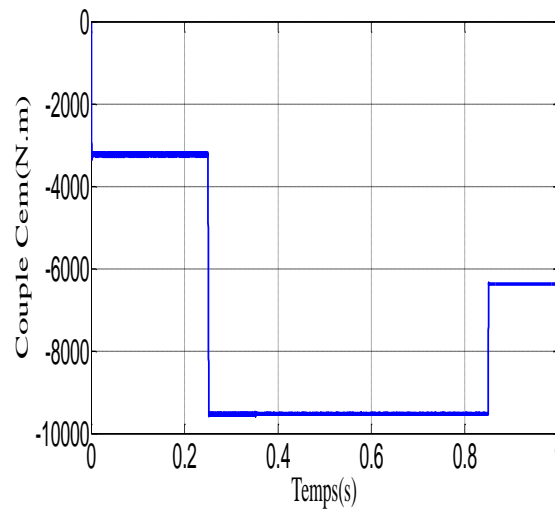


Figure.6.3-Comportement de la MADA avec la commande non linéaire (CNL+B_s)

D'après les résultats de simulation obtenus de la figure 6.2, on peut voir que les puissances active et réactive sont découplées avec des grandes performances. Dans le test de suivi des consignes les grandeurs commandées suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances active et réactive avec temps de réponse rapide et erreur presque nulle, nous remarquons aussi que le « chattering » provoqué par la commande précédente est diminué. .

La figure 6.3, représente l'attitude de la MADA dans le cas de la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie. Au démarrage, l'appelle du courant triphasé statorique est moindre et de forme sinusoïdale au régime permanent. Le couple électromagnétique et la puissance active, étant proportionnelles, sont de même allure à vitesse constante.

Le courant statorique généré par la MADA possède une allure sinusoïdale. Le courant rotorique est aussi sinusoïdale, le passage du hyposynchronisme au hypersynchronisme est toujours maintenu.

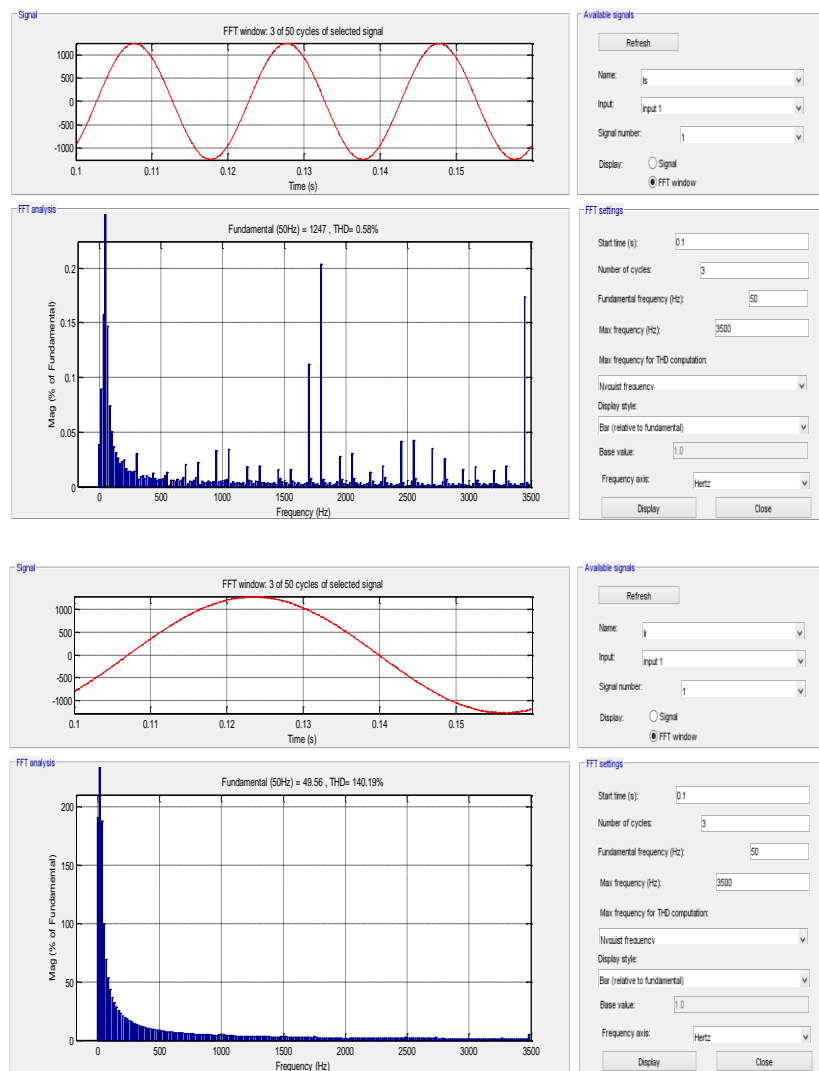


Figure.6.4-Spectre harmonique des courants : phase statorique et rotorique

La figure 5.7 montre respectivement l'analyse spectrale pour le courant de la phase statorique et rotorique. Les résultats ont montré que la commande non linéaire par linéarisation entrée/sortie par le backstepping garantit une meilleure qualité de la forme d'onde du courant rotorique, dont le taux de distorsion harmonique (THD) passe de 1.87% pour la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie avec la mode glissant à 0.58%, pour la commande non linéaire en utilisant le backstepping, et le taux de distorsion pour les courants rotoriques passe de 146.82% à 140.19%.

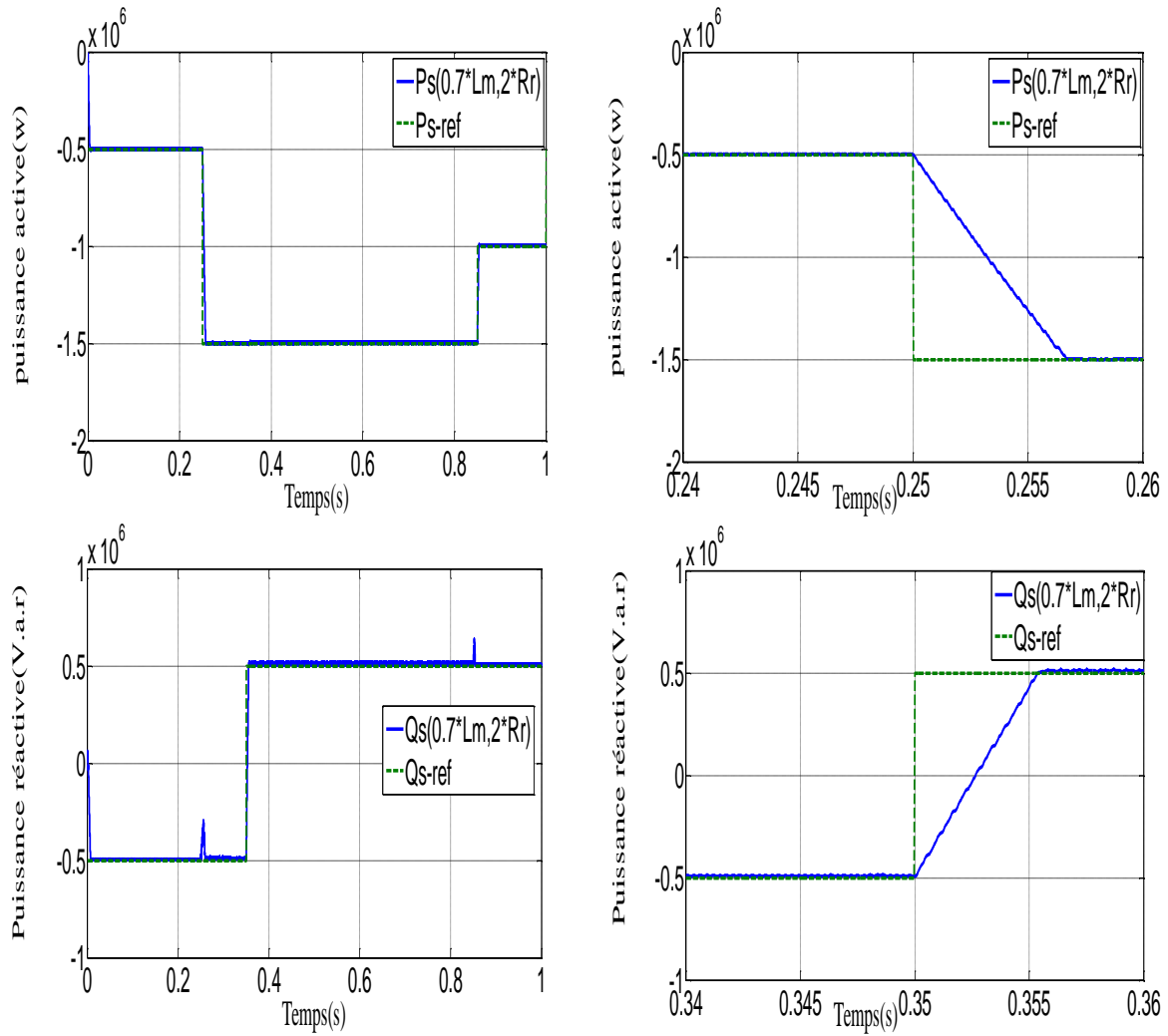


Figure.6.5- Commande non linéaire vis-à-vis les variations paramétriques de la MADA (CNL+B_s)

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que la variation de résistance (R_r) et l'inductance (L_m) n'a pas beaucoup influencé sur le système sauf une légère augmentation du temps de réponse au régime permanent de la puissance active et réactive, mais le découplage est toujours maintenu se qui confirme la robustesse de la commande par backstepping.

6.5.3 Fonctionnement A Vitesse Du Vent Variable

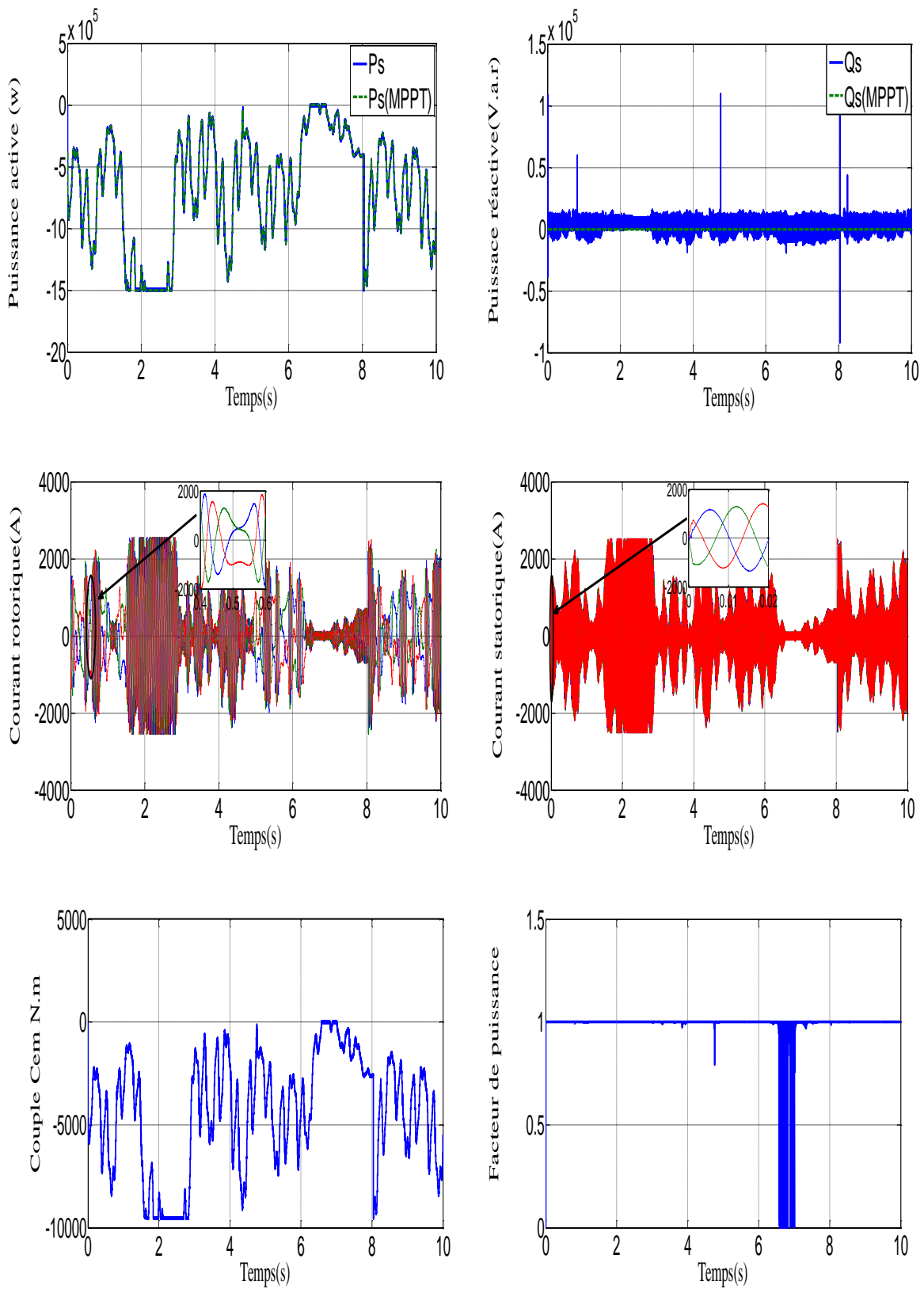


Figure.6.6-Commande non linéaire de la MADA avec (CNL+B_s).

Les résultats obtenus sont sensiblement identiques. Toute fois, l'approche non linéaire présente un temps de réponse court.

La puissance active statorique suit correctement sa référence générée par la turbine. Le facteur de puissance unitaire est mis en évidence pour une puissance réactive nulle obtenue après la fin de son régime transitoire.

Les courants statoriques sont sinusoïdaux, malgré les variations du profil de. Les courants rotoriques sont également sinusoïdaux le couple électromagnétique est proportionnel à la puissance active.

6.5.4 Etude Comparative Entre Les Techniques De Commande Proposées

Le but dans cette partie est de réaliser une comparaison entre les différentes commandes que nous avons présentées dans les chapitres précédents.

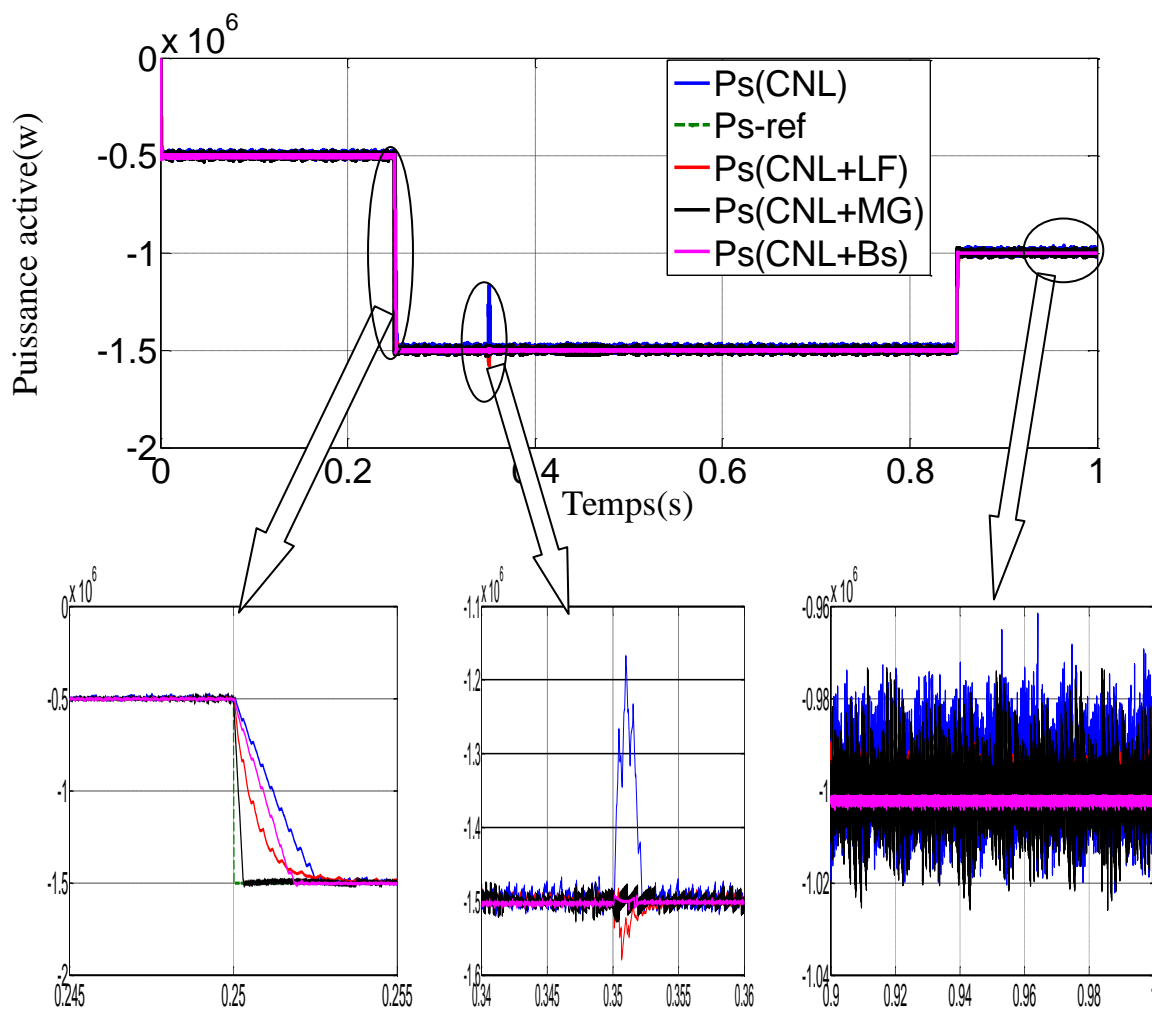


Figure.6.7-Puissance active statorique pour les 4 commandes avec un zoom

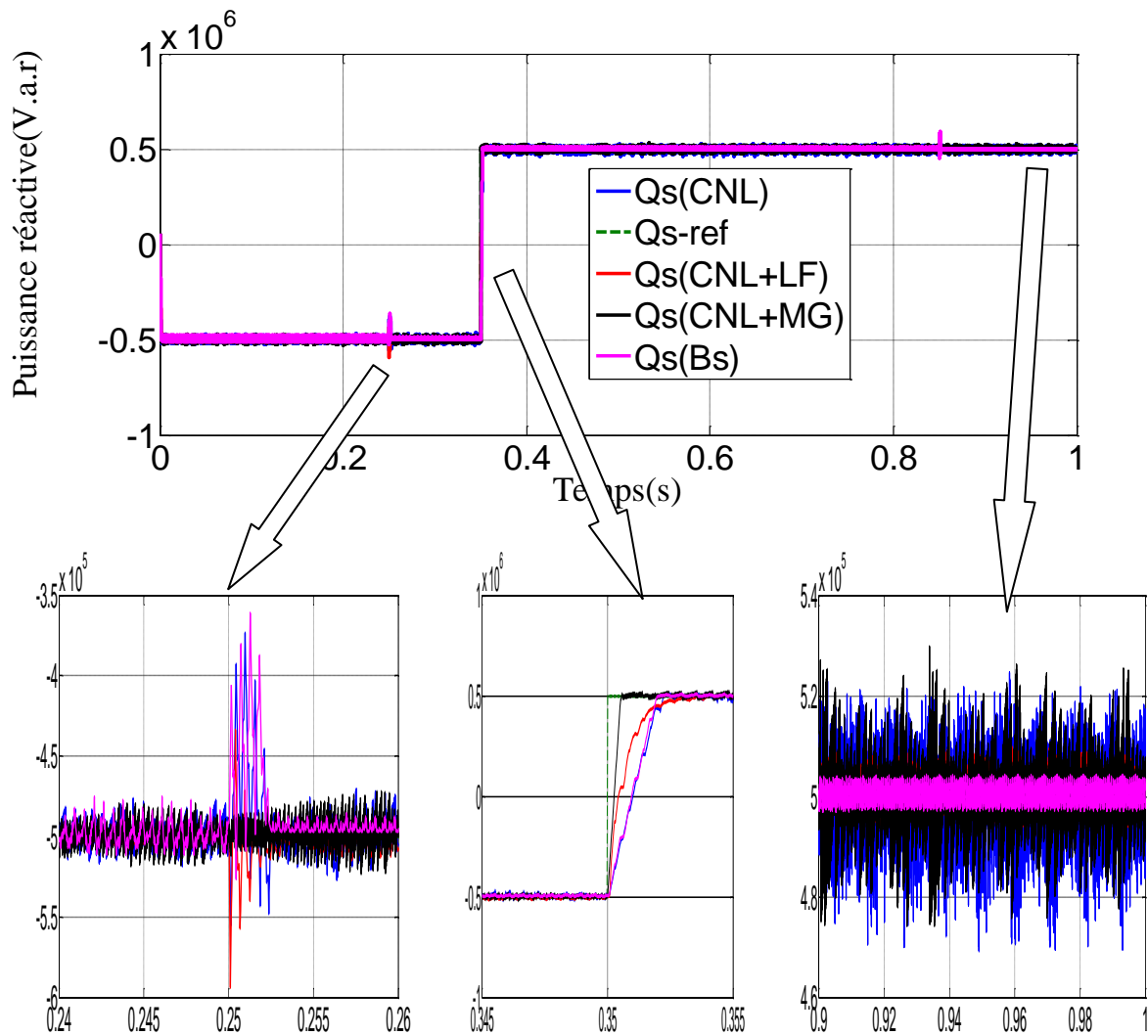


Figure.6.8-Puissance réactive statorique pour les 4 commandes avec un zoom

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de la puissance active et réactive avec vitesse constant. Les figures (6.7) et (6.8) montrent que les puissances active et réactive suit leurs références dans les 4 types de commande par contre le monde glissant présente un temps de réponse plus faible que les trois autres commande et le backstepping est performant en terme de l'erreur statique, reduction de l'effet de « chattering ».

6.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressé à la commande par backstepping, où nous avons présenté des généralités sur le principe de technique; à savoir : la méthode d'analyse de Lyapunov qui est l'élément essentiel de la technique du backstepping, après nous avons calculé une loi de commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie combiné aux régulateurs par backstepping pour améliorer les performances des commandes utilisées précédemment.

De façon générale, les résultats de simulation obtenus lors de l'application de cette commande sur le système qu'il soit entraîné à vitesse fixe ou variable montrent une bonne poursuite des puissances générées aux valeurs de références correspondantes. Aussi, nous avons constaté que l'erreur de poursuite est faible et le découplage entre les puissances active et réactive est toujours maintenu ainsi que l'effet de « chattering » vu dans le chapitre précédent est diminué qui est l'objectif de cette commande avec une grande robustesse vis-à-vis des variations paramétrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie est un des facteurs déterminants pour le développement et la survie des populations: elle est nécessaire à toute activité humaine et indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens (eau, nourriture, santé, etc.) mais également pour assurer un minimum de développement économique et social.

Les énergies fossiles sont limitées. Ces sources d'énergies seront bientôt épuisées. La solution viendra sans doute des énergies naturelles renouvelables considérées comme inépuisables : L'eau, le vent, le soleil, la géothermie, les plantes, mais en plus elles ne produisent ni déchets toxiques, ni gaz à effet de serres, ni déchets nucléaires.

Le travail présenté dans cette thèse avait deux objectifs principaux :

Le premier est basé sur la modélisation et la commande en puissance d'un système éolien, à base de la machine asynchrone à double alimentation pilotée par son convertisseur coté rotor CCM, en utilisant la technique MPPT afin de maximiser la puissance extraite du vent.

Le second objectif concernait l'amélioration de la qualité de l'énergie fournie au réseau électrique par la GADA. Dans cette vue, différentes techniques sont proposées et comparées en terme de taux de distorsion harmonique des courants générés par la MADA vers le réseau.

Pour atteindre ces objectifs, le premier chapitre de ce travail a été consacré à un état de l'art relatif à l'énergie éolienne. 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 machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en terme de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques. Ceci nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation vu ces qualités de fonctionnement et son coût réduit de conception.

Le second chapitre a pour objectif d'effectuer une modélisation globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Les modèles analytiques des différents constituants du système éolien à base de la MADA ont été établis. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de la turbine. Afin de commander le système éolien, deux stratégies utilisant le contrôle découplé de la MADA ont été détaillées. La stratégie MPPT permet de fournir un maximum de puissance active produite au réseau électrique grâce au fonctionnement à vitesse variable de la MADA. Puis, dans notre travail on a réalisé le bloc MPPT par trois

Conclusion générale

régulateurs (PI, mode de glissement et Backstepping) dont l'objectif d'analyser leurs performances.

Dans le chapitre trois, nous nous sommes intéressés dans une première étape, à linéariser et découpler le système via une commande linéarisante basée sur un choix adéquat des sorties. Puis dans une deuxième étape de commander et linéariser les sorties du système .

En suite, afin de mieux commander la puissance active et réactive statorique de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation, nous avons appliqué dans le chapitre quatre la commande non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie par des régulateurs à base de la logique floue à la GADA pour maîtriser la difficulté de son réglage. Ce qui a permis au système éolien d'obtenir une bonne performance en termes de poursuite du point de fonctionnement optimal à maximum de puissance.

Dans le cinquième chapitre, l'approche de la commande non linéaire par linéarisation entrée/Sortie à base des régulateurs par mode glissant a été présentée et appliquée avec succès dans la conception d'un régulateur de l'aérogénérateur asynchrone à double alimentation. Cette dernière nous a donné de bons résultats (temps de réponse, dépassement) de la puissance statorique.

Pour améliorer ces résultats, nous avons développé dans le chapitre six une autre technique de commande qui est le control par backstepping, d'abord nous avons donné quelques définitions de cette technique, puis nous avons calculé à partir de deux étapes un algorithme de commande backstepping qu'on a appliqué sur le système. L'objectif de cette nouvelle technique de commande est identique à celui des trois commandes précédentes; c'est à dire de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la machine asynchrone, découplée par la commande non linéaire. Les performances de ces commandes ont été validées par la simulation.

Les perspectives que nous envisageons en continuité à ce travail de recherche sont :

- Utiliser d'autres techniques de l'intelligence artificielle (IA) pour l'amélioration des performances de la stratégie du contrôle non linéaire, tels que : mode glissant-floue, le neuro-floue.
- Validation des résultats par des études expérimentales.

ANNEXE A

➤ PARAMETRES DE L'ÉOLIENNE

| Nom et symbole des paramètres | Valeur numérique des paramètres |
|--|---------------------------------|
| Rayon de l'éolienne R | 35.25m |
| Nombre des pales | 3 |
| Gain du multiplicateur de vitesse G | 90 |
| Inertie de l'arbre J | 1000kg.m ² |
| Coefficient de frottement visqueux de la MADA f_r | 0.0024N.ms ⁻¹ |
| Vitesse nominale du vent | 12.15 m/s |

➤ PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION :

| Nom et symbole des paramètres | Valeur numérique des paramètres |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Puissance nominale P | 1.5MW |
| Tension nominal statorique V_s | 398/690V |
| courent nominale I_n | 1900 A |
| Tension U_{DC} | 1200V |
| Fréquence nominale statorique f | 50HZ |
| Inductance statorique L_s | 0.0137H |
| Résistance rotorique L_r | 0.0136H |
| Inductance mutuelle L_m | 0.0135H |
| Résistance statorique R_s | 0.012Ω |
| Résistance rotorique R_r | 0.012Ω |
| Nombre des paires de pole p | 2 |
| Glissement g | -0.1333333333 |
| L'indice de modulation m | 35 |
| Taux de modulation r | 0.9 |

AnnexeB

➤ Synthèse Des Régulateurs Pour Le Contrôle MPPT :

➤ Commande par PI classique :

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse de rotation par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé.

Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique.

Nous pouvons écrire la fonction de transfert en boucle fermée sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_{\text{méc}} = F(s) \cdot \dot{\Omega}_{\text{méc}} + G(s) \cdot C_{\text{méc}} \quad (\text{B.1})$$

Où $F(s)$ est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{J_T \cdot s^2 + (f_r + K_p) s + K_i} \quad (\text{B.2})$$

Et $G(s)$ est la fonction de la perturbation :

$$G(s) = \frac{s}{J_T \cdot s^2 + (f_r + K_p) s + K_i} \quad (\text{B.3})$$

Pour baisser l'effet de la perturbation ($C_{\text{méc}}$), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le gain K_p . L'autre gain est choisi de manière à avoir une fonction de transfert du 2ème ordre, ayant une pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement, déterminés comme suit :

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \\ \xi = \frac{f_r + K_p}{J_T \cdot 2\omega_n} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, nous trouvons :

$$\begin{cases} K_i = \omega_n^2 \cdot J_T \\ K_p = 2\xi\omega_n J_T - f_r \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

➤ Commande par mode glissant

Pour concevoir une commande par mode glissant de la vitesse, nous considérons le système d'équations (B.6) :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_m - C_{em} - \omega f_r) \quad (B.6)$$

Le degré relatif de la surface est égal à un pour pouvoir apparaître la commande C_{em} dans sa dérivée de la vitesse ($r=1$).

La surface de glissement est définie par :

$$S(\Omega) = \Omega^* - \Omega \quad (B.7)$$

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante

$$V(S(\Omega)) = \frac{1}{2}S(\Omega)^2 \quad (B.8)$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}(S(\Omega)) = S(\Omega) \cdot \dot{S}(\Omega) \quad (B.9)$$

Avec

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \quad (B.10)$$

En remplaçant (B.6) dans la dernière équation (B.10) on obtient :

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}(C_{em} + \omega f_r - C_m) \quad (B.11)$$

En remplaçant l'expression de C_{em} par les commandes équivalente et discrète ($C_{emeq} + C_{emn}$) dans l'équation précédente, on trouve :

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}((C_{emeq} + C_{emn}) + \omega f_r - C_m) \quad (B.12)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent on a : $S(\Omega) = 0$, $\dot{S}(\Omega) = 0$ et $C_{emn} = 0$, d'où nous tirons l'expression de la commande équivalente C_{emeq} :

$$C_{emeq} = -J\dot{\Omega}^* - \omega f_r + C_m \quad (B.13)$$

En remplaçant l'expression (B.13) dans (B.12) on obtient :

$$\dot{S}(\Omega) = \frac{1}{J}(C_{emn}) \quad (B.14)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, nous devons poser :

$$C_{emn} = -K \text{sign}(S(\Omega)) \quad (B.15)$$

Avec K constante positive

➤ Commande par Backstepping

Pour concevoir une commande par Backstepping de la vitesse, nous considérons le système d'équations (B.16) :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_m - C_{em} - \omega f_r) \quad (B.16)$$

Définir l'erreur de suivi de consigne :

$$S(\Omega) = \Omega^* - \Omega \quad (B.17)$$

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V(e) = \frac{1}{2}e(\Omega)^2 \quad (B.18)$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}(e(\Omega)) = e(\Omega) \cdot \dot{e}(\Omega) \quad (\text{B.19})$$

Avec

$$\dot{e}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \quad (\text{B.20})$$

En remplaçant (B.16) dans la dernière équation on obtient :

$$\dot{e}(\Omega) = \dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}(C_{em} + \omega f_r - C_m) \quad (\text{B.21})$$

En remplaçant (B.21) dans l'équation (B.19) on obtient :

$$\dot{V}(e) = e(\Omega) \cdot \left(\dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}(C_{em} + \omega f_r - C_m) \right) \quad (\text{B.22})$$

La commande stabilisante du backstepping est définie comme suit :

$$C_{em} = -J\dot{\Omega}^* - \omega f_r + C_m - K_1 e(\Omega) \quad (\text{B.23})$$

Avec K_1 constante positive

Pour assurer la convergence de la fonction candidate de Lyapunov, en remplaçant l'expression (B.23) dans (B.22) on obtient :

$$\dot{V}(e) = e(\Omega) \cdot \dot{e}(\Omega) = -K_1 e(\Omega)^2 < 0 \quad (\text{B.24})$$

L'équation (B.24) est négative.

Bibliographie

- [1] **S.Belakehal**, «Conception & Commande Des Machines A Aimants Permanents Dédiées Aux Energies Renouvelables», Thèse De Doctorat, Université De Constantine, Algérie, 2010.
- [2] **Y.Djeriri**, « Commande Directe Du Couple Et Des Puissances D'une Mada Associée A Un Système Eolien Par Les Techniques De L'intelligence Artificielle », Thèse De Doctorat, Université De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2015.
- [3] **Z. Boudjema, A. Meroufel, Y. Djerriri, E. Bounadja**, « Fuzzy Sliding Mode Control Of A Doubly Fed Induction Generator For Wind Energy Conversion ».Carpathian Journal Of Electronic And Computer Engineering 6/2,7-14,(2013).
- [4] **S.Massoum**, « Contrôle Avec Les Techniques De L'intelligence Artificielle D'une Source D'énergie Eolienne A Base D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation ».Thèse De Doctorat, Université De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2018.
- [5] **O.Paish**, « Small Hydro Power Technology And Current Status »,Renewable And Sustainable Energy Reviews6(6):537(556) ,(2002).
- [6] **I.Salhi, S.Doubabi, N.Essounbouli And A.Hamzaoui**, « Application Of Multi-Model Control With Fuzzy Switching To A Micro Hydro-Electrical Power Plant ». Renewable Energy, 35(9) :2071(2079) ,(2010).
- [7] **A.Dida**, « Contribution A La Commande Neuro-Floue De La Machine Asynchrone A Double Alimentation Utilisé Dans Un Système Eolien », Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider De Biskra, Algérie, 2017.
- [8] **A.Telli**, « Etude Et Commande D'une Eolienne A Vitesse Variable Intégrée Au Réseau Mt », Mémoire De Magister Université Mohamed Boudiaf D'Oran, Algérie, 2012.
- [9] **F.Akel**,« Etude Et Réalisation D'un Emulateur De Turbine Eolienne », Mémoire De Magister, Ecole Militaire Polytechnique D'Alger, Algérie ,2009.
- [10] **N. Hamdi**, « Amélioration Des Performances Des Aérogénérateurs ». Thèse Doctorat, Université Mentouri De Constantine, Algérie, 2013.
- [11] **T. Ghennam**, « Supervision D'une Ferme Eolienne Pour Son Intégration Dans La Gestion D'un Réseau Electrique, Apports Des Convertisseurs Multi Niveaux Au Réglage Des Eoliennes A Base De Machine Asynchrone A Double Alimentation », Thèse De Doctorat De L'école Militaire Polytechnique D'Alger, 2011.
- [12] **F.Poitiers**, « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne »; Thèse De Doctorat En Génie Electrique, Ecole Polytechnique De Nantes, France, Décembre 2003.
- [13] **A. Mirecki**, « Etude Comparative De Chaînes De Conversion D'énergie Dédiées A Une Eolienne De Petite Puissance », Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, France, Avril 2005.
- [14] **T. Azzouz**, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne », Thèse De Doctorat Université Mohamed Khider De Biskra, Algérie, 2015.
- [15] **M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, J. Rodriguez**,« Overview Of Multi-Mw Wind Turbines And Wind Parks » ,IEEE Transaction On Industrial Electronics, Vol. 58, No. 4, Pp. 1081–1095, April 2011.

Bibliographie

- [16] **S.M.Boudia**, « Optimisation De L'évaluation Temporelle Du Gisement Énergétique Éolien Par Simulation Numérique Et Contribution A La Réactualisation De L'atlas Des Vents En Algérie », Université Abou-Bakr Belkaïd De Tlemcen ,2013.
- [17] **A.Touahri**, « Application De La DTC A Un Aérogénérateur Asynchrone Double Alimenté », Mémoire De Magister, Université Batna2, 2016.
- [18] **F.Z.Tria**, « Contribution A La Commande D'un Système Eolien Basé Sur Une MADA Par Différentes Techniques », Mémoire De Magister, Université D'el Oued, Algérie,2013.
- [19] **F.Z.Belaimeche,A,Bentaallah,S.Massoum,W.Patrice**, « A comparative Study Between The Simplified Input/Output Linearizing Control With Fuzzy PI and Classic PI For DFIG In Wind Turbines ».ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK Journal of Electrical Engineering and Computer Science Volume85,No. 4 (2018).
- [20] **Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum, And Z. Boudjema**, « A Comparative Study Between Field Oriented Control Strategy And Direct Power Control Strategy For Dfig » Icepts-Laboratory.Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes. Journal Of Electrical Engineering'.Vol 14 .Edition :2 Pp 159-168/2014.
- [21] **P. Berlu**,« Calcul Des Efforts Subis Par Les Eoliennes De Moyenne Et Forte Puissance », Thèse De Doctorat, Université De Lille I, France, 1999.
- [22] **R.Rouhabhi**,« Contrôle Des Puissances Générées Par Un Système Eolien A Vitesse Variable Basé Sur Une Machine Asynchrone Double Alimentée », Thèse Doctorat, Université De Batna2, Algérie, 2016.
- [23] **S.Ghoudelbourk**, « Etude Et Modélisation Des Convertisseurs Statiques Dans Une Chaîne Eolienne A Base De La Gada »,Thèse Doctorat, Université D'annaba, Algérie, 2016.
- [24] **F. Kendouli**, « Centrale Eolienne Et Qualité De Energies Electrique ». Thèse Doctorat, Université De Constantine, 2012.
- [25] **A.Lokmane Nemmour, R.Abdessemed**, « The Input-Output Linearizing Control Scheme Of The Doubly-Fed Induction Machine As A Wind Power Generation », Journal Of Electrical Engineering, 2008.
- [26] **S. El Aimani**, « Modélisation De Différentes Technologies D'eoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension », Thèse De Doctorat Université De Lille, France, 2004.
- [27] **B. François, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne**, « Technologies D'éolienne De Forte Puissance Connectée Au Réseau De Moyenne Tension », Revue Ree, No. 5, Pp 65-74, 2005.
- [28] **H. Amimeur**, « Contribution Au Contrôle De La Machine Asynchrone Double Etoile ». Thèse Doctorat Université De Batna, Algérie, 2012.
- [29] **Y. Djeriri**, « Commande Par Réseaux De Neurones D'une MADA Intégrée A Un Système Eolien », Mémoire De Magister Université De Sidi Bel Abbés ,2009.
- [30] **L.Abdelhamid**, « Contribution A L'étude Des Performances Des Générateurs Electromagnétiques Utilisés Dans Les Systèmes Eoliens », Mémoire De Magister Université De Batna, 2008.
- [31] **H.Camblong**, « Minimisation De L'impact Des Perturbations D'origine Eolienne Dans La Génération D'électricité Par Des Aérogénérateurs A Vitesse Variable ». Thèse De Doctorat En, Ecole National Supérieure De Bordeaux, France, 2003.
- [32] **C. Bourillon**, « Wind Energy - Clean Power For Generations. Renewable Energy », Vol. 16,Pp. 948-953, 1999.

Bibliographie

- [33] **F.Avia, I. Cruz**, «The Development Of The Wind Energy Market In Spain».In European Wind Conference Proceedings, Nice, Pp. 477-480 ; 1999.
- [34] **M.M, Ismail, H.A.Abdel Fattah And A. Bahgat**,«Adaptive Input- Output Of Induction Motors With Magnetic Saturation», Proceedings Of The 29th IEEE Conference Of Industrials Electronics Society, Iecono3, Vol. 1, Pp. 168-173, 2003.
- [35] **R.Mariono,S.Peresada And P.Valigi**,«Adaptive Partial Feedback Linearization Of Induction Motors», IEEE Transaction On Decision And Control, Pp.3313-3318, 1990
- [36] **J.Chiasson**,«Dynamic Feedback Linearization Of The Induction Motor»,IEEE Transactions On Automatic Control, Vol.38, No.10, Pp 1588-1594, 1993.
- [37] **H.Nijmeijer Et A.J. Van Der Schaft**, «Nonlinear Dynamical Control Systems», Springer- Verlag, Berlin, 1990.
- [38] **M.Tarbouchi**,«Commande Par Linéarisation Exacte D'une Machine Asynchrone En Régime Défluxé», Thèse De Doctorat Université De Laval Quebec,1997.
- [39] **T.K.Boukas And T.G Habetler**, «High- Performance Induction Motor Speed Control Using Exact Feedback Linearization With State And State Derivative Feedback», IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. 19, No.4, Pp.1022-1028, 2004
- [40] **J-J. Slotine Et W. Li**, «Applied Nonlinear Dynamical Control», Prentice Hall, New Jersey, 1991.
- [41] **M.Bodson, J. Chiasson And R. Novotnak**.«High Performance Induction Motor Via Input-Output Linearization», IEEE Control Systems, Pp. 25-33,
- [42] **A.Merabet** «Commande Non Linéaire A Modèle Prédicatif Pour Une Machine Asynchrone», Thèse De Doctorat Université De Québec A Chicoutimi, 2007.
- [43] **A.Bentaallah**,«Commande Par Linéarisation Entrée/Sortie Adaptative D'une Machine Asynchrone Sans Capteur Mécanique »,Thèse De Doctorat Université De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2009.
- [44] **C.A. Adams, W. K. Cabot, G. Ae,Jr Irving**,«Fractional Pitch Windings For Induction Motors»,Compte Rendu De Conférence Du 24me Congrès Annuel De L'A.I.E.E, Niagara Falls, N.Y,Pp. 1485- 1503,28 Juin 1970.
- [45] **A.Gaillard**,«Système Eolien Basé Sur Une Mada : Contribution A L'étude De La Qualité De L'énergie Electrique Et De La Continuité De Service », Thèse De Doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [46] **A.Doumi, G. Aissaoui, A. Tahour, M. Abid And K. Tahir**, «Nonlinear Backstepping Control Of A Double-Fed Induction Generator »,Przegład Elektrotechniczny, Issn 0033-2097, R. 92 Nr 3/2016
- [47] **B.Hamane, M. L. Doumbia, M. Bouhamida, M. Benghanem**, «Control Of Wind Turbine Based On Dfig Using Fuzzy-Pi And Sliding Mode Controllers», Ninth International Conference On Ecological Vehicles And Renewable Energies (Ever) ,2014.
- [48] **Y.Bekakra**, «Etude Et Commande Du Moteur Asynchrone A Double Alimentation (MADA) Par Différentes Techniques Avancées »Mémoire De Magister, Centre Universitaire D'el-Oued, 2010.
- [49] **Y.Bekkara**, «Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation», Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider De Biskra, Algérie, 2014.
- [50] **Luhua Zhang, Xu Cai, Jiahu Guo**,«Simplified Input-Output Linearizing And Decoupling Control Of Wind Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generators ”, IEEE, China, Pp. 632-63, Ipemc2009.

Bibliographie

- [51] **A. Bouguerra**, « Commande Tolérante Aux Défauts D'un Appareil A Vol Vertical ». Thèse Doctorat, Université De M'sila 2015.
- [52] **T.Chikouche**, «Commande robuste d'un machine asynchrone à double alimentation sans capteur mécanique» Thèse De Doctorat, Université De Sidi Bel Abbes, Algérie, 2013.
- [53] **N.Talbi**,«Conception Des Systèmes D'inférence Floue Par Des Approches Hybrides : Application Pour La Commande Et La Modélisation Des Systèmes Non linéaires».Thèse De Doctorat, Université De Constantine 2014.
- [54] **A.Chaiba**,«Commande De La Machine Asynchrone A Double Alimentation Par Des Techniques De L'intelligence Artificielle »; Thèse De Doctorat En Electrotechnique, Université De Batna, Algérie, Juillet 2010.
- [55] **L Baghli**, «Contribution A La Commande De La Machine Asynchrone, Utilisation De La Logique Floue, Des Réseaux De Neurones Et Des Algorithmes Génétiques», Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, Nancy, 1999.
- [56] **H.ABDERREZEK**, «Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires» ; Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de SETIF-1, Algérie, 2014.
- [57] **H. Buhler**, «Réglage Par Mode De Glissement». Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes, Première Edition, Lausanne, Suisse, 1986.
- [58] **H. Amimeur**, «Contribution A La Commande D'une Machine Asynchrone Double Etoile Par Mode De Glissement».Mémoire De Magister De L'université De Batna, 2008.
- [59] **M.Loucif**, «Synthèse De Lois De Commande Non-Linéaires Pour Le Contrôle D'une Machine Asynchrone A Double Alimentation Dédiée A Un Système Aérogénérateur», Thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2016.
- [60] **A.L.Nemmour**,«Contribution A La Commande Vectorielle De La Machine Asynchrone A Double Alimentation», Mémoire De Magister De L'université De Batna, 2002.
- [61] **J.Matas,M.Castilla,J.M.Guerrero,L.G.DeVicuña,AndJ.Miret**,«Feedback Linearization Of Direct-Drive Synchronous Wind-Turbines Via A Sliding Mode Approach»,IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 23, No. 3, May 2008
- [62] **M.Abid, A.G.Aissaoui, Y.Ramdani, H.Bounoua**,«Sliding Mode Control Of A Doubly Fed Induction Generator For Wind Turbines », Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. Et Énerg, Vol. 56, N°1, P. 15–24, 2011.
- [63] **A.Moualdia**,«Strategies De Commande DTC-SVM Et DPC Appliquées A Une MADA Utilisée Pour La Production D'énergie Eolienne», Thèse De Doctorat De L'école Nationale Polytechnique D'Alger, Algérie, 2014.
- [64] <https://www.museum.toulouse.fr/-/quelles-energies-pour-l-humanite-aujourd-hui-et-demain->
- [65] <http://www.enr.fr/energies-renouvelables-dans-le-monde>
- [66] <http://www.explorateurs-energie.com/index.php/les-energies/fossiles>
- [67] http://www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/sources_d_energie_renouvelable.pdf
- [68] https://www.lemonde.fr/energies/article/2017/06/07/les-energies-renouvelables-en-hausse-dans-le-monde-malgre-des-investissements-en-baisse_5139722_1653054.html

Bibliographie

- [69] www.canren.gc.ca National Resources Canada. (Jul. 2000). The history of wind energy. [Online], Available:
- [70] <https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-en-europe-et-dans-le-monde-en-2017-180214>
- [71] <https://www.challenge.ma/energie-eolienne-en-afrique-le-maroc-toujours-derriere-lafrique-du-sud-92103/>
- [72] www.liberte-algerie.com Le Dr Manar El-Moneef, PDG de GE renouvelable Afrique du Nord et Turquie
- [73] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-eolienne-13745/>

ملخص

تقدم هذه الأطروحة النمذجة والتحكم والمحاكاة لنظام تحويل طاقة الرياح الذي يعتمد على مولدة غير متزامنة مزدوجة التغذية (GADA) حيث عنصرها الساكن متصل مباشرة بالشبكة بواسطة الجزء الثابت ومدفوع بدواره بواسطة موجين ساكنين. بعد تشكيل سلسلة كاملة لتحويل طاقة الرياح و استخدام عملية التحكم MPPT للحصول على القيمة العظمى للاستطاعة و نمذجة المولدة المتزامنة مزدوجة التغذية قمنا بإدخال تقنية التحكم القوية التي تتكون من تصميم وحدة تحكم غير خطية تعتمد على المداخل والمخارج بهدف فصل القوى النشيطة والتفاعلية وجعل النظام غير حساس للتغيرات في الاضطرابات . وفقا لنتائج المحاكاة المتحصل عليها فان هذه التقنية تقدم أداءً جيداً للنظام الثابت والمتغير مع ذلك فان استخدام تقنية التحكم MLI على مستوى المموج يطرح وجود التدببات على مستوى المخارج المقاسة في المولدة من أجل تحسين أداء هذه التقنية وللتخفيف من قيمة هذه التدببات، قمنا بإدخال ثلاث تقنيات اخرى للتحكم تعتمد على مصحح الغامض، النظام الانزلاقي و الرجعي . الفكرة تعتمد على تبديل les polynômes d'hurwitz بالمصححات المذكورة اعلاه، النتائج المتحصل عليها اظهرت فعالية الاستراتيجيات المقترحة .

كلمات مفتاحية : طاقة الرياح-عنفه -MADA-نمدجة-MPPT- النظام الخطي مداخل/مخارج-MLI -النظام الانزلاقي-

المنطق الغامض – الرجعي

Résumé

Cette thèse propose la modélisation, le contrôle et la simulation du système de conversion de l'énergie éolienne basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) qui est directement connecté au réseau par son stator et pilotée par son rotor par deux convertisseurs. Après avoir formé une série complète de conversion de l'énergie éolienne et utilisé la commande MPPT et dont le but de garantir le découplage des puissances active et réactive et assurer une meilleure qualité d'énergie et rendre le système insensible aux variations paramétriques . Nous avons introduit une technique de contrôle puissante consistant en une conception de contrôleur basée sur un control non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie, conçue pour séparer les puissances active réactive et rendre le système insensible aux changements de perturbations. Selon les résultats de simulation obtenus, cette technologie donne de bonnes performances pour le système fixe et variable. Toutefois, l'utilisation de la technique de contrôle MLI au niveau de l'onduleur impose la présence des fluctuations au niveau des sorties mesurées dans la génératrice .Pour nous permettre d'améliorer les performances de la technique non linéaire par linéarisation Entrée/Sortie et réduire la valeur des fluctuations , nous avons introduit trois autres techniques Le contrôle dépend du logique floue, du mode glissant et le backstepping. L'idée est basée sur la modification des polynômes d'hurwitz par les régulateurs mentionnés ci-dessus, les résultats obtenus montrent l'efficacité des stratégies proposées.

Mots clés:

Energie éolienne - Turbine - MADA - Modélisation – MPPT- Linéarisation E/S-MLI - Mode Glissant - Logique floue - Backstepping.

Abstract :

This thesis proposes the modeling, the control and the simulation of the system of conversion of the wind energy based on a doubly fed induction generator (GADA) connected directly to the network by its stator and driven by its rotor by two static converters. After forming a complete series of wind energy conversion and using the MPPT command to get the value We introduced a powerful control technology consisting of a nonlinear line based controller design, designed to separate the active forces and interactive and make the system insensitive to changes in disturbances. According to the simulation results obtained, this technology gives good performance for the fixed and variable system. However, the use of PWM control technique at the corrugated level imposes the presence of hierarchies at the outputs measured in the generator. to enable us to improve the performance of this technology and reduce the value of these innovations, we have introduced three other techniques Control depends on the Fuzzy logic, sliding system and Backstepping. The idea is based on the modification of hurwitz polynomials by the terms mentioned above, the results obtained show the effectiveness of the proposed strategies .

Key words:

Wind energy - Turbine - DFIG- Modeling – MPPT- Linéarisation I/O - PWM - Sliding Mode - Fuzzy logic - Backstepping.