***Sommaire***

Introduction générale ................................................................................................................1

Chapitre 1 : ETAT DE L’ART…………………............................ ........................................ 4

I. Introduction ...........................................................................................................................4

II. Les énergies renouvelables ..................................................................................................4

III. L’énergie éolienne...............................................................................................................5

III.1. Définition de l’énergie éolienne........................................................................................5

III.2. Développement de l’énergie éolienne .............................................................................6

III.3. Etat d’art des éoliennes .....................................................................................................8

III.4. Fonctionnement d’une éolienne ......................................................................................11

III.5. Taille des aérogénérateurs ...............................................................................................12

III.6. Différents types d’éoliennes ..........................................................................................13

III.6.1 Selon la conception mécanique ......................................................................................13

III.6.1.1 Eolienne à axe horizontal ..........................................................................................13

III.6.1.2 Eolienne à axe vertical ..............................................................................................15

III.6.2 Selon la technologie ......................................................................................................16

III.6.2.1 Les éoliennes à vitesse fixe..........................................................................................16

III.6.2.1.a Eolienne à décrochage aérodynamique....................................................................16

III.6.2.1.b Eolienne à pales orientables.....................................................................................17

III.6.2.2 Les éoliennes à vitesse variable ...................................................................................18

III.6.2.2.a Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage.....................18

III.6.2.2.b Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone .................................19

III.6.2.2.c Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à double

alimentation……………………………………………………………………………………19

III.7 Synthèse des différents types d’éoliennes ………………………………………..…….21

IV Conclusion.............................................................................................................................22

Chapitre 2:ETUDE DE LA PARTIE MECANIQUE DE L’EOLIENNE.................................24

I. Introduction ...........................................................................................................................24

II. Modélisation du système mécanique....................................................................................24

II.1 Hypothèses simplificatrices ...............................................................................................24

II.2 Modélisation de la turbine .................................................................................................26

II.3 Modèle du multiplicateur.................................................................................................28

II.4 Equation dynamique de l'arbre ..........................................................................................29

III Stratégies de commande de la turbine éolienne...................................................................30

III.1 Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance. ………………..…..30

III.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance ………………………..……..…32

III.2.1 Bilan des puissances.......................................................................................................32

III.2.2.Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse..................................34

III.2.2.a Principe général .........................................................................................................34

III.2.2.b Conception du correcteur de vitesse ..........................................................................35

III.2.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse..................................36

III.3 Algorithme de suivi de la puissance maximale ...............................................................38

IV. Simulations.........................................................................................................................42

IV.1 Conditions de la simulation..............................................................................................42

IV.2 Résultats obtenus …………………………………………………………………….....42

IV.3 Interprétations……………………………………………………………………..........46

V. Conclusion..........................................................................................................................48

Chapitre 3:.ETUDE DE LA PARTIE ELECTRIQUE DE L’EOLIENNE……………….....50

I. Introduction.........................................................................................................................50

II. Description de la MADA...................................................................................................50

III. Modélisation de la MADA ..............................................................................................52

III.1 Equations électriques...................................................................................................53

III.2 Equations magnétiques................................................................................................55

III.3 Equation mécanique........................................................................................................56

III.4 Choix du référentiel........................................................................................................57

III.4.1 Référentiel lié au stator................................................................................................57

III.4.2 Référentiel lié au rotor.................................................................................................57

III.4.3 Référentiel lié au champ tournant...................................................................................58

III.5 Simulations....................................................................................................................... 58

III.5.1 Conditions de la simulation........................................................................................... 58

III.5.2 Résultats obtenus.............................................................................................................58

III.5.3 Interprétations..................................................................................................................61

III.6 Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation .................…..61

III.7 Commande directe............................................................................................................ 65

III.7.1 Commande directe sans boucle de courant …………………………………….………65

III.7.2 Commande directe avec boucle de courant …………………….……………….…..….66

III.7.3 Commande indirecte ...................................................................................................... 67

III.7.4 Type du régulateur ……………………………….……………………………………67

III.8 Le convertisseur ……………………………………………………………………...…..67

III.9 Contrôle du convertisseur.................................................................................................. 70

III.10 Simulations..................................................................................................................... 71

III.10.1 Conditions de la simulation …………………………………………………….……71

III.10.2 Résultats obtenus …………………………………………….……………………….71

III.10.2.1 Commande directe sans boucle de courant …………............................................. .71

III.10.2.2 Interprétations…………………………….………………..................................... .73

III.10.2.3 Commande directe avec boucle de courant …………………………………...74

III.10.2.4 Interprétations…………………………….………………..................................... .76

III.10.2.5 Commande indirecte ……..........................................................................................76

III.10.2.6 Interprétations…………………………….………………..................................... .78

IV Conclusion ………………………………………………………………………...............78

Chapitre 4: ASSERVISSEMENT D’UNE CHAINE COMPLETE DE CONVERSION EOLIENNE ………….................................................................................................................................. 81

I.Introduction .......................................................................................................................... .81

II.Les avantages de la structure ............................................................................................... 81

III.Modèle complet du système de conversion éolien ............................................................ .82

III.1 Le convertisseur coté réseau …………........................................................................... .84

III.2 Le bus continu …………………………………………………………………………...84

III.3 Le filtre ………………………………………………………………………………......85

III.4 Le nœud de connexion ......................................................................................................87

IV. Contrôle de la liaison au réseau ………………………………………………...………..87

V. IV.1. Réglage de la tension du bus continue ……………...................................................87

IV.2 Contrôle des courants de filtre …………………………………………………………..88

V. Simulations ..........................................................................................................................90

V.1 Conditions de la simulation ……………………………………………………………...91

V.2 Résultats obtenus ………………...………………………………………………………91

V.3 Interprétations ………………………………………………………………………….95

V.4 Essai de robustesse……………………………………………………………….96

V.4.1 Résultats obtenus……………………………………………………………….97

V.4.2 Interprétations…………………………………………………………………..98

VI Conclusion ………………………………...........................................................................98

CHAPITRE 5 : INTEGRATION DU SYSTEME DE STOCKAGE INERTIEL...................101

I. Introduction .......................................................................................................................101

II. Importance du stockage d’énergie ...................................................................................101

II.1 Stockage à court terme.....................................................................................................102

II.2 Stockage à long terme …………………………………………………………………102

III. Le système de stockage inertiel .......................................................................................102

III.1 Principe de fonctionnement …………………………………………………………...103

III.2 Modélisation ..................................................................................................................104

III.2.1 Le volant d’inertie ......................................................................................................104

III.2.2 La machine asynchrone ..............................................................................................107

III.2.2.1 Equations électriques dans le repère (d,q) ……………………………..…………107

III.2.2.2 Equation mécanique de la MAS ………………………………………………….108

III.2.2.3 Contrôle vectoriel de la machine asynchrone ………………………………….…109

III.2.3 Le convertisseur …………………………………………………………………….112

III.3 Simulations ……………………………………………………………………… ...114

III.3.1 Conditions de la simulation ...................................................................................... 114

III.3.2 Résultats obtenus ...................................................................................................... 114

III.3.3 Interprétations……………………………………………………………………… 115

IV. Intégration du système de stockage dans la chaine de conversion éolienne.................. 118

IV.1 Structure du système étudié .................................................................................... 118

IV.2 Modèle du bus continu................................................................................................. 119

IV.3 Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien ……………… .……….120

V. Simulations ..................................................................................................................... 122

V.1 Conditions de la simulation ………………………………………………. ………….122

V.2 Résultats obtenus et interprétation ……………………………………… ……….….122

V.3 Essai à puissance active nulle………………………………………………………….129

V.3.1 Résultats obtenus …………………........................………………………………….129

V.3.2 Interprétations………………………………………………………………………..133

V.4 Essai d’autres cas possibles…………………………………………………………….134

V.4.1 Résultats obtenus……………………………………………………………..134

V.4.2 Interprétations………………………………………………………………..138

VI Conclusion ………………………………………………………………………...... .139

Conclusion générale

Références

Annexes