

Table des matières

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTATION

Introduction Générale.....	1
.....	2
I-GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS.....	3
I .LES SYSTEMES EOLIENS.....	3
I -1/ Introduction.....	3
I -2.Définition de l'énergie éolienne.....	3
I-3.Développement de l'énergie éolienne	4
I.3.1.Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde.....	4
I.3.2.Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algerie.....	4
I -4/ La production éolienne	9
I -5/ Principe de fonctionnement d'une éolienne	9
I -6/ La chaîne de transformation énergétique	9
I -6-1/ La transformation de l'énergie par les pales	9
I -6-2/ L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur	10
I -6-3/ La production d'électricité par le générateur	10
I -6-4/ Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur	10
I -7/ Choix de type d'éoliennes	10
I -8/ avantages et inconvénient de l'énergie éolienne	11
I -9/ Classification des éoliennes	12
I -9-1/ Différents types d'éolienne et leurs utilisations	13
I.9.1.1. Les éoliennes à axe vertical.....	13
I.9.1.1.1. Les types d'éoliennes à axe vertical	13
I.9.1.1.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical	14
I.9.1.2. Eoliennes à axe horizontal.....	15
I.9.1.2.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal	16
I.9.1.2.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe horizontal	17
I.9.2 Principaux composants d'une éolienne	18
I.9.3. La vitesse de rotor	20
I.9.3.1. Fonctionnement à vitesse fixe	20
I.9.3.2.Fonctionnement à vitesse variable.....	20
I.9.4 Les Machines électriques utilisées dans le Système éolien (vitesse variable)	21
I.9.5.Autres Architectures.....	24

I.10. Modèle de la turbine	24
I.10.1.Hypothèses simplificatrices	25
I.10.2.Coefficient de puissance	25
I.10.2.1. Lois de betz.....	25
I.10.2.2. Modèle du multiplicateur	28
I.10.2.3. Modèle de l'arbre	28
I.10.2.4. Modèle de l'actionneur des pales	29
I.11.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	29
I.12.Résultats de simulation fonctionnement de turbine	30
I.13. Interprétations des résultats.....	31
I.14. CONCLUSION.....	31
II. MODELISATION DE LA GADA	32
II.1. Introduction	32
II.2.Structure de la machine.....	32
II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	33
II.4.Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation	33
II.5. Les différentes structures d'alimentation de la MADA.....	34
II.6. Les avantages et les inconvénients.....	36
II.7. Modélisation de la GADA	37
II.7.1. Hypothèses simplificatrices	37
II.7.2. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralise Description	38
II.7.2.1. Equation électrique	38
II.7.2.2. Équations magnétiques	39
II.7.2.3. La transformée de Park.....	39
II.7.3. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)	41
II.7.3.1. Equations électriques	41
II.7.3.2. L'équations magnétiques	42
II.7.3.3. L'équation mécanique	42
II.7.3.4. Les puissances actives et réactives.....	42
II.7.3.5.Equation d'état.....	43
II.8.convertisseur.....	43
II.9 Contrôle du convertisseur.....	45
II.10.Résultats de simulation numérique du système.....	43
II.10.1. Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA).....	43
II.10.1.1. Interprétation des résultats	45
II.10.2. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)	46
II.10.2.1. Interprétations des résultats	50

II.11.Conclusion.....	50
III .LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA.....	52
III.1.Introduction	52
III.2.Le principe de la commande vectorielle de la GADA	52
III.3.Etablissement du modèle de la GADA	53
III.4.Choix du référentiel pour le modèle diphasé	53
III.4.1.Suivant l'orientation du repère.....	53
III.4.1.1.Commande vectorielle directe	57
III.4.1.2.Commande vectorielle indirecte	58
III.5 Résultats de simulation.....	60
III.5.2 Interprétation des résultats	64
III.6.Conclusion.....	64
IV. Intégration du système de stockage inertiel.....	65
IV.1. Introduction.....	65
IV.2. Importance du stockage d'énergie.....	66
IV.3. Les constituants du système de stockage par volant d'inertie.....	66
IV.4. Le principe de fonctionnement du système de stockage par volant d'inertie.....	67
IV.5. Modélisation.....	68
IV.5.1 Le volant d'inertie.....	68
IV.5.2. La machine asynchrone (MAS).....	70
IV.5.2.1. Equations électriques dans le repère (d,q).....	70
IV.5.2.2. Equation mécanique de la MAS.....	72
IV.5.2.3 Contrôle vectoriel de la machine asynchrone.....	72
IV.5.3. Le convertisseur.....	76
IV.6. Intégration du système de stockage dans la chaîne de conversion éolienne.....	78
IV.6.1.Structure du système étudié.....	78
IV.6.2.Modèle du bus continu	79
IV.6.3 Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien.....	80
IV.7. Simulations.....	83
IV.7.2.Résultats obtenus et interprétations.....	83
IV.8. Conclusion.....	88
Conclusion générale.....	89
Références	
Annexes	

Table des figures

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	4
Fig.I.2: Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2010.....	5
Fig.I.3: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol(m/s).....	7
Fig.I.4: Cartes saisonnières de la vitesse du vent (m/s).....	8
Fig.I.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	9
Figure I.6 : Correspondance taille-puissance des éoliennes	11
Figure I.7 : Les éoliennes à axe vertical	13
Figure I.8 :Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus	14
Figure I.9 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius	14
Fig.I.10 : Eoliennes à axe horizontal.....	15
Figure I.11 : Configuration à axe horizontal	17
Fig.I.12 : principaux composants d'une éolienne.....	18
Fig.I.13: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil.....	21
Figure I.14 : Générateur asynchrone à double stator.....	22
Figure I.15 :Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau.....	22
Fig.I.16: Générateur asynchrone connectée au réseau par Deux onduleurs.....	23
Fig.I.17: Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée Par le rotor.....	23
Figure I.18 : Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.	24
Figure I.19 : Schéma de la turbine éolienne	25
Figure I.20 : Lois de bétz	26
Fig.I.21: Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur.....	27
Figure I.22 : Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple	27
Fig.I.23 : Modèle simplifié de la turbine.....	29
Fig.I.24: Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique.....	29
Figure II.1 : principe du rotor bobiné	32
Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation	34
Figure II.3 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	34
Figure II.4 : MADA, structure Kramer	35
Figure II.5 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	36
Figure II.6: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	36
Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA	40
FigII.8 Le convertisseur coté rotor de la MADA à modéliser.....	43
FigII.8. Principe de la MLI.....	44

Figure III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et MADA	53
Fig.III.2: Bloc de contrôle à flux orienté.....	55
Fig.III.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	57
Figure. III.4: schéma bloc de la commande directe.....	58
Fig.III.5 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.....	59
Fig .III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.....	60
Fig.IV. 1. Constituants d'un système de stockage inertielle.....	67
Fig.IV.2. transfert d'énergie dans un SISE.....	68
Fig.IV.3. Allure de la puissance et du couple en fonction de la vitesse de rotation d'une MAS.....	70
Fig.IV.4.Schéma bloc de la commande du système de Stockage inertielle.....	77
Fig. IV.5. Structure du système étudié.....	79
Fig. IV.6. Le bus continu.....	79
Fig.IV.7. La puissance lissée par SISE.....	80
Fig. IV.8. Dispositif de commande du système global étudié.....	82

Liste des tableaux

Tableau.1.1: La génération d'électricité éolienne dans le monde. Source : World Wind Energy Association.....	6
Tableaux 1.2 : Classification des turbines éoliennes.....	11
Tableau 4. 1 Moyens de stockage à court terme.....	66
Tableau 4. 2 Moyens de stockage à long terme.....	66

Glossaire

CCM : Convertisseur Coté MADA
CCR : Convertisseur Coté Réseau
MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA : Générateur Asynchrone à Double Alimentation
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion
MAS : Machine Asynchrone a cage
MPPT : Maximum Power Point Tracking
PI : Proportionnel Intégral

NOTATION

J_t : Le moment d'inertie de la turbine ;

J_g : Le moment d'inertie du générateur ;

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux du générateur ;

C_t : Le couple mécanique sur l'axe de la turbine ;

C_g : Le couple mécanique sur l'Arbre du générateur ;

Ω_{mec} : La vitesse de rotation du générateur ;

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine ;

λ : La vitesse spécifique donné par $\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V}$

V : La vitesse du vent .

ρ : La masse volumique de l'air ($\rho \approx 1.225 \text{ Kg/m}^3$)

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

C_p : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

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

g : Le glissement

ω_{gl} : La vitesse angulaire de glissement.

ω_s : Vitesse Angulaire

ω_r : Le rotor tourne avec la vitesse

C_{em} : Le couple électromagnétique ;

C_r : Le couple résistant ;

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

j : L'inertie des parties tournantes ;

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

f_r : Fréquence des grandeurs rotorique

f_s : Fréquence des grandeurs statorique

ω_r : Pulsations des grandeurs électriques rotoriques.

ω_s : Pulsations des grandeurs électriques statoriques.

d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature

$[R_s]$: Matrice résistance statorique.

$[l_s]$: Inductance propre d'une phase statorique.

$[l_r]$: Inductance propre d'une phase rotorique ;

$[M_s]$: Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$[M_r]$: Inductance mutuelle entre phase rotoriques.

$\Phi_{abc(S)}$: Vecteur flux total statorique.

$V_{abc(S)}$: Vecteur tension statorique applique aux trois phases.

$I_{abc(S)}$: Vecteur courant traversant les enroulements statorique.

φ_{sq} , φ_{sd} : Les flux statoriques direct et en quadrature

φ_{rq} , φ_{rd} : Les flux rotoriques direct et en quadrature

C_T et C_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

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

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

P_s : Puissance active statorique

P_r : Puissance active rotorique

I_{m-mac} Courant fourni par la machine et modulé par le convertisseur coté rotor

I_{m-res} Courant modulé par le convertisseur coté réseau

I_c : Courant capacitif à injecter dans le condensateur

U : La tension du bus continu

C : Capacité totale du condensateur

R_f : Résistance du filtre

L_f : Inductance du filtre

V_{sabc} Tensions aux phases a, b et c du stator

V_{rabc} Tensions aux phases A, B et C du rotor

I_{sabc} Courants aux enroulements a, b et c du stator

I_{rabc} Courants aux enroulements A, B et C du rotor

Ψ_{sabc} Flux totaux aux enroulements a, b et c du stator

Ψ_{rabc} Flux totaux aux enroulements A, B et C du rotor

V_s Vecteur tension statorique triphasée

V_r Vecteur tension rotorique triphasée

φ_s : Vecteur flux statorique triphasé

φ_r Vecteur flux rotorique triphasé

I_s Vecteur courant statorique triphasé

I_r Vecteur courant rotorique triphasé

l_s Inductance propre des enroulements statoriques

l_r Inductance propre des enroulements rotoriques

m_s Inductance mutuelle des enroulements statoriques

m_r Inductance mutuelle des enroulements rotoriques

M_{sr} représente la matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques

V_{ds} : Composante directe de la tension au stator dans le repère de Park

V_{dr} : Composante directe de la tension au rotor dans le repère de Park

I_{ds} : Composante directe du courant au stator dans le repère de Park

I_{dr} : Composante directe du courant au rotor dans le repère de Park

ψ_{rd} : Composante directe du flux au stator dans le repère de Park

ψ_{rs} : Composante directe du flux au rotor dans le repère de Park

V_{qs} : Composante en quadrature de la tension au stator dans le repère de Park

V_{qr} : Composante en quadrature de la tension au rotor dans le repère de Park

I_{qs} : Composante en quadrature du courant au stator dans le repère de Park

I_{qr} : Composante en quadrature du courant au rotor dans le repère de Park

ψ_{qs} : Composante en quadrature du flux au stator dans le repère de Park

ψ_{qr} : Composante en quadrature du flux au rotor dans le repère de Park

g : Glissement du rotor par rapport au stator de la machine

ω_s : Pulsation des grandeurs électriques statoriques

ω_r : Pulsation des grandeurs électriques rotoriques

θ_s : Angle électrique relatif aux grandeurs électriques statoriques

θ_r : Angle électrique relatif aux grandeurs électriques rotoriques

p : Nombre de paires de pôles

V_{mi} avec $i \in \{1, 2, 3\}$: Tensions simples modulées par le convertisseur coté réseau

V_{bd} : Composante directe de la tension aux bornes de l'inductance du filtre dans le repère de Park

V_{bq} : Composante quadratique de la tension aux bornes de l'inductance du filtre dans le repère de Park

i_{td} : Composante directe du courant circulant dans le filtre dans le repère de Park

i_{tq} : Composante quadratique du courant circulant dans le filtre dans le repère de Park

I_{std} Composante directe du courant total envoyé au réseau

I_{stq} Composante quadratique du courant total envoyé au réseau

V_{md} : Composante directe de la tension modulée coté réseau dans le repère de Park.

V_{mq} : Composante en quadrature de la tension modulée coté réseau dans le repère de Park.

V_{rmd} : Composante directe de la tension modulée coté rotor dans le repère de Park.

V_{rmq} Composante en quadrature de la tension modulée coté rotor dans le repère de Park.

V_{md-reg} : Composante directe de la tension de réglage du convertisseur coté réseau
 V_{mq-reg} : Composante en quadrature de la tension de réglage du convertisseur coté réseau
 V_{rd-reg} : Composante directe de la tension de réglage du convertisseur coté rotor
 V_{rq-reg} : Composante en quadrature de la tension de réglage du convertisseur coté rotor
 v_{sd} Composante directe de la tension du réseau
 v_{sq} Composante en quadrature de la tension du réseau
 P_t : Puissance active envoyée par le filtre au réseau
 Q_t : Puissance réactive envoyée par le filtre au réseau
 P_{ref} : Puissance active de référence
 Q_{ref} : Puissance réactive de référence
 S : L'opérateur de Laplace
 E_v : L'énergie stockée
 J_v : Moment d'inertie du volant
 Ω_v : Vitesse angulaire de rotation du volant
 P_v : La puissance stockée par le volant
 L_{s-MAS} : Inductance propre cyclique statorique de la MAS
 L_{s-MAS} : Inductance propre cyclique statorique de la MAS
 L_{r-MAS} : Inductance propre cyclique rotorique de la MAS
 M : Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor de la MAS
 σ : Coefficient de dispersion
 R_{s-MAS} : Résistance d'une phase statorique de la MAS
 R_{r-MAS} : Résistance d'une phase rotorique de la MAS
 i_{sd} : Composante directe du courant statorique
 i_{sq} : Composante quadratique du courant statorique
 v_{sd} : Composante directe de la tension statorique
 v_{sq} : Composante quadratique de la tension statorique
 f_v : Le coefficient du frottement visqueux pour la MAS
 Ω_{vn} La vitesse nominale de la MA
 ψ_{rn} : Le flux rotorique nominal de la MAS
 ψ_{sn} : Le flux statorique nominal de la MAS
 v_s La valeur efficace de la tension simple statorique

ω_b La pulsation du réseau

V_{d-reg} La composante directe de la tension de réglage du convertisseur coté MAS

V_{q-reg} La composante quadratique de la tension de réglage du convertisseur coté MAS

i_{sd} La composante directe du courant statorique de la MAS.

i_{sq} La composante quadratique du courant statorique de la MAS.

v_{sd-ref} La composante directe de la tension de référence issue de la commande vectorielle de la MAS.

v_{sq-ref} La composante quadratique de la tension de référence issue de la commande vectorielle de la MAS.
