

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



جامعة بجاية
Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa

Université A/Mira de Bejaia
Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique
Option Réseaux Electriques



PROJET DE FIN D'ÉTUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME MASTER

EN ÉLECTROTECHNIQUE

Thème

**COMMANDE D'UNE GÉNÉRATRICE
ASYNCHRONE INTEGRÉE DANS UN SYSTÈME
ÉOLIEN CONNECTÉE AU RÉSEAU**

Présenté par :

M. KASDI RAFIK
M. HANTAT BRAHIM

Encadré par :

M. AMIMEUR HOCINE

Membre de jury :

M. SAOU RACHID
M. ALITOCHE KARIM

Résumé

Dans ce mémoire nous avons présenté la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil comme étant une solution originale dans les applications de génération de l'énergie électrique, notamment l'énergie éolienne.

Ce type de machine peut fonctionner dans un mode peu particulier dans les deux quadrants (en moteur ou en génératrice), de plus cette dernière (GAS) pilotée par le stator par des convertisseurs contrôlés en MLI et reliés au réseau via un bus continu, un filtre et un transformateur.

On a principalement décrit la commande par mode de glissement associé à la commande vectorielle par orientation du flux rotoriques de la GAS, le contrôle de la liaison au réseau avec la régulation du bus continu. Ce dernier est relié au réseau alternatif via un second convertisseur MLI qui a permet de contrôler les échanges de puissance active et réactive avec le réseau.

Plusieurs essais de simulation sous Simulink/Matlab sont effectués en vue de mettre en évidence les performances du système de commande.

Mots clés

Turbine, Machine asynchrone a cage d'écureuil, Convertisseur AC/DC et DC/AC, Commande vectorielle, mode glissant, vitesse variable

Abstract

In this memory we presented the three-phase asynchronous machine at squirrel-cage as being an original solution in the applications of generation of the electric power, in particular the wind power.

This type of machine can function in a not very particular mode in the two quadrants (out of engine or generator), moreover the latter (GAS) controlled by the stator, converters controlled in MLI and connected to the network via a continuous bus, a filter and a transformer.

One mainly described the operation by mode of slip associated with the vectorial order by orientation with rotor flows with the GAS, the control of the connection to the network with the regulation of the continuous bus. This last is connected to the alternative network via a second converter MLI which A makes it possible to control the exchanges of active and reactive power with the network.

Several tests of simulation under Simulink/Matlab are carried out in order to highlight the performances of the control device.

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à monsieur AMIMEUR Hocine pour ses conseils précieux ainsi que pour la confiance et l'aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évalué et examiner notre travail.

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont aidé et soutenu durant tout notre parcours trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents dont le sacrifice, l'amour et le soutien sont l'essence de ma réussite

A mes frères abdou, valah et athemane et son petit abdessamed,

A mes sœurs wahiba et nacera et leurs fils

A tous mes amis

Rafik





Dédicaces

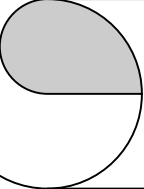
Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents dont le sacrifice, l'amour et le soutien sont l'essence de ma réussite

A mes frères karim, zahir, yacine massinissa, mohamed et à mon demi frere arab

A mes sœurs kahina et djamila et leurs fils, ayoub et manal

A tous mes amis, farid ben moussa, touak massinissa



A decorative horizontal border with rounded ends, resembling a scroll or a ribbon, framing the title. The border is thin and black, with small circular details at the corners suggesting a rolled-up edge.

Sommaire

Sommaire

Sommaire	i
Tables des figures	iv
Liste des tableaux	Vi
Nomenclature	I
Notation	IV
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur les systèmes de conversions éoliens	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Vitesse et direction du vent	4
I.4 Représentation d'une éolienne et son énergie de production	4
I.4.1 Différents types d'éoliennes et leur utilisation	5
I.4.1.1 Eolienne à axe vertical	5
I.4.1.2 Eoliennes à axe horizontal	5
I.4.2 Principales composantes d'éolienne	6
I.4.2.1 Mât	6
I.4.2.2 Rotor	7
I.4.2.3 Nacelle	7
I.4.2.3.1 Multiplicateur	7
I.4.2.3.2 Génératrice	8
I.4.3. Principe de fonctionnement	8
I.4.4 Conversion de l'énergie éolienne	8
I.4.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	9
I.4.5.1 Avantages	9
I.4.5.2 Inconvénients	9
I.5 Rentabilité d'une éolienne	9
I.6 Description des machines électriques à courant alternatif	10
I.6.1 Machine synchrone	10
I.6.2 Machine asynchrone	11
I.7 Différentes génératrices et convertisseurs utilisées dans les systèmes éoliens	11
I.7.1 Génératrices synchrones et celles à aimant permanent (GS et GSAP)	11
I.7.2 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)	12
I.7.3 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil (GAS)	13
I.7.4 Redresseur à diodes et onduleur MLI	16
I.7.5 Redresseur et onduleur MLI	16
I.8 Description et l'impact du système étudié sur le Réseau et sur la Qualité d'énergie. .	16
I.8.1 Description des contraintes de raccordement	17
I.8.1.1 Réglage de la tension	17

I.8.1.2 Réglage de la fréquence	18
I.8.2 Description des problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique	18
I.8.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible	18
I.8.2.2 Capacité d'accueil	18
I.8.2.3 Déconnexions intempestives	19
I.8.3 Description des facteurs affectant la qualité énergétique	19
I.8.3.1 Fluctuation de tension	19
I.8.3.2 Variation de la fréquence	20
I.8.3.3 Harmoniques et inter-harmoniques	20
I.9 Conclusion	20

Chapitre II : Modélisation d'ensemble turbine, machine et convertisseur

II.1 Introduction	21
II.2 Modélisation du système éolien	21
II.2.1 Introduction	21
II.2.2 Modélisation et principe de contrôle de la turbine	21
II.2.3 Modélisation de machine asynchrone	25
II.2.3.1 Principe de fonctionnement	25
II.2.3.2 Hypothèses simplificatrices	25
II.2.3.3 Modèle triphasé de la machine asynchrone	26
II.2.3.3.1 Equations électriques	26
II.2.3.3.2 Equations magnétiques	27
II.2.3.3.3 Equations mécaniques	28
II.2.3.4 Modèle biphasé de la MAS	28
II.2.3.4.1 Transformation de Park	28
II.2.3.4.2 Modèle de la MAS selon le système d'axe généralisé (u, v)	29
II.2.3.4.2.1 Système d'équations électriques	30
II.2.3.4.2.2 Système d'équations magnétiques	30
II.2.3.4.3 Choix du système d'axes	30
II.2.3.4.3.1 Système d'axes (α , β)	30
II.2.3.4.3.2 Système d'axes (x, y)	30
II.2.3.4.3.3 Système d'axes (d, q)	30
II.2.3.5 Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q)	30
II.2.3.5.1 Equations électriques	31
II.2.3.5.2 Equations magnétiques	31
II.2.3.5.3 Puissance absorbée et couple électromagnétique	32
II.2.4 Modélisation de l'onduleur de tension	33
II.2.4.1 Introduction	33
II.2.4.2 Commande par modulation sinus-triangle	34
II.3 Conclusion	34

Chapitre III: Commande par MG d'un système éolien à vitesse variable basé sur la GAS

III.1 Introduction	36
III.2 Principe de la commande par mode de glissement	36
III.3 Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement	37
III.3.1 Choix des surfaces de glissement	37
III.3.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant	37
III.3.3 Détermination de la loi de commande	38
III.4 Orientation du flux rotorique	42
III.4.1 Surface de régulation de la vitesse	44
III.4.2 Surface de régulation du flux rotorique	45
III.4.3 Surface de régulation des courants statoriques	45
III.5 Contrôle de la liaison au réseau	48
III.6 Résultats et interprétations	51
II.7 Conclusion	57
Conclusion générale	58
Annexe	I
Bibliographie	IV

Table des figures

Figure I.1	Photographie de deux moulins à vent	3
Figure I.2	Eolienne à axe vertical	5
Figure I.3	Types d'éoliennes à axe horizontal	6
Figure I.4	Nacelle d'une éolienne	7
Figure I.5	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	8
Figure I.6	Croissance de l'énergie éolienne installée dans le monde de 1996 à 2009 . . .	10
Figure I.7	Système éolien basé sur la GSAP	12
Figure I.8	Système éolien basé sur la GS	12
Figure I.9	Système éolien basé sur la GADA à couplage électronique par le rotor	13
Figure I.10	Système éolien basé sur la GADA avec contrôle du glissement par la dissipation de la puissance	13
Figure I.11	Système éolien basé sur le couplage en cascade de deux GADA, la première à une étoile et la seconde à double étoile	13
Figure I.12	Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles	15
Figure I.13	Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	15
Figure I.14	Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance	16
Figure I.15	Schéma global du système étudié	16
Figure II.1	Coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ)	22
Figure II.2	Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine	24
Figure II.3	Représentation schématique des enroulements de la MAS	25
Figure II.4	Représentation du modèle généralisé de la MAS selon les axes (u, v)	29
Figure II.5	Onduleur triphasé à deux niveaux	35
Figure III.1	Mode de fonctionnement dans le plan de phase	36

Figure III.2	Fonction sign (non linéarité tout ou rien)	40
Figure III.3	Phénomène de broutement	40
Figure III.4	Fonction de saturation ($\varepsilon > 0$ et <i>petit</i>)	41
Figure III.5	Fonction de classe C^1 ($\varepsilon < 0$ et <i>petit</i>)	41
Figure III.6	Schéma bloc de la commande par mode de glissement associée à la commar vectorielle à flux rotorique orienté de la GAS	48
Figure III.7	Schéma bloc représentatif du contrôle de la liaison au réseau	50
Figure III.8	Vitesse mécanique de la GAS	52
Figure III.9	Puissance mécanique de la turbine	53
Figure III.10	Couple électromagnétique	53
Figure III.11	Flux direct et quadratique rotoriques	53
Figure III.12	Tension et courant statoriques	53
Figure III.13	Zoom de la tension et du courant statoriques	54
Figure III.14	Courant rotorique	54
Figure III.15	Puissances active et réactive statoriques	54
Figure III.16	Tension du bus continu	55
Figure III.17	Zoom de la tension du bus continu	55
Figure III.18	Tension et courant avant le filtre	55
Figure III.19	Zoom de la tension et du courant avant le filtre	56
Figure III.20	Tension et courant côté réseau	56
Figure III.21	Zoom de la tension et du courant côté réseau	56
Figure III.22	Puissances active et réactive côté réseau	57

Liste des tableaux

Tableau I.1	Echelle Beaufort	4
Tableau I.2	Niveaux de tension de raccordement en fonction de leur puissance	17

Nomenclature

P_{vt}	Puissance du vent captée par les pales [W].
ρ	Densité de l'air [kg/m^3].
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne [m^2].
β	Angle de calage des pales [rd].
P_{aer}	Puissance aérodynamique [W].
λ	Rapport de vitesse.
λ_{opt}	Rapport optimale de vitesse.
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine [rd/s].
v_{vt}	Vitesse du vent [m/s].
R	Rayon des pales [m].
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne.
C_{aer}	Couple aérodynamique [N.m].
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de rotation de la turbine [rd/s].
K	Rapport du multiplicateur de vitesse.
C_{aer}	Couple sur l'arbre lent [N. m].
C_{arb}	Couple sur l'arbre rapide [N. m].
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$].
J_g	Inertie de la génératrice [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$].
J	Inertie totale de l'éolienne [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$].
C_{visq}	Couple des frottements visqueux [N.m].
f	Coefficient de frottement visqueux [N. m. s].
C_{Pmax}	Coefficient de puissance maximale de l'éolienne.
P	Nombre de paire de pôles de la MAS.
p	Operateur de Laplace.
N_s	Vitesse de synchronisme [tr/min].
g	Glissement.
θ_r	Position angulaire du rotor [rd].

R_s	Résistance d'une phase statoriques de la MAS [Ω].
R_r	Résistance d'une phase rotorique de la MAS [Ω].
$[v_s], [v_r]$	Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques [V].
$[i_s], [i_r]$	Vecteurs des courant des phases statoriques et rotoriques [A].
$[\phi_s], [\phi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques [Wb].
L_s, L_r	Inductance propre d'une phase statoriques et rotorique [H].
M_s, M_r	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques et rotorique [H].
M_{sr}, M_{rs}	Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor [H].
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m].
C_r	Couple résistant [N.m].
J	Moment d'inertie de la MAS [kg.m^2].
K_f	Coefficient de frottement [N.m.s].
ω_r	Pulsation des courant triphasés rotoriques [rd /s].
ω_{coord}	Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé (rd/s).
ω_{gl}	Pulsation électrique fondamentale du glissement [rd/s].
$[P(\theta)]$	Matrice de Park.
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice inverse de Park.
$S(x)$	Surface de glissement de la variable x.
U_n	Commande non linéaire (stabilisante).
U_{eq}	Commande équivalente (linéarisation exacte).
v_{ds}, v_{qs}	Tension statorique directe et quadratique.
v_{dr}, v_{qr}	Tension rotorique directe et quadratique.
i_{ds}, i_{qs}	Courant statorique direct et quadratique.
i_{dr}, i_{qr}	Courant rotorique direct et quadratique.
ϕ_{ds}, ϕ_{qs}	Flux statorique direct et quadratique.

ϕ_{dr}, ϕ_{qr} Flux rotorique direct et quadratique.

u_{dc} Tension du bus continu

* (exposant) Grandeur de référence.

Notations

FOC	Field Oriented Control (commande à flux orienté)
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
GAS	Génératrice Asynchrone à cage
GS	Génératrice Synchronne
GSAP	Génératrice Synchronne à Aimants Permanents
MAS	Machine Asynchrone
MG	Mode Glissant
MS	Machine Synchronne
M.L.I	Modulation par Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel – Intégrale

A decorative horizontal scroll border with rounded ends and a slight shadow effect, containing the title text.

Introduction générale

Introduction générale

La machine asynchrone, de part sa simplicité de conception et d'entretien, a la faveur des industriels depuis son invention par Nicola Tesla à la fin du 19^{ème} siècle, quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courant polyphasé. Cette simplicité s'accompagne toutefois de grande complexité physique liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor [1]. D'autre part, la machine asynchrone peut, selon sa construction, être alimentée par un réseau monophasé ou polyphasé (généralement triphasé car c'est celui du réseau de distribution). En outre, la machine asynchrone est la machine électrique la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car elle offre le meilleur rapport qualité prix.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. La machine asynchrone est utilisée aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires, automobiles électriques), dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Dans les premiers temps elle était utilisée en moteur mais, avec le développement de l'électronique de puissance, elle est de plus en plus utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les systèmes éoliens.

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de contrôle modernes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. On cite à titre d'exemple la commande adaptative, la commande floue, la commande par mode de glissement etc., l'intérêt récent accordé à cette dernière est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants [2].

Toutefois, la commande de la machine asynchrone reste complexe par les développements théoriques mis en œuvre et la difficulté à identifier certains paramètres en temps réel [1].

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la commande de l'ensemble turbine, machine, convertisseur et réseau en utilisant une génératrice asynchrone à cage d'écureuil et qui fera l'objet de trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de quelques généralités sur le système éolien notamment sa description tout en donnant ses parties constitutives, son principe de fonctionnement, son énergie de production et les différents types de machines et convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens et leurs impacts sur le réseau électrique.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation de l'ensemble turbine, machine (MAS à cage) et convertisseur. Après la modélisation du système éolien nous décrivons la machine et son principe de fonctionnement, nous donnons son modèle triphasé puis son modèle biphasé basé sur la transformation de Park. Nous présentons ensuite la modélisation de l'onduleur de tension à commande MLI contrôlé par modulation sinus-triangle.

Le troisième chapitre aura comme objectif la commande du système éolien à vitesse variable basé sur la GAS piloté par le stator pour pouvoir transiter la puissance générée par la machine par mode de glissement.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

I.1 Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies ; notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique qui est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [3][4].

I.2 Historique

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre du grain (figure I.1). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « **Poul La Cour** » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, environ 1 million d'aérogénérateurs fonctionnaient dans le monde. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes [16].



Fig. I.1 Photographie de deux moulins à vent [16].

I.3 Vitesse et direction du vent

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (par exemple offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse [3] [6].

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau I.1 [3].

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

Tableau I.1 Echelle Beaufort [3]

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s [3].

I.4 Représentation d'une éolienne et son énergie de production

Une éolienne est un Dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes sont composées de pales en rotation autour d'un rotor et actionnés par le vent. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'énergie électrique de catégorie des énergies renouvelables.

I.4.1 Différents types d'éoliennes et leur utilisation

Le vent a toujours excité l'imagination de l'inventeur qui a enfanté sur le papier une foule de projets éoliens.

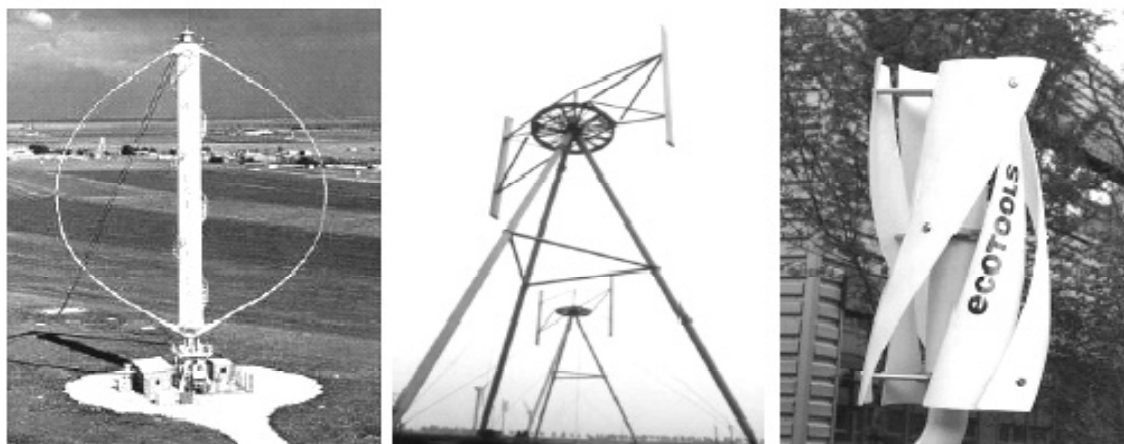
Les éoliennes se rangent en deux grandes familles, selon qu'elles tournent autour d'un axe horizontal ou vertical.

I.4.1.1 Eoliennes à axe vertical

Le caractère omni directionnel des éoliennes modernes à axe vertical constitue leur principal avantage sur capter le vent, quelle que soit sa direction.

Cette caractéristique permet d'obtenir des systèmes simples et d'éliminer le problème des forces gyroscopiques sur le rotor d'un éliminateur classique lorsque celle-ci s'oriente en fonction du vent. L'axe vertical de rotation permet également d'installer le générateur et transmissions sur niveau du sol.

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure I.2, toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales [17].



a) Darrieus

b) Darrieus de type H

c) Savonius

Fig. I.2 Eoliennes à axe vertical [17].

I.4.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement

aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [16].

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (figure I.3):

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

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [16].

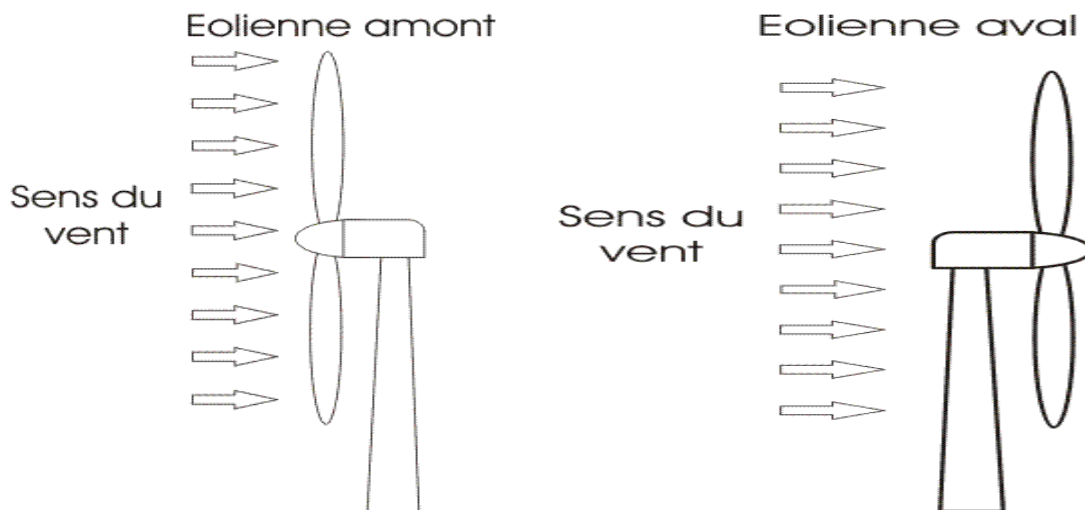


Fig. I.3 Types d'éoliennes à axe horizontal [16].

I.4.2 Principales composantes d'éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois principaux éléments :

I.4.2.1 Mât

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation de puissances nominales des éoliennes, le mât doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur) et permettre l'utilisation de pales plus longues. Le mât a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les

éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle [12] [13].

I.4.2.2 Rotor

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'énergie électrique, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées actuellement une machine asynchrone à cage d'écuriel) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût. Toutefois, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique.

I.4.2.3 Nacelle

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque différent du frein aérodynamique qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la girouette (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [12]. La figure 1.4 montre la nacelle et ses éléments.

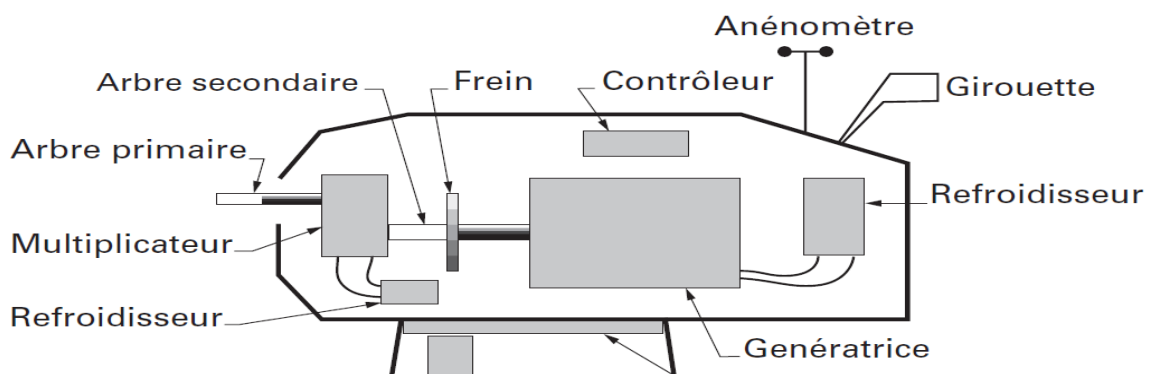


Fig. I.4 Nacelle d'une éolienne [11].

I.4.2.3.1 Multiplicateur : Appelé aussi transmission, il adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. On ne trouve pas ce composant dans les éoliennes munies des génératrices synchrones (transmission directe) [13].

I.4.2.3.2 Génératrice : La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Dans notre cas c'est une génératrice asynchrone à cage d'écureuil [13].

I.4.3 Principe de fonctionnement

Une éolienne (ou "aérogénérateur") utilise la force du vent pour actionner les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée en énergie électrique grâce à un générateur. Une éolienne se compose d'un mât pouvant mesurer de 10 à 100 m de haut selon la puissance de la machine. Sur le mât est installée une nacelle renfermant la génératrice électrique qui est entraînée par un rotor de 2 ou 3 pales mesurant entre 5 et 100 m de diamètre. La puissance d'une éolienne terrestre peut aller jusqu'à 3 MW. Elle varie de 4 à 6 MW pour les éoliennes en mer. Une éolienne fonctionne uniquement lorsqu'il y a du vent. Elle tourne en effet lorsque la vitesse du vent s'établit entre 15 et 90 km/h, vitesse au-delà de laquelle l'éolienne s'arrête automatiquement pour des raisons de sécurité. L'électricité ainsi produite est acheminée par un câble électrique souterrain jusqu'au poste de livraison. Les éoliennes de forte puissance n'étant pas haubanées, elles nécessitent de solides fondations. L'éolienne sert donc à produire de l'énergie électrique (figure I.5), généralement dans trois types de configuration : celle de l'éolienne sur un terrain individuel, un parc éolien terrestre et en mer [9].

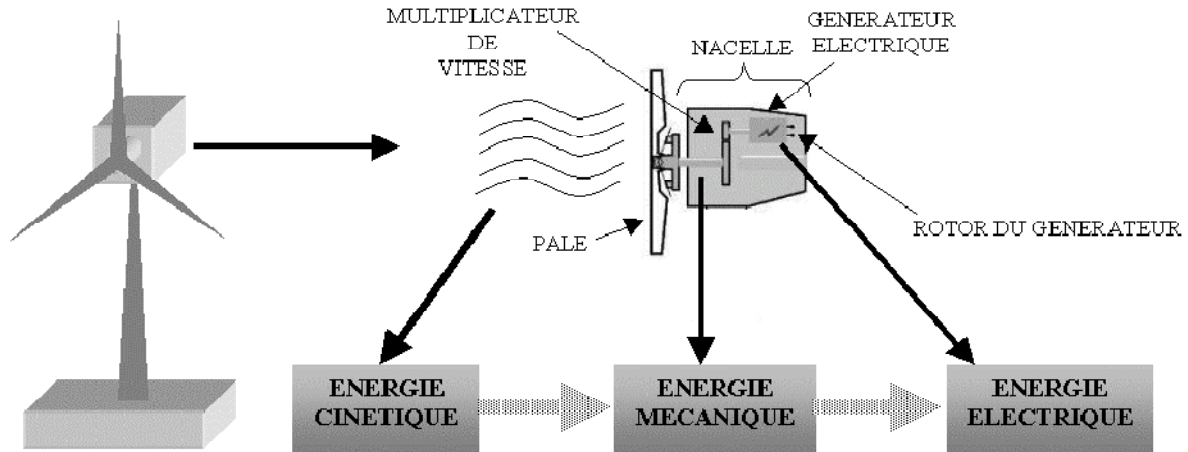


Fig. I.5 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [12].

I.4.4 Conversion de l'énergie éolienne

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable de son utilisation pour la production de l'énergie électrique. Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée [15].

I.4.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.4.5.1 Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles ;
- 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 ;
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets contrairement à l'énergie nucléaire.

I.4.5.2 Inconvénients

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau ;
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés ;
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe ;
- Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue ;
- Les oiseaux : les éolienne, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par le mauvais temps ou la nuit, les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celle-ci [10].

I.5 Rentabilité d'une éolienne

Les facteurs suivants déterminent le coût de l'énergie éolienne :

- Le coût initial de l'éolienne et de son installation ;
- Le taux d'intérêt à payer sur l'investissement ;
- La quantité d'énergie produite.

Toute éolienne installée dans un endroit fortement exposé au vent produit de l'électricité moins coûteuse que la même éolienne installée dans un endroit moins venté. Par conséquent, il est important d'évaluer la vitesse du vent à l'endroit envisagé pour l'installation des éoliennes.

Dans les endroits exposés à de bons vents, le coût de production de l'électricité se situe entre 0.06 et 0.12\$ du kWh. Ce coût est quelque peu supérieur aux frais associés à une installation d'électricité, mais les coûts de l'énergie éolienne diminuent chaque année, tandis que les coûts de production plus traditionnels continuent d'augmenter.

Lorsque l'on compare le prix de détail de l'électricité payé par les consommateurs, les coûts de l'énergie éolienne sont presque concurrentiels.

Cependant, sur les sites moins ventés le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques.

Pour pouvoir comparer les sources d'énergie entre elles, la notion de coût global social a été introduit (coûts de dépollution ou de retraitement, coûts de recherche et de développement, coûts stratégiques d'approvisionnement).

En coût global, l'énergie éolienne est l'une des énergies les moins coûteuses.

L'éolienne a eu une croissance moyenne annuelle de 40% entre 2002 et 2007. Ce développement de l'énergie éolien s'est surtout exprimé en Europe, comme on peut le constater et la source d'énergie qui croit le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que le nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté [14] [8].

La figure I.6 montre la croissance de l'énergie éolienne installée dans le monde entre 1996 et 2009.

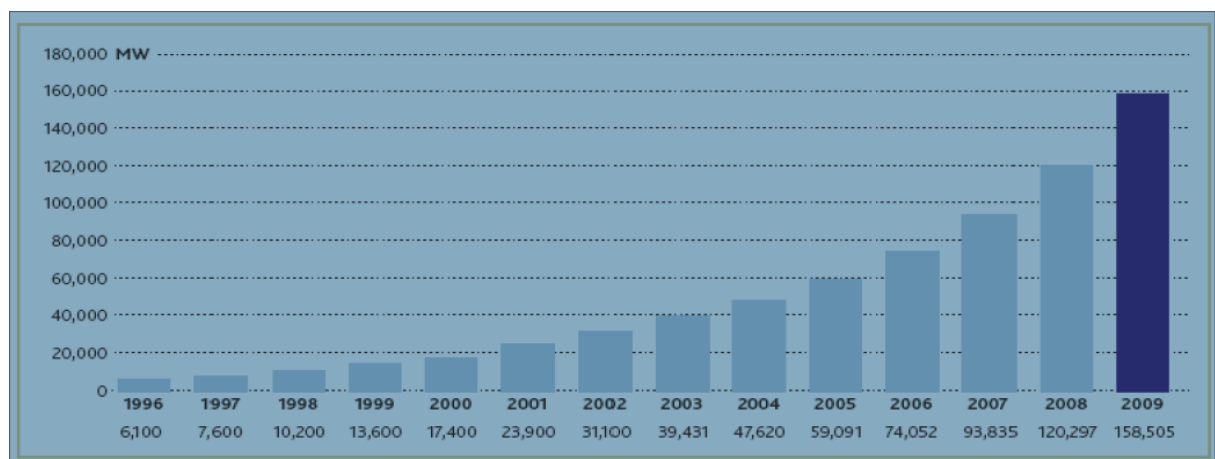


Fig. I.6 Croissance de l'énergie éolienne installée dans le monde de 1996 à 2009 [10].

I.6 Description des machines électriques à courant alternatifs

Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Ce sont souvent des structures standards à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désiré (connexion au réseau électrique ou fonctionnement isolé et autonome), différentes configuration de connexion au réseau ou à la charge peuvent être adoptées [18].

I.6.1 Machine synchrone

Les machines synchrones (MS) sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques convenables. Dans ce cas leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau. L'utilisation des convertisseurs statiques s'impose alors

naturellement. Toutefois, elles requièrent un système de bagues et de balais qui nécessite un entretien régulier. Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles. Le développement des aimants permanents en terre rares permet de s'affranchir de ses inconvénients et de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs développant des coûts mécaniques considérables [18].

I.6.2 Machine asynchrone

La machine asynchrone (MAS) est utilisée dans la plupart des cas car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces variations de vitesses engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe. La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateurs pour la fourniture d'énergie réactive.

La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide).

Cette chaîne cinétique implique des forces de frottements qui empêchent la rotation du rotor par vent faible, il faut donc vaincre ces forces d'inertie au démarrage grâce à un coup de vent plus important.

La génératrice asynchrone peut être :

- A **rotor bobiné ou à bagues**: Les enroulements du rotor couplés en étoile sont reliés à un système de bagues/balais permettant ainsi l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor.
- A **cage d'écureuil**: Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements rotoriques ne sont alors pas accessibles.

On peut reconnaître une éolienne utilisant une génératrice asynchrone par la forme allongée de la nacelle, qui abrite la chaîne cinétique.

I.7 Différentes génératrices et convertisseurs utilisés dans les systèmes éoliens

I.7.1 Génératrice synchrone et celle à aimant permanent (GS et GSAP)

Les machines sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Néanmoins, les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système bagues et balais. Le

circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive (figure I.7).

Les machines à aimants permanents sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables (figure I.8). Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défaut : suppression du multiplicateur mécanique de vitesse et du système bagues et balais pour les GSAP. La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [19].

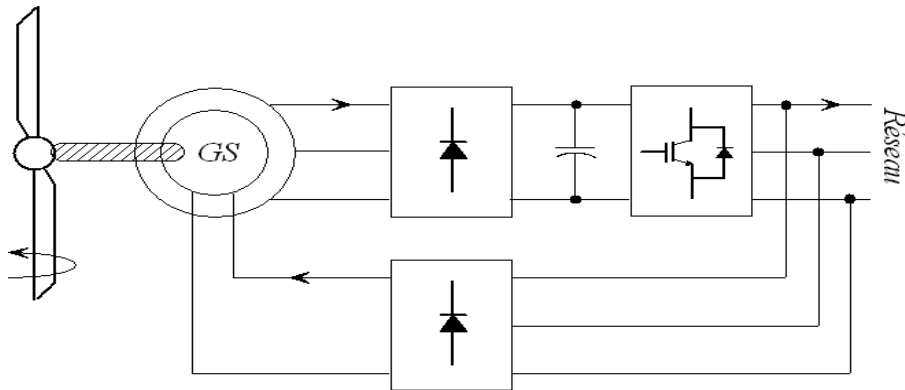


Fig I.7 Système éolien basé sur la GS [19]

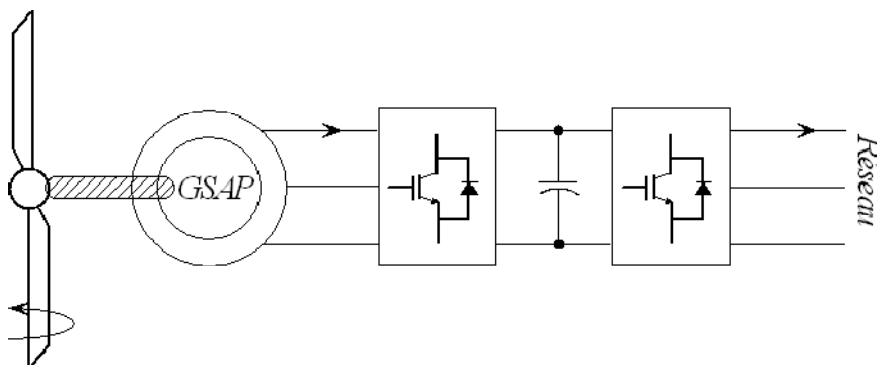


Fig I.8 Système éolien basé sur la GSAP [19]

I.7.2 Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

Les éoliennes à vitesse variables à couplage électronique par le rotor (figure I.9) sont connectées au réseau par une GADA (rotor bobiné). Le couplage entre l'aéroturbine et la génératrice se fait par le biais d'un multiplicateur de vitesse. Toutefois, sa robustesse est légèrement diminuée par la présence du système bagues et balais.

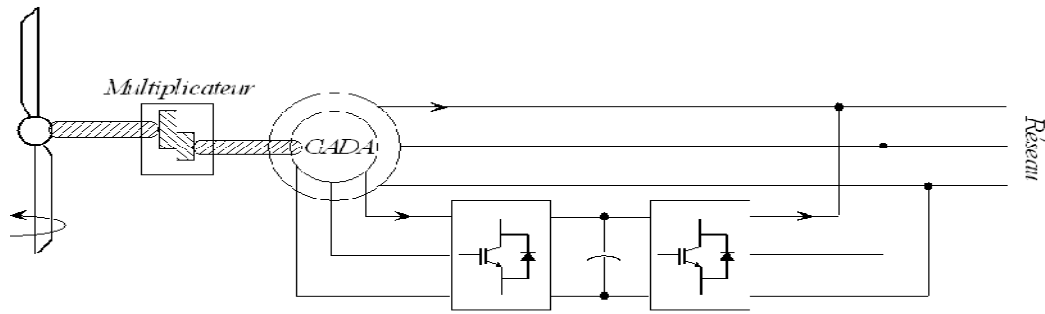


Fig I.9 Système éolien basé sur la GADA à couplage électronique par le rotor [19].

La figure I.10 montre la technologie qui permet une variation limitée de la vitesse à environ de 10% autour de celle de synchronisme par le changement de la résistance rotor. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotor dans les éléments résistifs.

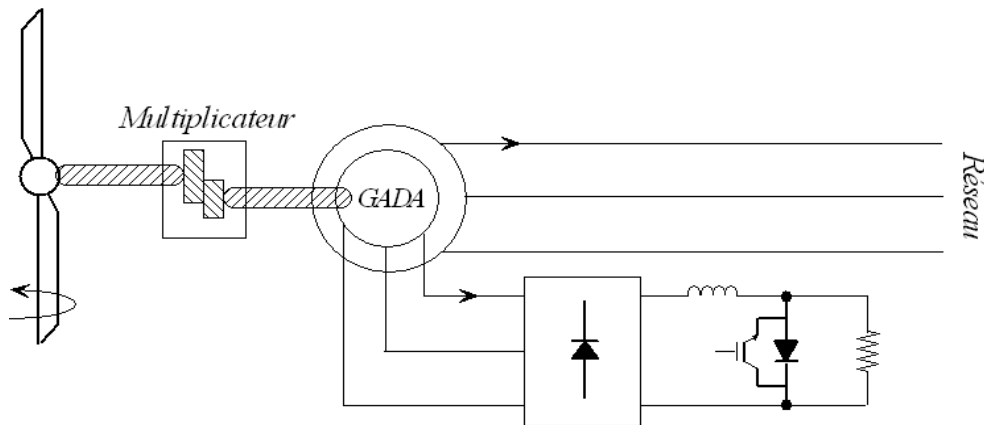


Fig. I.10 Système éolien basé sur la GADA avec contrôle du glissement par la dissipation de la puissance [19].

Une autre solution est celle de coupler deux machines identiques, tout en modifiant la construction de la deuxième en une autre portant deux étoiles décalée d'un angle électrique $\alpha=30^\circ$, au niveau de son stator (figure I.11) [19].

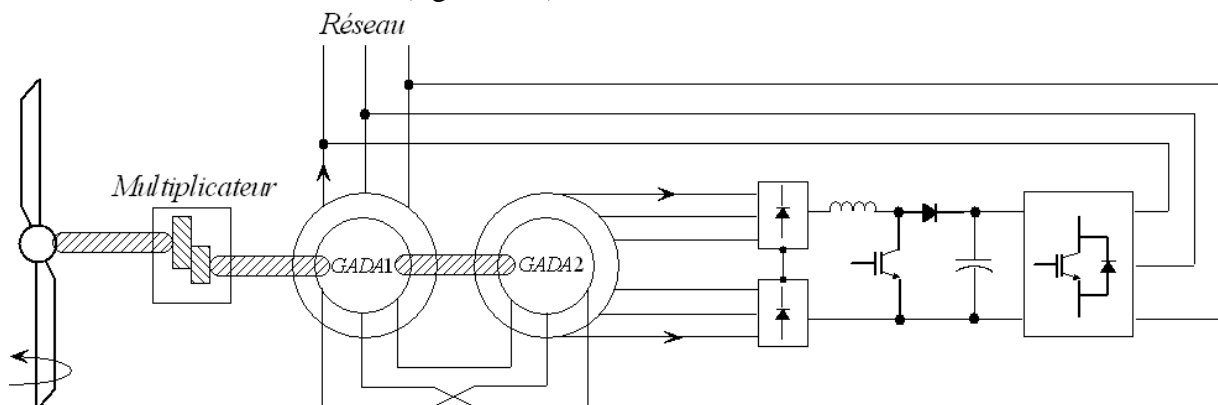


Fig. I.11 Système éolien basé sur le couplage en cascade de deux GADA, la première à une étoile et la seconde à double étoile [19]

I.7.3 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil (GAS)

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grandes puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence des balais et collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure I.12.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique suivante (figure I.12), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500tr/min et 1600tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure I.13).

La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure I.14, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

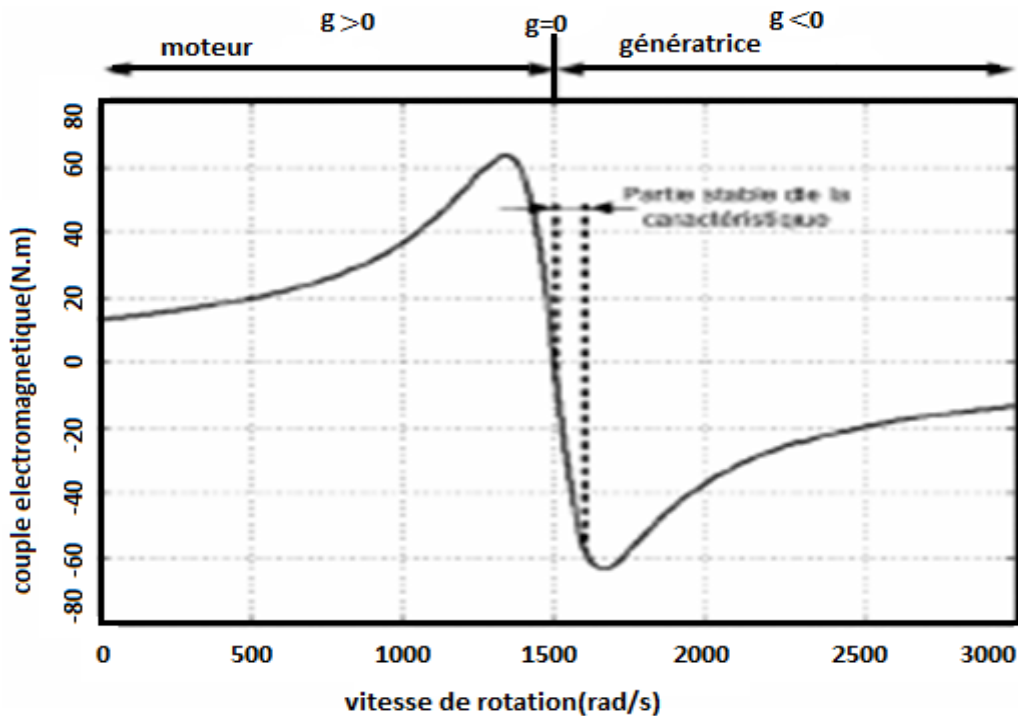


Fig I.12 Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles

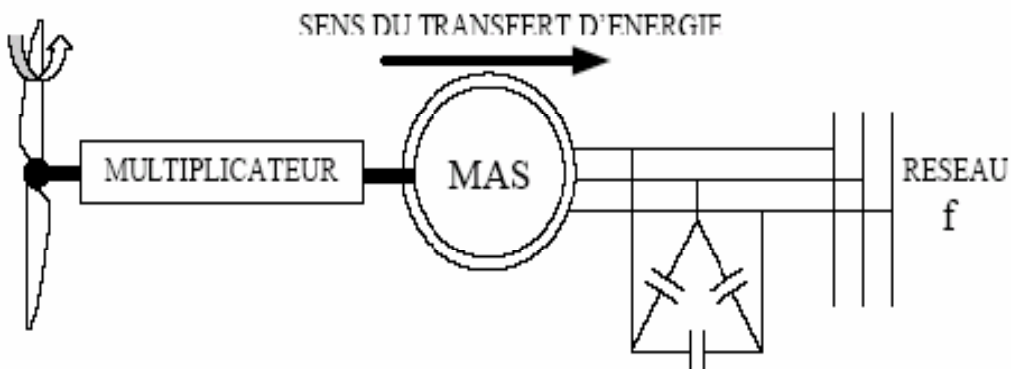


Fig I.13 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [20].

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif d'électronique de puissance (figure 1.14).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée [20].

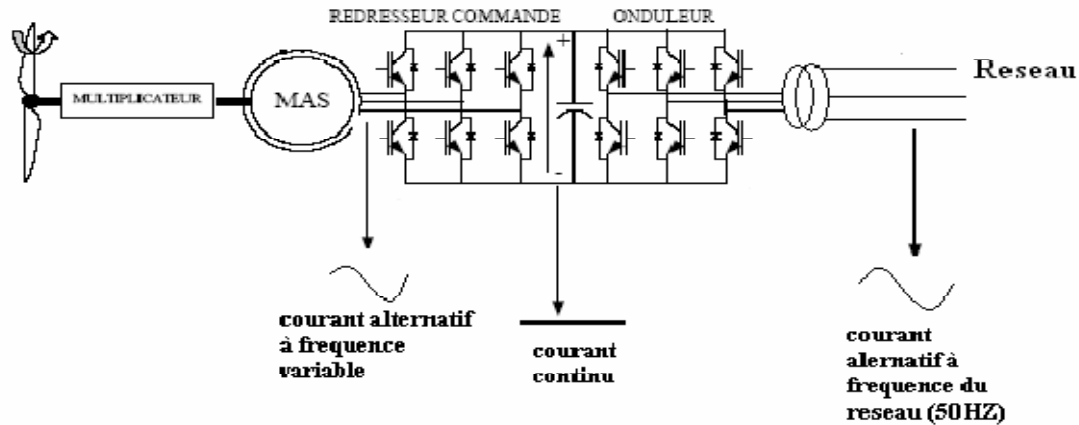


Fig I.14 Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance [20]

I.7.4 Redresseur à diodes et onduleur MLI

Cette topologie utilise un redresseur à diodes entre le bus continu et la génératrice, et un onduleur à IGBT (contrôlé par MLI) placé entre le bus continu et le réseau. La puissance transitée entre la génératrice et le bus continu est donc unidirectionnelle : la génératrice ne peut donc être que freinée. Le réglage de la vitesse de la GAS est donc limité ce qui réduit la possibilité d'extraire la puissance maximale.

I.7.5 Redresseur et onduleur MLI

Le redresseur est un convertisseur à IGBT fonctionnant à fréquence variable. La vitesse de la GAS est alors parfaitement contrôlable. Un deuxième convertisseur (onduleur à MLI) connecté au réseau est nécessaire pour contrôler les transits de puissance.

I.8 Description et l'impact du système étudié sur le réseau et sur la qualité d'énergie

Le système étudié est connecté au réseau, considéré puissant et se compose d'un aérogénérateur basé sur la génératrice asynchrone à cage, de deux convertisseurs de puissance contrôlés en MLI, du bus continu, du filtre d'entrée et du transformateur. Le schéma global du système est représenté par la figure I.15.

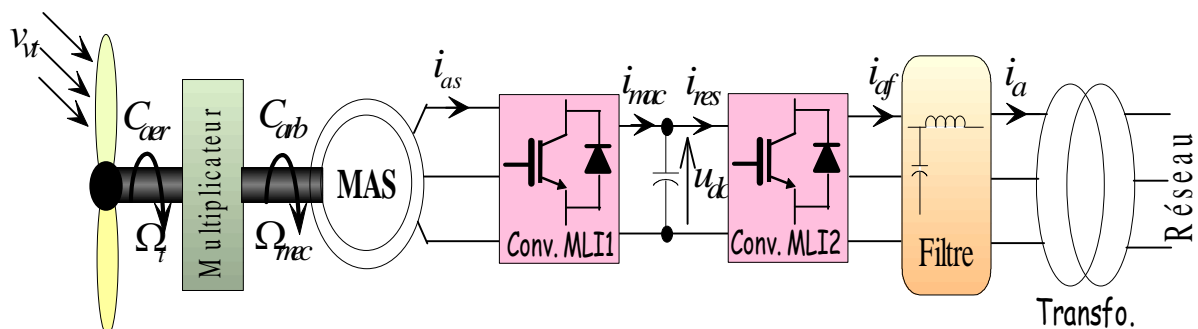


Fig I.15 Schéma global du système étudié.

I.8.1 Description des contraintes de raccordement

Les prescriptions techniques relatives au raccordement au réseau de transport d'une installation de production d'énergie électrique sont précisées dans le décret et l'arrêté. Le décret présente les contraintes de raccordement de manière générale et l'arrêté les précise en fonction du type d'installation. Sans prétendre être exhaustifs, nous allons évoquer quelques unes de ces contraintes [14].

I.8.1.1 Réglage de la tension

Les installations de production relèvent :

- du réseau public de transport si la puissance installée est supérieure à 12 MW ; le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la HTB) ;
- du réseau public de distribution si la puissance installée est inférieure ou égale à 12 MW ; le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20 kV (domaine de la HTA et de la BT).

Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder, elle définit le type de réseau. Le tableau I.2 donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance, en France.

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et ou de la puissance réactive au point de livraison soit par un réglage primaire soit par un réglage secondaire : Le réglage primaire, qui mobilise la réserve réactive des groupes les plus proches de la perturbation, sous l'action de leur régulateur primaire de tension agissant sur l'excitatrice des groupes à partir des variations de tension observées au stator, de façon à maintenir cette tension égale à la valeur de consigne affichée. Le réglage secondaire de tension, qui mobilise les réserves réactives de l'ensemble des groupes et des condensateurs par zones électriquement homogènes du point de vue du comportement en tension.

Plus la puissance produite est importante, plus les contraintes de réglage sont importantes.

Les installations raccordées aux réseaux HTB2 et HTB3 doivent pouvoir participer au réglage secondaire de la tension de leur zone, si le gestionnaire du réseau le demande [14].

Type de réseau	Plage de tension	Niveaux de tension	Puissance
BT	BT monophasé	230 V	P < 18 Kva
BT	BT triphasé	400 V	P < 250 kVA
MT (HTA)	1 kV < U < 50 kV	15 kV, 20 kV	P < 12MW
HT (HTB1)	50 kV < U < 130 kV	63 kV, 90 kV	P < 50MW
HT (HTB2)	130 kV < U < 350 kV	150 kV, 225 kV	P < 250MW
HT (HTB3)	350 kV < U < 500 kV	400 kV	P > 250MW

Tableau I.2. Niveaux de tension de raccordement en fonction de leur puissance [14].

I.8.1.2 Réglage de la fréquence

A la différence de la tension, qui est un paramètre local (la tension est différente en tout point du réseau, elle dépend du courant qui circule dans les lignes au voisinage du point considéré), la fréquence est homogène dans tout le réseau électrique dès lors que la production et la consommation sont en équilibre [14].

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour les fermes éoliennes. Il est néanmoins intéressant de noter les contraintes imposées aux autres installations :

- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 40 MW doivent participer au réglage primaire de fréquence ;
- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 120 MW doivent participer au réglage secondaire de fréquence.

Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien. En cas de forte pénétration de l'éolien, les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien évolueront. Le problème étant évidemment l'existence d'une réserve primaire associée à l'éolien. Actuellement, il est déjà demandé aux éoliennes de réduire leur génération lorsque la production est supérieure à la consommation, donc lorsque la fréquence est supérieure à 50 Hz [14].

I.8.2 Description des problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique

Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans le réseau électrique sont principalement causés par :

- leur production aléatoire qui est difficilement prévisible ;
- la capacité d'accueil ;
- les déconnexions intempestives [14].

I.8.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible

Le problème majeur de l'éolien est l'incertitude sur les prévisions de la vitesse du vent sur les sites éoliens induisant une incertitude sur la production des éoliennes. Les erreurs de prévisions sont en négatif (sous-production) ou en positif (surproduction) avec des changements de signe rapides en cours de journée. La prévision est satisfaisante en ce qui concerne l'amplitude mais le moment où ce niveau de production est atteint, n'est pas précis.

L'expérience allemande montre que des prévisions à 72 h sont utopiques, et que l'erreur moyenne sur des prévisions à 24 h représente 10% de la capacité installée et peut atteindre parfois 50% [14].

I.8.2.2 Capacité d'accueil

La capacité des lignes et des postes est limitée. Les sites ventés sont souvent éloignés des lieux de consommation. Par conséquent, de nouvelles lignes et postes devraient être construits afin d'assurer la sécurité du réseau. Une étude prospective réalisée dans la zone

gérée par l'opérateur allemand E.ON prévoit le développement de 1000 km de lignes supplémentaires pour une capacité éolienne de 16000 MW pour un montant de 550 M€.

Le délai de renforcement d'un poste peut atteindre 5 ans et le délai de construction d'une nouvelle ligne peut atteindre 10 ans. De plus ces projets peuvent faire l'objet d'oppositions importantes de la part des populations [14].

I.8.2.3 Déconnexions intempestives

Les générateurs éoliens sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence. En effet, le couple électromagnétique va diminuer pendant le creux de tension et la turbine va accélérer. Ceci entraînera une surchauffe pouvant endommager la génératrice. Une procédure d'arrêt est nécessaire. Un creux de tension a pour conséquence une démagnétisation de la génératrice.

A la fin du défaut, lorsque la tension redevient normale, la génératrice peut se remagnétiser brutalement ce qui peut provoquer un appel de courant important ; d'où la protection en surintensité. Le fonctionnement de l'interface d'électronique de puissance sous-entend le contrôle de la tension au niveau du bus continu. Une protection en surtension doit être prévue. Pour ne pas endommager ses composants lors d'un défaut du réseau, l'éolienne coupera automatiquement la connexion au réseau et arrêtera la rotation du rotor immédiatement avec des freins [14].

I.8.3 Description des facteurs affectant la qualité énergétique

Le terme qualité de puissance fait référence à la stabilité de la tension ainsi qu'à la stabilité de la fréquence du réseau. L'objectif désiré étant un courant alternatif avec une forme sinusoïdale la plus idéale possible [14].

I.8.3.1 Fluctuation de tension

Le problème principal est le creux de tension dont l'origine est liée aux courts-circuits qui peuvent être provoqués par l'enclenchement de gros moteurs, d'appels de charges importantes, etc. Dans une moindre mesure, il y a des variations rapides de tension, provoquées par des variations rapides de puissance absorbées ou produites par des installations telles que les éoliennes. Ces fluctuations peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage gênant désigné par le terme flicker (ou papillotement). Les autres applications de l'électricité ne sont, normalement, pas affectées par ces phénomènes tant que la variation d'amplitude reste inférieure à 10% [14].

La chute de tension aux bornes de la ligne de connexion d'une éolienne au réseau peut être approximée par la relation suivante :

$$\Delta V = \frac{RP + QX}{V_{th}} \quad (I.1)$$

Où P et Q sont les puissances actives et réactives transitant par la ligne de résistance R et de réactance X.

Dans le cas des lignes THT, $X > 10R$, (I.1) peut se réduire à :

$$\Delta V = \frac{QX}{V_{th}} \quad (I.2)$$

I.8.3.2 Variation de la fréquence

La fréquence doit être maintenue autour de la valeur nominale de 50 Hz, quelles que soient les variations de consommation ou de production. En effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages. D'autre part, la plupart des composants du système électrique sont conçus pour fonctionner dans une plage de fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître.

Avec l'augmentation des fermes éoliennes connectées sur le réseau HT, les variations de puissances pourraient causer des variations de fréquence [14].

I.8.3.3 Harmoniques et inter-harmoniques

Les éoliennes, interfacées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance, génèrent malheureusement des harmoniques. Les convertisseurs équipés en grande majorité de transistors IGBT, génèrent des harmoniques haute fréquence (plusieurs kHz) mais, ces harmoniques peuvent être assez aisément limités contrairement aux convertisseurs équipés de thyristors générant des harmoniques de basse fréquence et nécessitant des filtres conséquents pour les éliminer [14].

I.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éoliens, la rentabilité d'une énergie éoliennes, les différentes génératrices et convertisseurs utilisées et enfin nous avons fait la description et l'impact sur le réseau et sur la qualité d'énergie dans les systèmes éoliens.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation d'ensemble turbine, machine, convertisseur.

A decorative horizontal border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and small circular details at the top corners.

Chapitre II

II.1 Introduction

Comme tout système, l'étude d'un ensemble turbine, machine et convertisseur s'appuie sur un modèle de représentation. Ainsi, la modélisation est primordiale pour l'étude et la commande de cet ensemble, suivant les buts visés, cette dernière pourra être plus ou moins complexe et précise. La recherche d'une très bonne précision mène souvent à des systèmes mathématiques relativement difficile à résoudre, ce qui nécessite des temps de calculs conséquents. En revanche, un modèle basé sur un nombre d'hypothèses simplificatrices requiert certes des temps de calculs limités mais aboutit dans la plupart des cas à une précision restreinte.

L'objectif de ce chapitre est la modélisation de l'ensemble turbine, machine et onduleur, où nous intéresserions à la machine asynchrone à cage d'écureuil, qui est la plus utilisée dans les systèmes éoliens.

II.2 Modélisation du système éolien

II.2.1 Introduction

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

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine de la figure I.15 [21].

II.2.2 Modélisation et principes de contrôle de la turbine

Un aérogénérateur est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

La puissance du vent captée par les pales est exprimée comme suit:

$$P_{vt} = \frac{\rho}{2} S v_{vt}^3 \quad (\text{II. 1})$$

Avec ρ : densité de l'air 1.225 kg/m^3 ; S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne ;
 v_{vt} : vitesse du vent.

La puissance du vent disponible n'est en réalité jamais totalement captée par les pales, d'où la puissance aérodynamique est toujours inférieure à celle du vent; dans le cas où l'angle de calage de pales est nul ($\beta = 0$), la puissance aérodynamique en fonction de la puissance du vent est obtenue selon le coefficient de puissance de l'éolienne:

$$P_{aer} = C_p(\lambda)P_{vt} \quad (\text{II. 2})$$

Le coefficient de puissance (C_p) est 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, qui est donné par la relation suivante:

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v_{vt}} \quad (\text{II. 3})$$

Où, Ω_t : vitesse angulaire de la turbine ; R : rayon des pales.

La variation du coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ) est représentée par la figure II.1

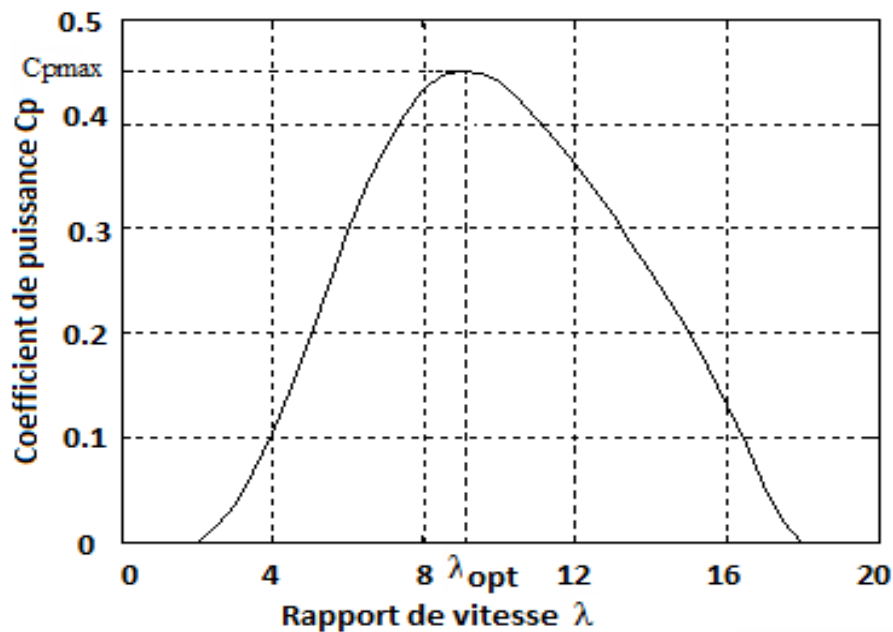


Figure II.1 Coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse (λ).

Le couple aérodynamique est donné par [22] :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = \frac{\rho}{2} C_p(\lambda) S v_{vt}^3 \frac{1}{\Omega_t} \quad (\text{II. 4})$$

La vitesse mécanique de rotation de la turbine (avant le multiplicateur) et celle de rotation de l'arbre de la génératrice électrique (après le multiplicateur) sont exprimées par l'expression suivante:

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{K} \quad (\text{II. 5})$$

Avec K : rapport du multiplicateur de vitesse.

Les couples sur l'arbre lent C_{aer} et sur l'arbre rapide C_{arb} sont exprimés par la relation suivante:

$$C_{arb} = \frac{C_{aer}}{K} \quad (\text{II. 6})$$

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie $J_{turbine}$. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante [23]:

$$J = \frac{J_{turbine}}{K^2} + J_g \quad (\text{II. 7})$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum C = C_{mec} \quad (\text{II. 8})$$

Le couple mécanique est en fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} , et du couple issu du multiplicateur C_{arb} .

$$C_{mec} = C_{arb} - C_{em} - C_{visq} \quad (\text{II. 9})$$

Le couple visqueux est donné par la formule suivante :

$$C_{visq} = f \Omega_{mec} \quad (\text{II. 10})$$

Où f : coefficient de frottement visqueux.

Après quelques manipulations des équations (II.8) – (II.10), on aura:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} = C_{arb} - C_{em} \quad (\text{II. 11})$$

A partir des équations précédentes, on établit le schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine représenté par la figure II.2.

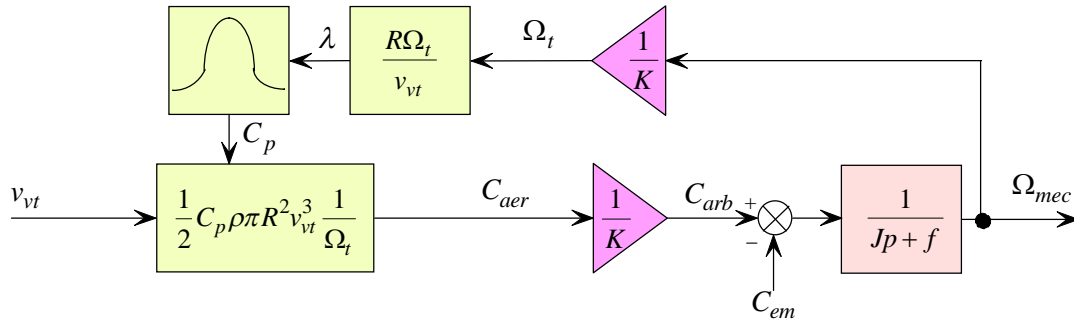


Figure II.2 Schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine.

Le schéma bloc nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

La vitesse du vent est variable dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. Ceci est réalisé en utilisant la technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT).

La vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondant à λ_{opt} et $\beta = 0^\circ$, (voir figure II.1), on la détermine à partir de la vitesse du vent mesurée, et en la multipliant par la valeur du gain du multiplicateur on aura la vitesse mécanique du rotor de la MAS, qui sera utilisé comme grandeur de référence pour la régulation, qui élaborera à son tour la consigne de commande convenant au couple électromagnétique que devrait développer la machine pour passer à la vitesse optimale. Le couple issu de la régulation de vitesse, sera utilisé comme grandeur de référence du couple dans la structure fonctionnelle du modèle de la turbine (figure II.2).

En remplaçant le coefficient de puissance C_P par C_{Pmax} et λ par λ_{opt} dans l'expression de la puissance aérodynamique (II.2), on aura l'expression de la puissance mécanique suivante :

$$P_{mec} = -\frac{1}{2} C_{Pmax} \frac{\rho \pi R^5}{K^3 \lambda_{opt}^3} \Omega_{mec}^3 \quad (\text{II. 12})$$

Le signe négatif (-) est utilisé pour dire que la puissance est générée.

II.2.3 Modélisation de la machine asynchrone

Un aperçu sur la description et le principe de fonctionnement, le modèle biphasé basé sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement (direct et quadratique) seront décrits.

II.2.3.1 Principe de fonctionnement

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques, à « p » paire de pôle ; leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi/3$. Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et à amplitude réglables [24].

La figure II.3 représente schématiquement les enroulements de la MAS, où l'angle θ_r représente la position du rotor (phase a_r) par rapport au stator (phase a_s).

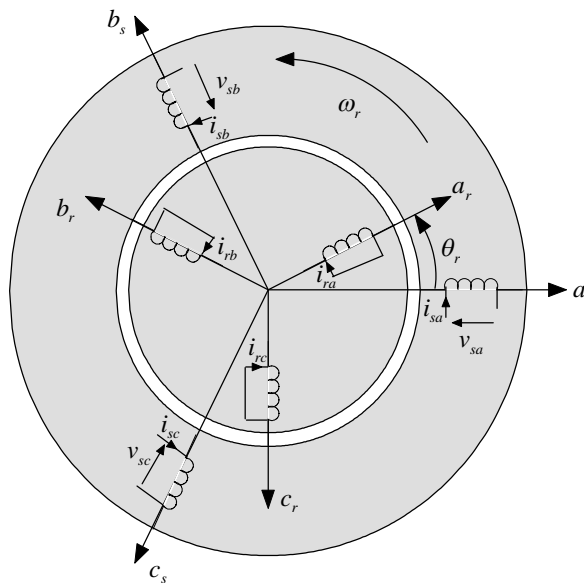


Figure II.3 Représentation schématique des enroulements de la MAS

II.2.3.2 Hypothèses simplificatrices

La MAS avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Cependant le modèle que nous adopterons tient compte des hypothèses simplificatrices suivantes [25] :

- l'entrefer est d'épaisseur uniforme;

- l'effet d'encochage est négligeable;
- force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale;
- machine de construction symétrique;
- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

II.2.3.3 Modèle triphasé du moteur asynchrone

II.2.3.3.1 Equations électriques

Les équations électriques des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent [26]:

- **Au stator**

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

- **Au rotor**

$$\begin{cases} v_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} = 0 \\ v_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} = 0 \\ v_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Soit on écriture matricielle :

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \\ [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec:

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}.$$

R_s, R_r : Résistance par phase statorique et rotorique;

$[v_s], [v_r]$: Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques;

$[\phi_s], [\phi_r]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques;

$[i_s], [i_r]$: Vecteurs des courants des phases statoriques et rotoriques.

II.2.3.3.2 Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants. L'écriture matricielle ci-dessous résume les équations des flux statoriques :

$$[\phi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \quad (\text{II.16})$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & M_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & M_{cc} \end{bmatrix}.$$

De façon similaire, on aura les équations des flux rotoriques :

$$[\phi_r] = [L_r][i_r] + [M_{rs}][i_s] \quad (\text{II.17})$$

Où :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}; [M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ba} & M_{ca} \\ M_{ab} & M_{bb} & M_{cb} \\ M_{ac} & M_{bc} & M_{cc} \end{bmatrix}$$

Et

L_s : Inductance propre d'une phase statoriques;

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique;

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques;

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotorique ;

$M_{sr} = M_{rs}$: Inductance mutuelle entre phase a du stator et a du rotor.

Pour l'ensemble stator et rotor, on écrira en notation matricielle :

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La matrice d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor est donnée par :

$$[M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

M : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

II.2.3.3.3 Equation mécanique

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par [27] :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{II.20})$$

Avec:

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad (\text{II.21})$$

D'autre part:

$$\omega_r = (d\theta_r)/dt \quad (\text{II.22})$$

II.2.3.4 Modèle biphasé de la MAS

II.2.3.4.1 Transformation de Park

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement, avec la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales, pour cela on applique les matrices de passage de Park directe et inverse suivantes [28] :

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

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Avec:

$\theta = \theta_s$: Grandeurs statoriques; $\theta = \theta_r$: Grandeurs rotoriques.

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est donné par la transformation suivante:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix}.$$

X: tension, courant ou flux; o: indice de l'axe homopolaire.

II.2.3.4.2 Modèle de la MAS selon le système d'axes généralisé (u, v)

La figure II.4 représente le modèle généralisé de la MAS selon le système d'axe (u, v) tournant à la vitesse ω_{coor} [27].

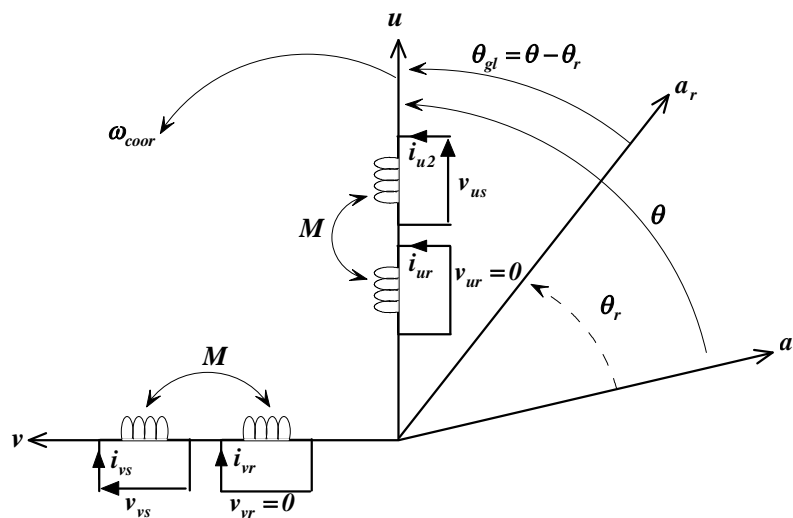


Figure II.4 Représentation du modèle généralisé de la MAS selon les axes (u, v)

Avec $\theta = \int_0^t \omega_{coor} dt$: Angle entre les systèmes d'axes biphasé et triphasé ; ω_{coor} : Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé.

Les systèmes d'équations différentielles de la MAS selon (u, v) tournant à la vitesse ω_{coor} sont :

II.2.3.4.2.1 Système d'équations électriques

$$\begin{cases} v_{us} = R_s i_{us} + \frac{d}{dt} \phi_{us} - \omega_{coor} \phi_{vs} \\ v_{vs} = R_s i_{vs} + \frac{d}{dt} \phi_{vs} + \omega_{coor} \phi_{us} \\ v_{ur} = R_r i_{ur} + \frac{d}{dt} \phi_{ur} - (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{vr} \\ v_{vr} = R_r i_{vr} + \frac{d}{dt} \phi_{vr} + (\omega_{coor} - \omega_r) \phi_{ur} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.2.3.4.2.2 Système d'équations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{us} = L_s i_{us} + M i_{ur} \\ \phi_{vs} = L_s i_{vs} + M i_{vr} \\ \phi_{ur} = L_r i_{ur} + M i_{us} \\ \phi_{vr} = L_r i_{vr} + M i_{vs} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.2.3.4.3 Choix du système d'axes

II.2.3.4.3.1 Système d'axes (α, β)

Ce système est immobile par rapport au stator, alors :

$$\omega_{coor} = 0 \quad \Longrightarrow \quad \theta = 0$$

II.2.3.4.3.2 Système d'axes (x, y)

Celui-ci est immobile par rapport au rotor, d'où :

$$\omega_{coor} = \omega_r \quad \Longrightarrow \quad \theta = \int_0^t \omega_r dt$$

II.2.3.4.3.3 Système d'axes (d, q)

Ce dernier est immobile par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, donc :

$$\omega_{coor} = \omega_s \quad \Longrightarrow \quad \theta = \int_0^t \omega_s dt$$

II.2.3.5 Modèle biphasé de la machine lié au système d'axes (d, q)

En remplaçant dans les systèmes d'équations (II.25) et (II.26) ω_{coor} par ω_s et les indices (u, v) par (d, q), on obtient :

II.2.3.5.1 Equations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

II.2.3.5.2 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En introduisant le système d'équations (II.28) dans (II.27), et en posant $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$ et $p = \frac{d}{dt}$, on trouve :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s p i_{ds} + M p i_{dr} - \omega_s (L_s i_{qs} + M i_{qr}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s p i_{qs} + M p i_{qr} + \omega_s (L_s i_{ds} + M i_{dr}) \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r p i_{dr} + M p i_{ds} - \omega_{gl} (L_r i_{qr} + M i_{qs}) \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r p i_{qr} + M p i_{qs} + \omega_{gl} (L_r i_{dr} + M i_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

L'écriture sous forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_{gl} M & R_r & -\omega_{gl} L_r \\ \omega_{gl} M & 0 & \omega_{gl} L_s & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}.$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} - \omega_{gl} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

En mettant le système (II.29) sous forme d'équation d'état, on trouve:

$$[\dot{I}] = [L]^{-1} \{ [B][U] - \omega_{gl} [C][I] - [D][I] \} \quad (\text{II.30})$$

Tel que :

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [U] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}; [I] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}; [i] = p[I]; [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \\ M & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

II.2.3.5.3 Puissance absorbée et couple électromagnétique

La puissance absorbée par le MAS selon le système d'axes (d, q) , tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par [25] :

$$P_a = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant les tensions v_{ds} et v_{qs} par leurs expressions (II.27) dans (II.31), on aura :

$$P_a = \{R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)\} + \left\{i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt}\right\} + \{\omega_s(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds})\} \quad (\text{II.32})$$

L'expression (II.32) se compose de trois termes :

- le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;
- le second représente la variation de l'énergie électromagnétique ;
- le dernier terme est la puissance électromagnétique (P_{em}).

Sachant que :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = P \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.33})$$

Alors, l'expression de couple électromagnétique est égale à :

$$C_{em} = P(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.34})$$

En remplaçant les flux (ϕ_{ds}, ϕ_{qs}) donnés par la relation (II.28) dans la relation (II.34) on obtient :

$$C_{em} = PM(i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.35})$$

En substituant les courants rotoriques par leurs expressions (II.28) :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.36})$$

II.2.4 Modélisation de l'onduleur de tension

II.2.4.1 Introduction

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

L'onduleur est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante :

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases}$$

Avec :

$$f_i + \bar{f}_i = 1 \text{ et } i = 1 \dots 3.$$

La figure II.5 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

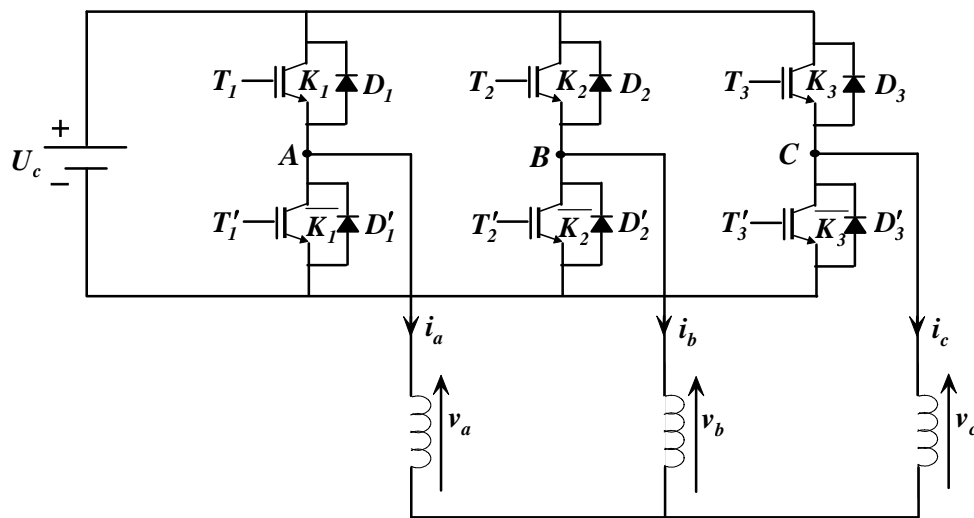


Figure II.5 Onduleur triphasé à deux niveaux

Les tensions composées sont :

$$u_{AB} = v_a - v_b = U_c(f_1 - f_2) \quad (\text{II. 37})$$

$$u_{BC} = v_b - v_c = U_c(f_2 - f_3) \quad (\text{II. 38})$$

$$u_{CA} = v_c - v_a = U_c(f_3 - f_1) \quad (\text{II. 39})$$

Les tensions simples v_a , v_b et v_c forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{II. 40})$$

La résolution des équations (37) – (40) nous donne :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 41})$$

II.2.4.2 Commande par modulation sinus-triangle

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$v_{aréf} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft) \quad (\text{II. 42})$$

$$v_{bréf} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II. 43})$$

$$v_{créf} = \sqrt{2}v_{eff} \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II. 44})$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm}[4(t/T_p) - 1] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm}[-4(t/T_p) + 3] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f) ;
2. Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence ($V_m = \sqrt{2}v_{eff}$) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_{pm}).

II.3 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de la modélisation de l'aérogénérateur à base de la machine asynchrone triphasé à cage connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs MLI (redresseur et onduleur par l'intermédiaire d'un bus continu), et nous avons vu que GAS triphasé a été ramenée à une génératrice biphasé équivalente à l'aide d'une transformation de

Park, cette transformation a fait l'élaboration d'un modèle mathématique basé sur la théorie unifiée des machines électriques, tout en adoptant certaines hypothèses simplificatrices.

Afin de permettre l'établissement de ce modèle un repère biphasé a été choisi rendant possible une simplification nécessaire pour la réalisation de la commande.

Le chapitre suivant sera dédié à la commande par mode de glissement d'un système éolien à vitesse variable basé sur la GAS piloté par le stator.



Chapitre III

III.1 Introduction

La commande vectorielle avec les algorithmes de réglage classiques, tels que les régulateurs PI, peut s'avérer suffisante si les exigences sur la précision et les performances des systèmes ne sont pas trop strictes. Néanmoins, dans le cas contraire et particulièrement lorsque la partie commandée est soumise à de forte non linéarités et à des variations temporelles, il faut concevoir des algorithmes de commande assurant la robustesse du processus vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et leurs variations. Dans ce contexte, ce chapitre traite l'application d'une commande occupant une importante place parmi les commandes robustes, connue par son adaptation aux changements paramétriques et par sa stabilité, nommée commande par mode de glissement, d'un système éolien basé sur la GAS piloté par le stator et connecté au réseau électrique [25].

III.2 Principe de la commande par mode de glissement

Un système à structure variable est un système dont la structure change durant son fonctionnement [2]. La commande de tels systèmes par mode de glissement a en général deux modes de fonctionnement (figure III.1) :

- ❖ Le mode non glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC).
- ❖ Le mode glissant (sliding mode).

Ainsi, la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini, (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant [25].

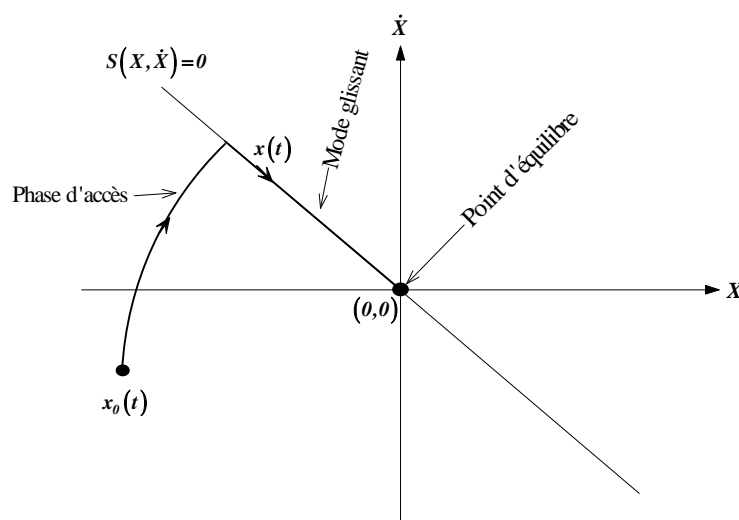


Fig III.1 Mode de fonctionnement dans le plan de phase

III.3 Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement

La conception de la commande par mode de glissement 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 [30] :

- ❖ Choix des surfaces de glissement ;
- ❖ Définition des conditions d'existence et de convergence du régime glissant ;
- ❖ Détermination de la loi de commande.

III.3.1 Choix des surfaces de glissement

On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.1})$$

Où : $[X] \in R^n$ est le vecteur d'état, $[U] \in R^m$ le vecteur de commande, avec $n > m$.

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x^* , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante [31]:

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.2})$$

Avec : λ : gain positif ; $e(x) = x^* - x$: écart de la variable à réguler ; r : degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande, tel que : $\frac{\partial s}{\partial x} \neq 0$ assurant la contrôlabilité ; $S(x)$: est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse $e(x)$ tend vers zéro pour un choix correct du gain λ et c'est l'objectif de la commande.

III.3.2 Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. On présente deux types d'approches qui sont [32] :

Approche directe

Cette approche est la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. Elle est donnée sous la forme [32] :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.3})$$

Approche de Lyapunov

Il s'agit de choisir une fonction candidate de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction $\dot{V}(x) < 0$.

En définissant par exemple une fonction candidate de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2}S^2(x) \quad (\text{III.4})$$

En dérivant cette dernière on obtient :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.5})$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III.6})$$

Cette approche est utilisée pour estimer les performances de la commande, l'étude de la robustesse et de la stabilité des systèmes non linéaires [33].

III.3.3 Détermination de la loi de commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminé indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (U_{eq}) et l'autre la stabilité (U_n).

$$U = U_{eq} + U_n \quad (\text{III.7})$$

U_{eq} : Correspond à la commande proposée par Filipov. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x) = 0$. La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$.

La commande discrète U_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système [32].

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état (III.1). On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande U .

La dérivée de la surface $S(x)$ est :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant (III.1) et (III.7) dans (III.8), on trouve:

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} \{ [A][X] + [B]U_{eq} \} + \frac{\partial S}{\partial t} [B]U_n \quad (\text{III.9})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente.

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [A][X] \right\} \quad (\text{III.10})$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial S}{\partial X} [B] \neq 0 \quad (\text{III.11})$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (III.9), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \quad (\text{III.12})$$

et la condition d'attractivité $S(x)\dot{S}(x) < 0$ devient :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n < 0 \quad (\text{III.13})$$

Afin de satisfaire la condition, le signe de U_n doit être opposé à celui de $S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B]$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction *sign* (figure III.2).

$$U_n = K_x \text{sign } S(x) \quad (\text{III.14})$$

Le signe de K_x doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial X} [B]$.

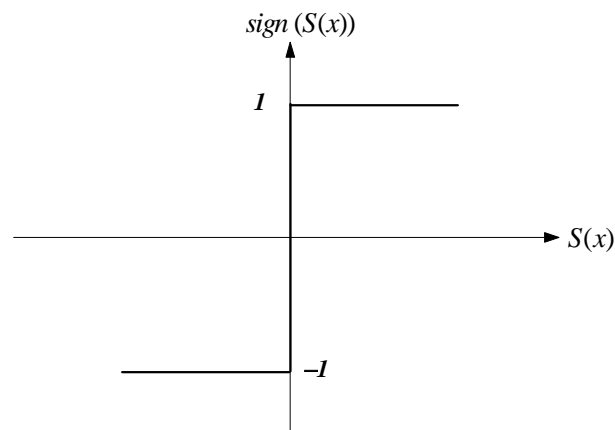


Fig III.2 Fonction sign (non linéarité tout ou rien)

Cependant, cette dernière génère sur la surface de glissement, un phénomène appelé broutement (ou chattering en anglais), qui est en général indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composantes de hautes fréquences. La figure III.3 représente le phénomène broutement [25].

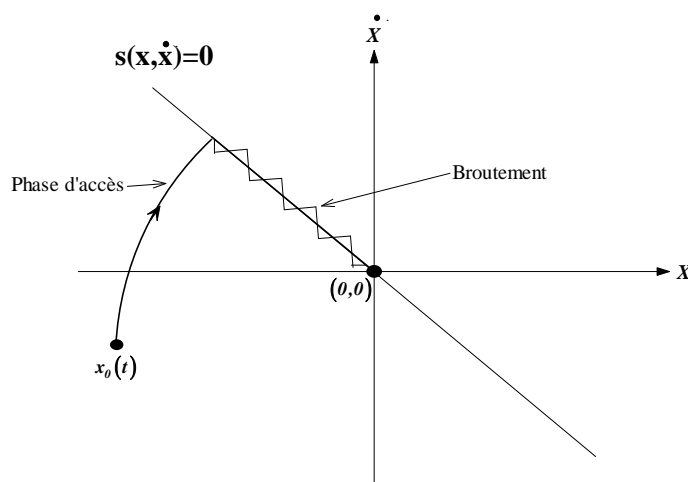


Fig III.3 Phénomène de broutement

Néanmoins, le broutement peut être réduit (ou éliminé) en remplaçant la fonction *sign* par une fonction de saturation adéquate qui filtre ces hautes fréquences. On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation (figure III.4).

$$\begin{aligned} \text{sat}(S(x)) &= 1 \quad \text{si } S(x) > \varepsilon \\ \text{sat}(S(x)) &= -1 \quad \text{si } S(x) < -\varepsilon \\ \text{sat}(S(x)) &= \frac{S(x)}{\varepsilon} \quad \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{aligned}$$

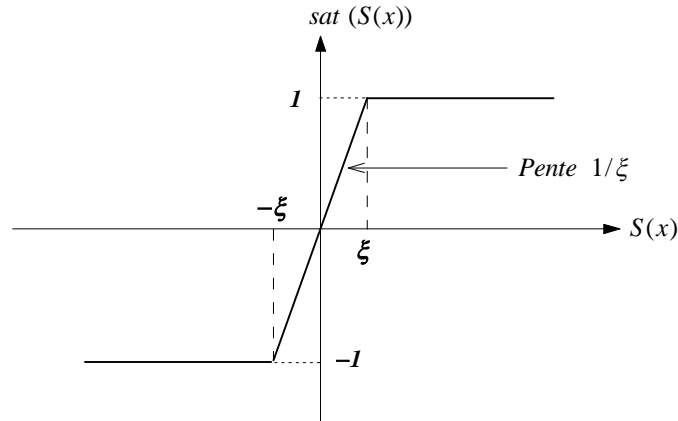


Fig III.4 Fonction de saturation ($\varepsilon > 0$ et petit)

Alors, on obtient la commande douce suivante :

$$U_n = \begin{cases} K_x \text{sign } S(x) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \\ \frac{K_x}{\varepsilon} \text{sign } S(x) & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (\text{III. 15})$$

On peut aussi la remplacer par une fonction de classe C^1 On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction (figure III.5).

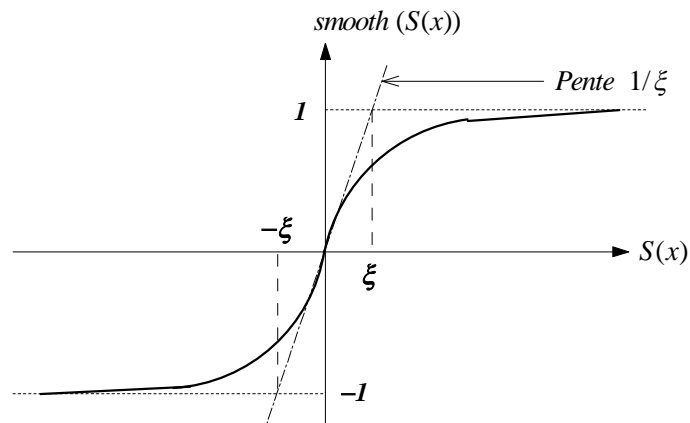


Fig III.5 Fonction de classe C^1 ($\varepsilon < 0$ et petit)

$$smooth S(x) = \tanh(S(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} \quad (\text{III. 16})$$

D'où, on aura la commande douce suivante :

$$U_n = K_x \frac{S(x)}{|S(x)| + \varepsilon} \quad (\text{III. 17})$$

III.4 Orientation du flux rotorique

En considérant comme grandeur de référence la vitesse Ω_{mec}^* , et en exprimant que :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \phi_r^* \\ \phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (III. 18)$$

En remplaçant (III.18) dans (II.27) et (II.28), on aura :

$$C_{em}^* = P \frac{L_m}{L_r} \phi_r^* i_{qs} \quad (III. 19)$$

$$\begin{cases} R_r i_{dr} = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0 \\ R_r i_{qr} + \omega_{gl}^* \phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{\omega_{gl}^* \phi_r^*}{R_r} \end{cases} \quad (III. 20)$$

A partir des équations des flux rotoriques (II.26), on aura :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\phi_{dr} - L_m i_{ds}) \quad (III. 21)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} (\phi_{qr} - L_m i_{qs}) \quad (III. 22)$$

En remplaçant (III.18) dans (III.21) et (III.23), on trouve :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\phi_r^* - L_m i_{ds}) \quad (III. 23)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (III. 24)$$

En introduisant (III.23) et (III.24) dans les équations des flux statorique (II.26), on aura :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} (\phi_r^* - L_m i_{ds}) \quad (III. 25)$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} - \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} \quad (III. 26)$$

En substituant (III.20) dans (III.21), on obtient :

$$\phi_r^* = L_m i_{ds} \quad (III. 27)$$

Et à partir de l'équation (III.24) :

$$L_m i_{qs} = -L_r i_{qr} \quad (\text{III. 28})$$

En remplaçant (III.25) et (III.26) dans (II.25), on trouve :

$$v_{ds}^* = R_s i_{ds} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) p i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} p \phi_r^* - \omega_s^* \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qs} \quad (\text{III. 29})$$

$$v_{qs}^* = R_s i_{qs} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) p i_{qs} + \omega_s^* \left[\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \phi_r^* \right] \quad (\text{III. 30})$$

On pose $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \Rightarrow L_s - \frac{L_m^2}{L_r} L_s \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \right) = L_s \sigma$.

Puisque $\phi_{dr} = \phi_r^*$ et $p\phi_{dr} = 0 \Rightarrow p\phi_r^* = 0$, alors :

$$v_{ds}^* = R_s i_{ds} + L_s \sigma p i_{ds} - L_s \sigma \omega_s^* i_{qs} \quad (\text{III. 31})$$

$$v_{qs}^* = R_s i_{qs} + L_s \sigma p i_{qs} + L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \quad (\text{III. 32})$$

L'équation mécanique est :

$$J p \Omega_{mec} = C_{em}^* - C_{arb} - f \Omega_{mec} \quad (\text{III. 33})$$

D'après (II.26) et (II.30)

$$p\phi_r = -\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} \quad (\text{III. 34})$$

En réarrangeant les équations précédentes, on tire le système d'équation d'état suivant :

$$\begin{cases} p i_{ds} = \frac{1}{L_s \sigma} (v_{ds}^* - R_s i_{ds} + L_s \sigma \omega_s^* i_{qs}) \\ p i_{qs} = \frac{1}{L_s \sigma} (v_{qs}^* - R_s i_{qs} - L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^*) \\ p \Omega_{mec} = \frac{1}{J} (C_{em}^* - C_{arb} - f \Omega_{mec}) \\ p \phi_r = -\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 35})$$

III.4.1 Surface de régulation de la vitesse

La surface de régulation de la vitesse dont le degré relatif $r = 1$ est de la forme :

$$S(\Omega_{mec}) = \Omega_{mec}^* - \Omega_{mec} \quad (\text{III. 36})$$

En dérivant la surface $S(\Omega_{mec})$, on obtient :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - p\Omega_{mec}$$

D'où :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - \frac{1}{J}(C_{em}^* - C_{arb} - f\Omega_{mec})$$

En remplaçant le C_{em}^* par son expression (III.19), on trouve :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - \frac{1}{J}\left(P \frac{L_m}{L_r} \phi_r^* i_{qs} - C_{arb} - f\Omega_{mec}\right) \quad (\text{III. 37})$$

A présent, en remplaçant le courant i_{qs} par le courant de commande $i_{qs}^* = i_{qseq} + i_{qsn}$ dans l'équation (III.37), on aura :

$$pS(\Omega_{mec}) = p\Omega_{mec}^* - \frac{P L_m}{J L_r} \phi_r^* i_{qseq} - \frac{P L_m}{J L_r} \phi_r^* i_{qsn} + \frac{C_{arb}}{J} + \frac{f}{J} \Omega_{mec} \quad (\text{III. 38})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a $S(\Omega_{mec}) = 0$ et par conséquent $pS(\Omega_{mec}) = 0$ et $i_{qsn} = 0$, d'où on tire la formule de la commande équivalente à partir de la relation (III.38) :

$$i_{qseq} = \frac{J L_r}{P L_m \phi_r^*} \left(p\Omega_{mec}^* + \frac{C_{arb}}{J} + \frac{f}{J} \Omega_{mec} \right) \quad (\text{III. 39})$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(\Omega_{mec}) pS(\Omega_{mec}) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant (III.39) dans (III.38), on obtient :

$$pS(\Omega_{mec}) = - \frac{P L_m}{J L_r} \phi_r^* i_{qsn} \quad (\text{III. 40})$$

On prend la commande douce suivante :

$$i_{qsn} = K_\Omega \frac{S(\Omega_{mec})}{|S(\Omega_{mec})| + \varepsilon_\Omega} \quad (\text{III. 41})$$

III.4.2 Surface de régulation du flux rotorique

Prenant la même surface que celle de la vitesse :

$$S(\phi_r) = \phi_r^* - \phi_r \quad (\text{III. 42})$$

D'où :

$$pS(\phi_r) = p\phi_r^* - p\phi_r \quad (\text{III. 43})$$

Substituant l'équation de $p\phi_r$ (système d'équations (III.35)) dans (III.43), on trouve :

$$pS(\phi_r) = p\phi_r^* + \frac{R_r}{L_r} \phi_r - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{ds} \quad (\text{III. 44})$$

En introduisant le courant de commande $i_{ds}^* = i_{dseq} + i_{dsn}$ dans l'équation (III.44), on aura :

$$pS(\phi_r) = p\phi_r^* + \frac{R_r}{L_r} \phi_r - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{dseq} - \frac{R_r}{L_r} L_m i_{dsn} \quad (\text{III. 45})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, on a $S(\phi_r) = 0$ et par conséquent $pS(\phi_r) = 0$ et $i_{dsn} = 0$, d'où on tire i_{dseq} de la relation (III.45) :

$$i_{dseq} = \frac{L_r}{R_r L_m} \left(p\phi_r^* + \frac{R_r}{L_r} \phi_r \right) \quad (\text{III. 46})$$

Durant le mode de convergence, la condition $S(\phi_r) pS(\phi_r) < 0$ doit être vérifiée. En remplaçant (III.46) dans (III.45), on obtient :

$$pS(\phi_r) = -\frac{R_r}{L_r} L_m i_{dsn} \quad (\text{III. 47})$$

On considère la commande non linéaire suivante :

$$i_{dsn} = K_{\phi_r} \frac{S(\phi_r)}{|S(\phi_r)| + \varepsilon_{\phi_r}} \quad (\text{III. 48})$$

III.4.3 Surface de régulation des courants statoriques

On prend les surfaces suivantes :

$$S(i_{ds}) = i_{ds}^* - i_{ds} \quad (\text{III. 49})$$

$$S(i_{qs}) = i_{qs}^* - i_{qs} \quad (\text{III. 50})$$

Les dérivées de ces dernières sont respectivement :

$$pS(i_{ds}) = pi_{ds}^* - pi_{ds} \quad (\text{III. 51})$$

$$pS(i_{qs}) = pi_{qs}^* - pi_{qs} \quad (\text{III. 52})$$

En substituant les expressions des courants pi_{sd} et pi_{sq} données par le système d'équations (III.35) dans les équations précédentes, on obtient :

$$pS(i_{ds}) = pi_{ds}^* - \frac{1}{L_s \sigma} (v_{ds}^* - R_s i_{ds} + L_s \sigma \omega_s^* i_{qs}) \quad (\text{III. 53})$$

$$pS(i_{qs}) = pi_{qs}^* - \frac{1}{L_s \sigma} \left(v_{qs}^* - R_s i_{qs} - L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \right) \quad (\text{III. 54})$$

En remplaçant les tensions v_{ds} et v_{qs} par les tensions de commande $v_{ds}^* = v_{dseq} + v_{dsn}$ et $v_{qs}^* = v_{sqeq} + v_{qsn}$, on aura :

$$pS(i_{ds}) = pi_{ds}^* - \frac{1}{L_s \sigma} (v_{dseq} + v_{dsn} - R_s i_{ds} + L_s \sigma \omega_s^* i_{qs}) \quad (\text{III. 55})$$

$$pS(i_{qs}) = pi_{qs}^* - \frac{1}{L_s \sigma} \left(v_{sqeq} + v_{qsn} - R_s i_{qs} - L_s \sigma \omega_s^* i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \right) \quad (\text{III. 56})$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, les conditions $S(i_{ds}) = 0$ et $S(i_{qs}) = 0$ et par suite $pS(i_{ds}) = 0$, $S(i_{qs}) = 0$, $v_{qsn} = 0$ et $v_{dsn} = 0$. Alors, on tire à partir des équations (III.55) et (III.56), les expressions des commandes équivalentes v_{dseq} et v_{sqeq} respectivement :

$$v_{dseq} = \sigma L_s \left[pi_{ds}^* + \frac{1}{\sigma L_s} R_s i_{ds} - \omega_s^* i_{qs} \right] \quad (\text{III. 57})$$

$$v_{sqeq} = \sigma L_s pi_{qs}^* + R_s i_{qs} + \sigma L_s \omega_s^* i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s^* \phi_r^* \quad (\text{III. 58})$$

Durant le mode de convergence, les conditions $S(i_{ds}).pS(i_{ds}) < 0$ et $S(i_{qs}).pS(i_{qs}) < 0$, doivent être vérifiées. En substituant les équations (III.57) et (III.58) dans (III.55) et (III.56), les expressions des commandes douces v_{dsn} et v_{qsn} respectivement, on aura :

$$pS(i_{ds}) = -\frac{1}{L_s \sigma} v_{dsn} \quad (\text{III. 59})$$

$$pS(i_{qs}) = -\frac{1}{L_s\sigma} v_{qsn} \quad (\text{III. 60})$$

On prend :

$$v_{dsn} = K_{ds} \frac{S(i_{ds})}{|S(i_{ds})| + \varepsilon_{ds}} \quad (\text{III. 61})$$

$$v_{qsn} = K_{qs} \frac{S(i_{qs})}{|S(i_{qs})| + \varepsilon_{qs}} \quad (\text{III. 62})$$

D'après le système d'équations (III.20),

$$\omega_{gl}^* = \frac{-i_{qr}R_r}{\phi_r^*} \quad (\text{III. 63})$$

Les équations (III.18), (III.20) et (III.22) donnent :

$$\omega_{gl}^* = \frac{R_r}{\phi_r^*} \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (\text{III. 64})$$

On note que : $\omega_s^* = \omega_{gl}^* + \omega_r$.

La représentation schématique de la commande par mode de glissement associée à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS dédiée au système éolien à vitesse variable est illustrée par la figure III.6.

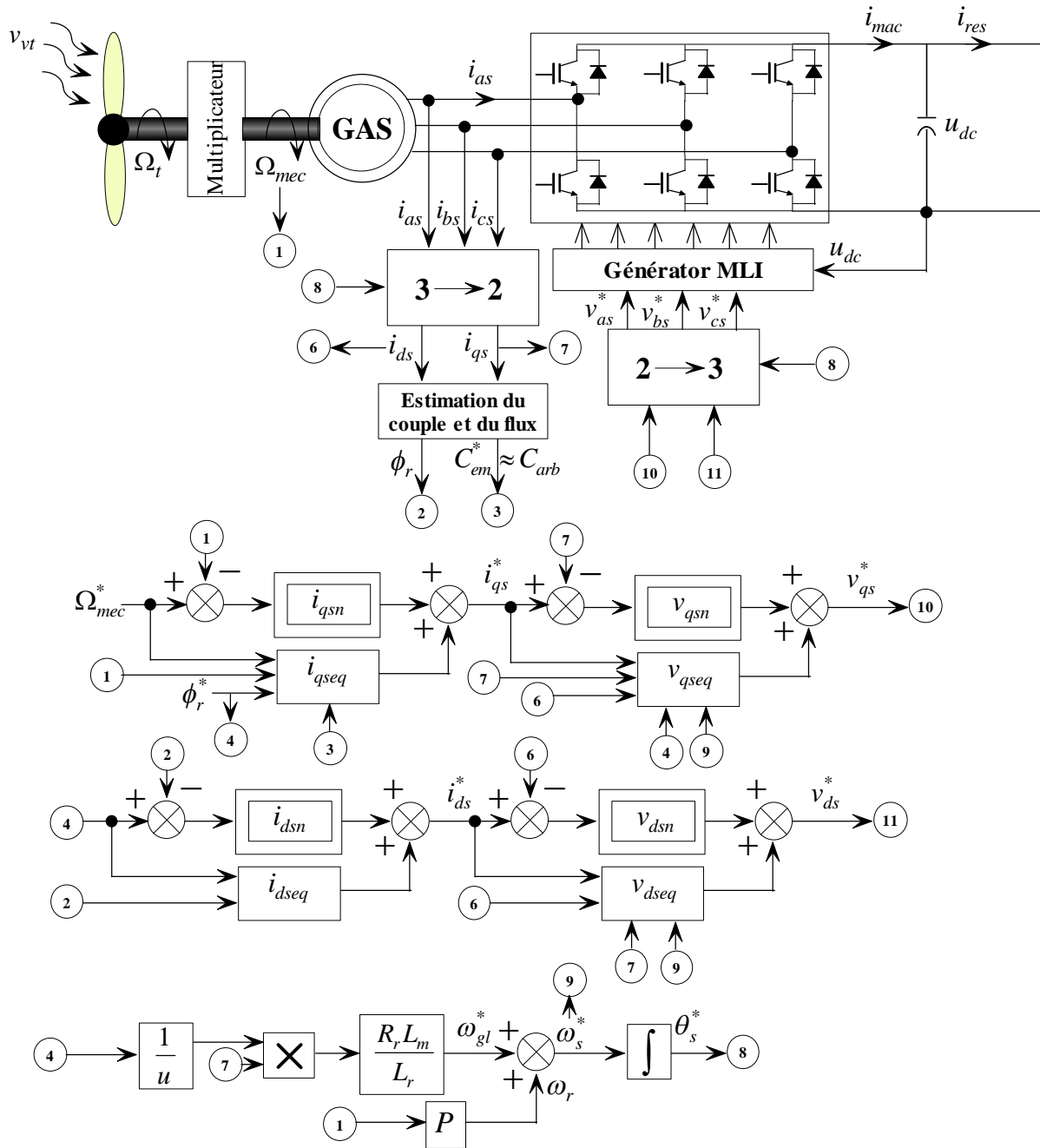


Fig III.6 Schéma bloc de la commande par mode de glissement associée à la commande vectorielle à flux rotorique orienté de la GAS.

III.5 Contrôle de la liaison au réseau

La topologie du convertisseur MLI2 (situé entre le bus continu et le filtre (voir figure I.15)) permet de générer et également d'appeler un courant provenant du réseau. L'objectif du convertisseur relié au réseau électrique est de maintenir la tension du bus continu constante quelque soit l'amplitude et le sens de la puissance. Ce dernier est commandé de manière à contrôler les courants transités par le filtre. A partir de la mesure de la tension du bus continu, le convertisseur est commandé de façon à imposer des références aux tensions simples.

La tension du bus continu est définie par la relation suivante :

$$\frac{du_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{mac} - i_{res}) \quad (\text{III. 65})$$

Où, C est la capacité du bus continu.

La puissance active de référence injectée au réseau est exprimée par la formule suivante :

$$P^* = u_{dc}^* i_{ond}^* \quad (\text{III. 66})$$

Avec :

$$i_{ond}^* = i_{mac} - i_{mac}^* \quad (\text{III. 67})$$

et,

$$i_{mac}^* = \text{PI}(u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (\text{III. 68})$$

Les expressions des courants de références en fonctions des puissances active et réactive de références et des tensions du réseau mesurées sont donnés dans le repère de Park (d, q) comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{fd}^* \\ i_{fq}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_d^2 + v_q^2} \begin{bmatrix} P^* & Q^* \\ -Q^* & P^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 69})$$

Afin de maintenir le facteur de puissance du réseau unitaire, la puissance réactive de référence injectée au réseau est fixée à une valeur nulle.

Les tensions de référence sont exprimées selon les axes (d, q) par :

$$\begin{cases} v_{md}^* = v_d^* + v_d - \omega_s L_f i_{fq} \\ v_{mq}^* = v_q^* + v_d + \omega_s L_f i_{fd} \end{cases} \quad (\text{III. 70})$$

Avec :

$$\begin{cases} v_d^* = \text{PI}(i_{fd}^* - i_{fd}) \\ v_q^* = \text{PI}(i_{fq}^* - i_{fq}) \end{cases} \quad (\text{III. 71})$$

Les puissances active et réactive échangées avec le réseau sont :

$$\begin{cases} P = v_d i_d + v_q i_q \\ Q = v_q i_d - v_d i_q \end{cases} \quad (\text{III. 72})$$

En négligeant les pertes dans le condensateur, dans le convertisseur et dans le filtre, la représentation sous forme d'un schéma bloc du dispositif de commande est donnée sur la figure III.7.

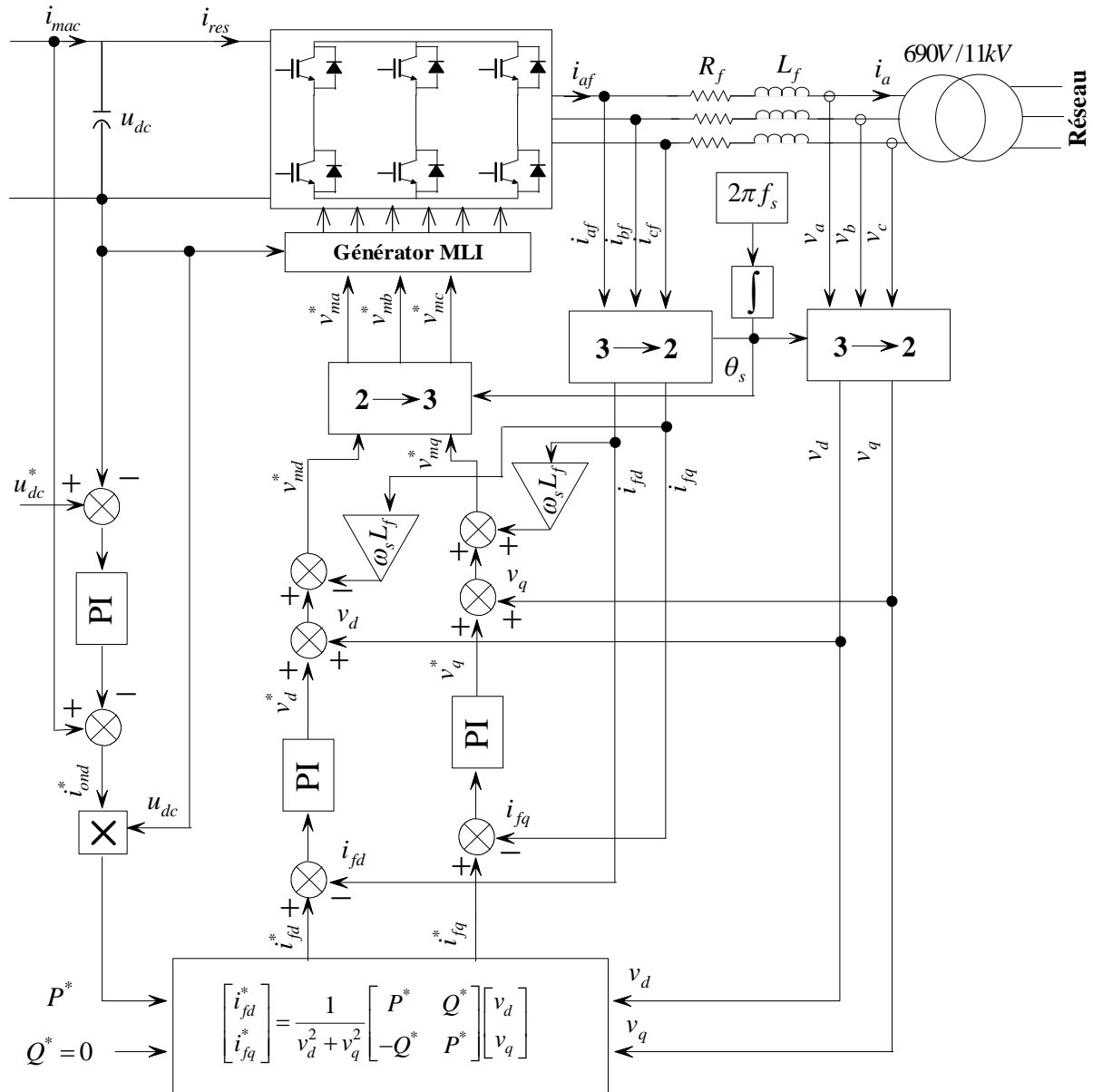


Fig III.7 Schéma bloc représentatif du contrôle de la liaison au réseau.

Le couplage des deux convertisseurs MLI est fait par l'intermédiaire du bus continu. En se basant sur les équations du dimensionnement du bus continu, dont les démonstrations sont données par [29], on calcule la tension nécessaire à partir des relations suivantes :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_{max}^2 X^2}{9v_{eff}^4} + 1} \quad (III.73)$$

$$u_{dc} = \alpha v_{eff} 2\sqrt{2} \quad (III.74)$$

Dans notre cas, la puissance maximale est de $1.5MW$, la tension simple efficace est égale à $690V$ et l'impédance de la self de lissage de $1mH$ à comme valeur de réactance $X = 0.314\Omega$.

Après tout calcul fait, on trouve : $u_{dc} = 1950V$.

III.6 Résultats et interprétations

Dans cette partie, les résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie basée sur la génératrice asynchrone à cage pilotée par le stator (dont les paramètres sont fournis à l'annexe), obtenus sous Matlab/Simulink sont représentés et commentés.

La vitesse mécanique ainsi que sa référence de la génératrice asynchrone à cage sont représentées par la figure III.8. Il est à noter que le profil du vent est choisi de façon à obtenir les différentes performances de la chaîne de conversion de l'énergie, pour des vitesses inférieures et supérieures à la vitesse de synchronisme tout en passant par celle de synchronisme, cela pour mettre en évidence les deux zones (II et III) de fonctionnement de la chaîne. L'évolution de la puissance mécanique sur l'arbre de la GAS (générée par la turbine) est illustrée par la figure III.9, cette dernière varie dans les phases de fonctionnement à des vitesses mécanique inférieures à la vitesse nominale, et elle est fixée par le dispositif de limitation de puissance à sa valeur nominale durant la phase de fonctionnement avec la vitesse supérieure à celle nominale. La figure III.10 représente l'évolution du couple électromagnétique et de sa référence, celle-ci montre que le couple électromagnétique poursuit sa référence. Les deux composantes du flux rotorique sur les axes direct et quadratique sont illustrées sur la figure III.11. Le flux direct poursuit sa référence et le flux quadratique est nul, cela est dû à l'orientation du flux rotorique réalisée conjointement avec la commande par mode de glissement. Les figures III.12 et III.13 montrent l'évolution de la tension et du courant statoriques et leurs zooms, respectivement. Celles-ci dévoilent que la tension et le courant sont presque déphasés de 180° , c'est-à-dire de signe opposé, ce qui signifie que la puissance produite est de signe négatif (sens de transition de la puissance active, de la machine vers le réseau). L'allure du courant rotorique obtenue est donnée par la figure III.14. Celui-ci augmente et diminue proportionnellement à la puissance mécanique (figure III.9). La figure III.15 représente les allures de la puissance active et réactive statoriques de la GAS. La tension du bus continu est maintenue constante et poursuit parfaitement sa référence, ce qui est illustré par les figures III.16 et III.17. Les allures de la tension et du courant avant le filtre (sortie du convertisseur MLI2) et de leurs zooms sont données respectivement par les figures III.18 et III.19. Les figures III.20 et III.21 représentent les allures de la tension et du courant côté réseau avant le transformateur et de leurs zooms, respectivement. L'amplitude et la fréquence de la tension sont imposées par le réseau ($690\sqrt{2}V, 50Hz$) et l'amplitude du courant injecté au réseau est imposée par la technique du contrôle de la liaison au réseau à base de la régulation de la tension du bus continu et du contrôle du convertisseur MLI2 ; la figure III.21 montre que la tension et le courant sont en opposition de phase, ce qui veut dire que l'écoulement de puissance est de l'aérogénérateur vers le réseau. La figure III.22 illustre l'évolution des puissances active et réactive côté réseau. La puissance active injectée au réseau poursuit sa valeur de référence qui est égale à la

puissance mécanique générée par l'aérogénérateur multiplié par le rendement de la chaîne supposé égal à 95%. La puissance réactive varie légèrement autour de sa valeur de référence imposée nulle.

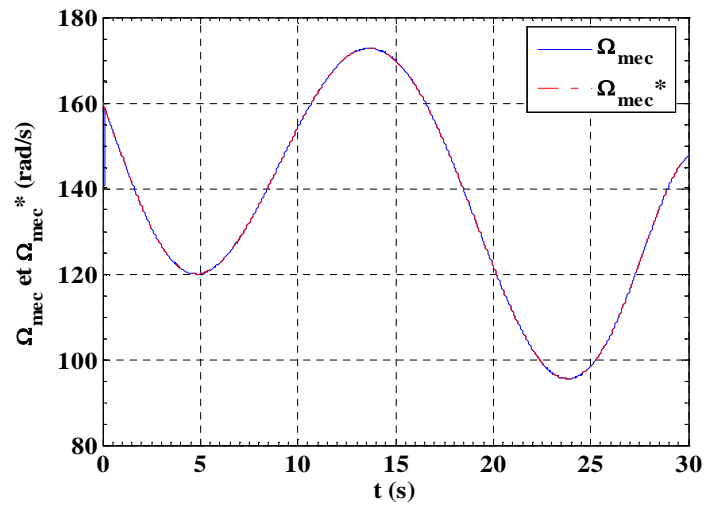


Fig III.8 Vitesse mécanique de la GAS.

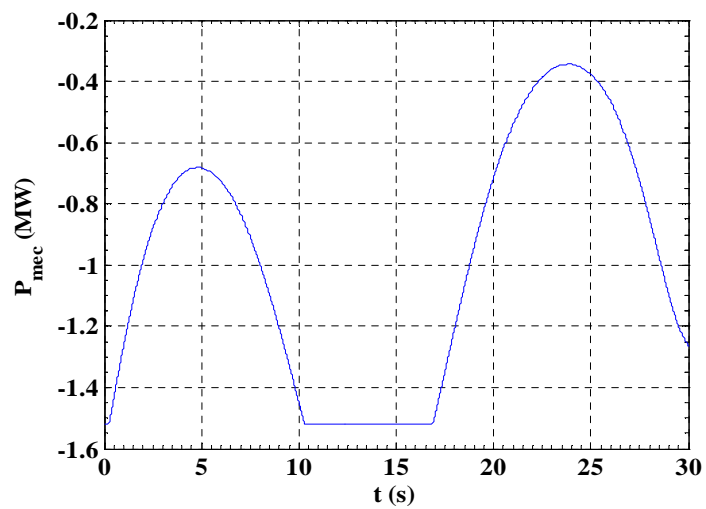


Fig III.9 Puissance mécanique de la turbine.

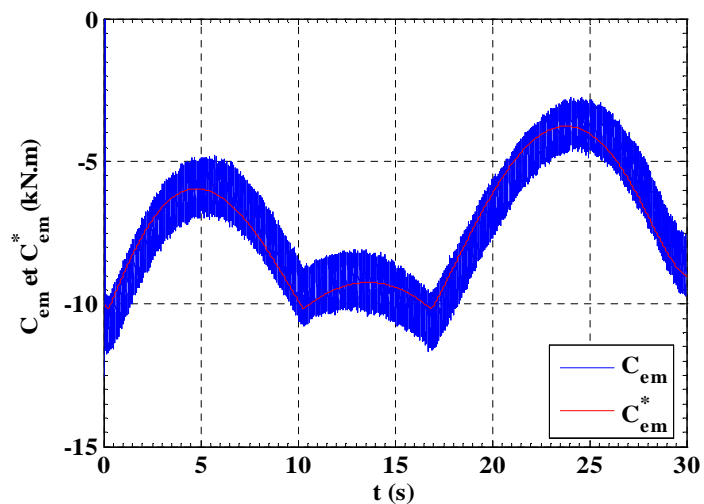


Fig III.10 Couple électromagnétique.

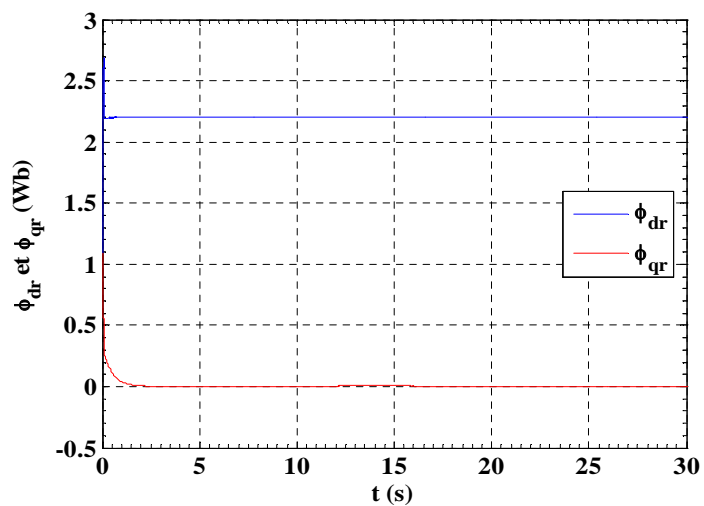


Fig III.11 Flux direct et quadratique rotoriques.

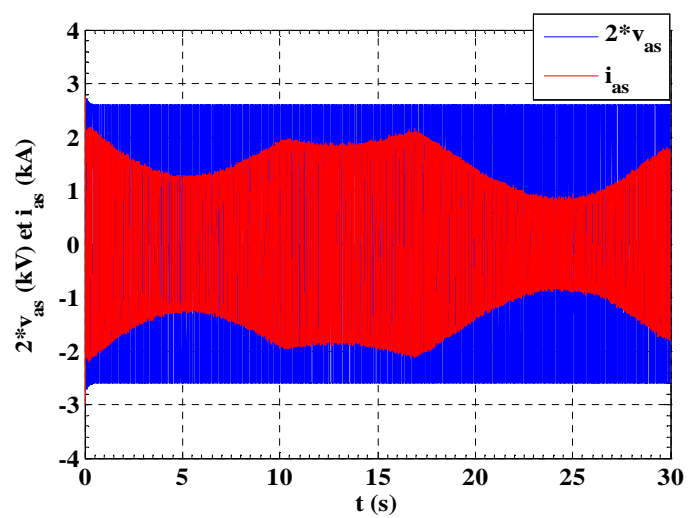


Fig III.12 Tension et courant statoriques.

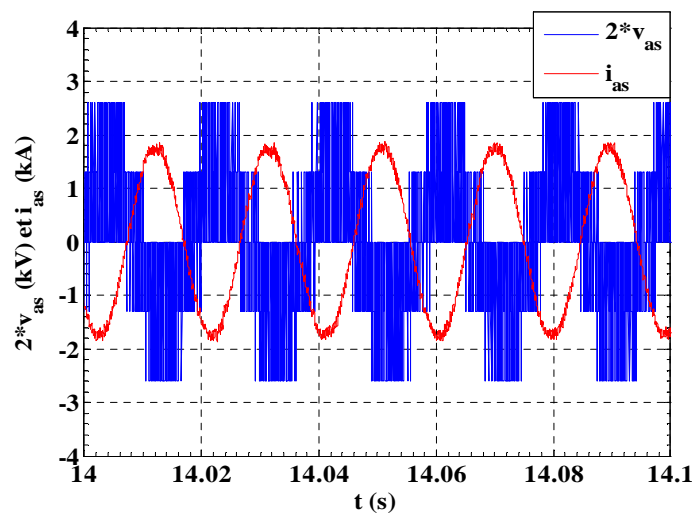


Fig III.13 Zoom de la tension et du courant statoriques.

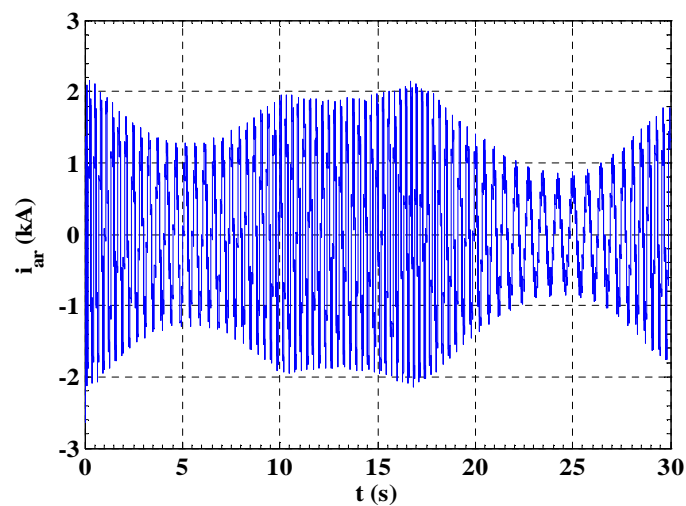


Fig III.14 Courant rotorique.

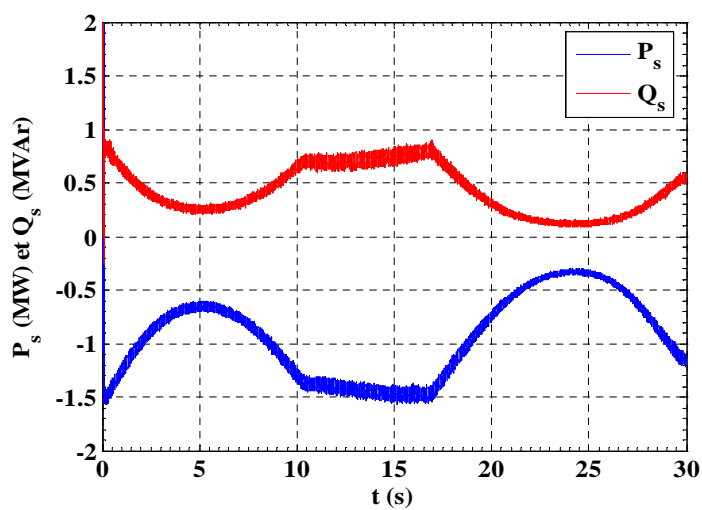


Fig III.15 Puissances active et réactive statoriques.

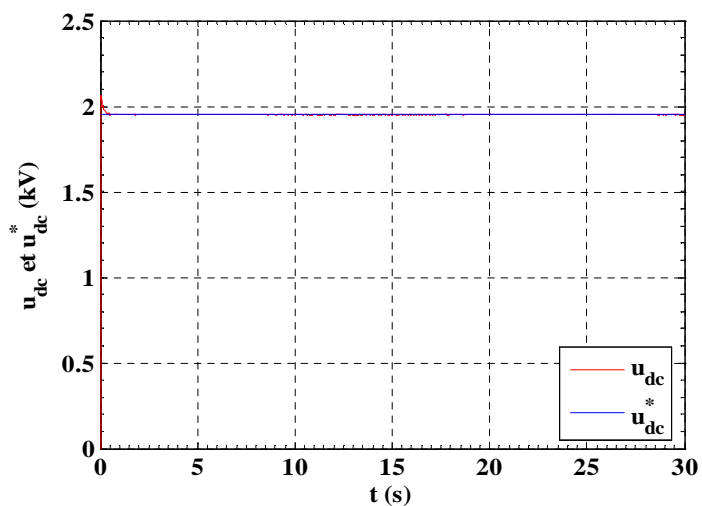


Fig III.16 Tension du bus continu.

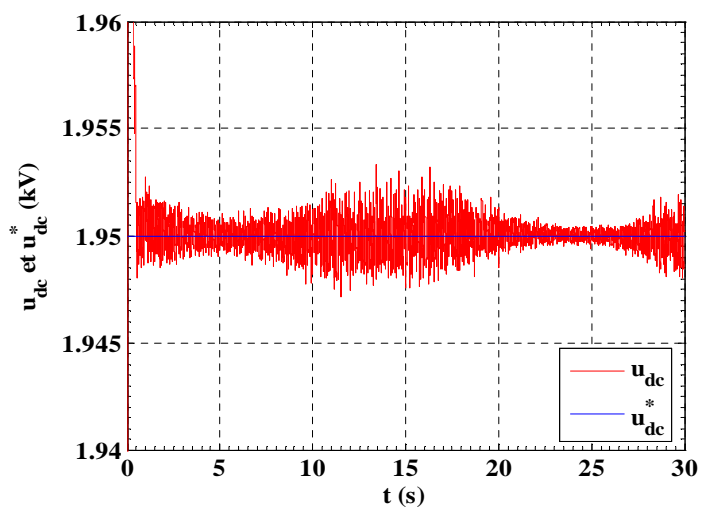


Fig III.17 Zoom de la tension du bus continu.

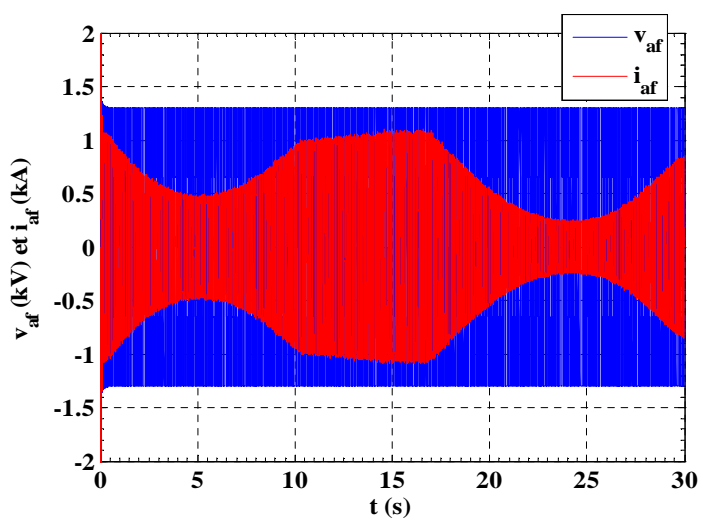


Fig III.18 Tension et courant avant le filtre.

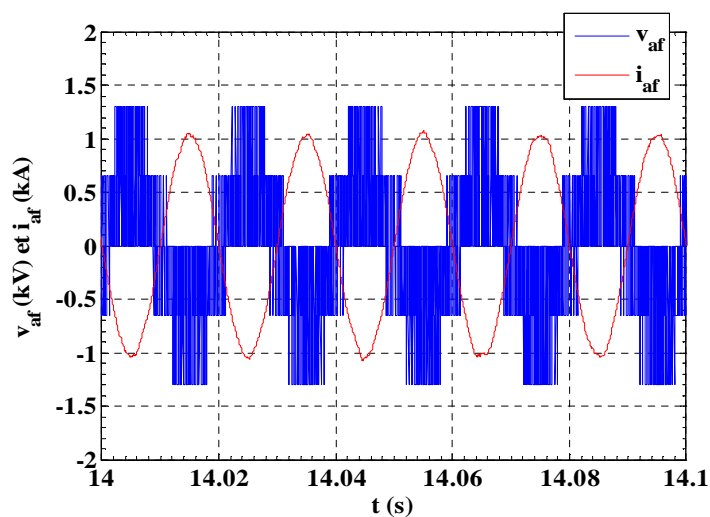


Fig III.19 Zoom de la tension et du courant avant le filtre.

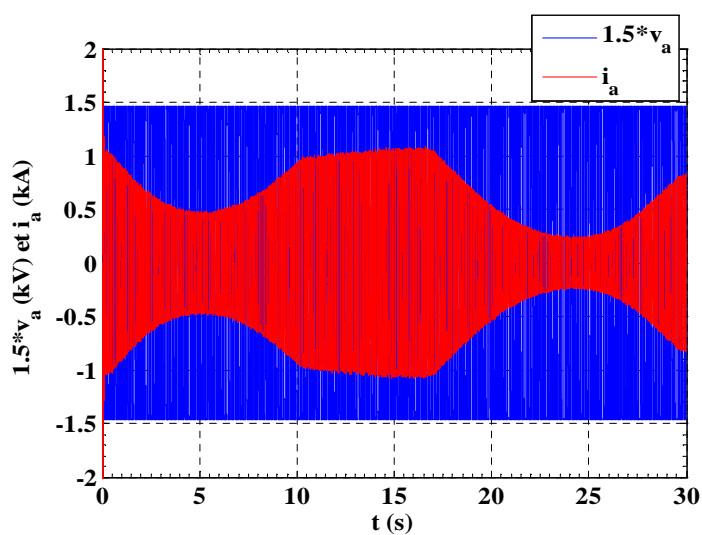


Fig III.20 Tension et courant côté réseau.

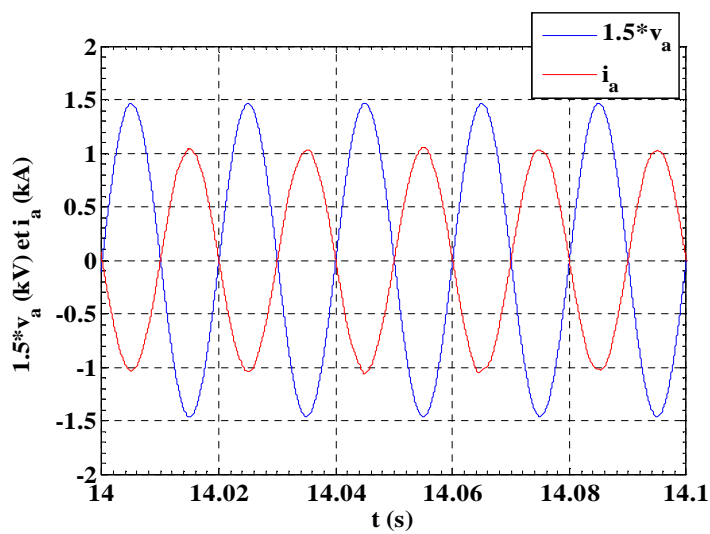


Fig III.21 Zoom de la tension et du courant côté réseau.

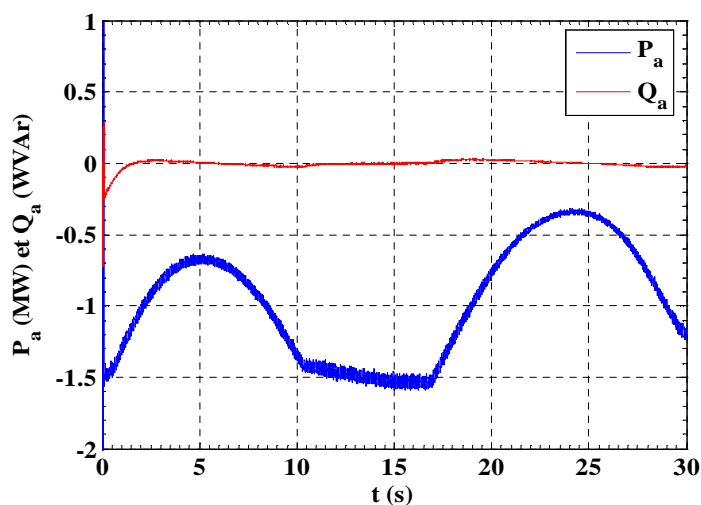


Fig III.22 Puissances active et réactive côté réseau.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'application d'une commande sur la MAS nommée commande par mode de glissement, nous avons établi un modèle qui est composé d'une génératrice asynchrone à cage pilotée par le stator par deux convertisseurs contrôlés en MLI et reliés au réseau via un bus continu, un filtre et un transformateur.

Pour la commande de cet ensemble, on a construit un dispositif qui se compose de plusieurs blocs de commande. On a principalement décrit la commande par mode de glissement associé à la commande vectorielle par orientation du flux rotorique de la GAS, le contrôle de la liaison au réseau avec la régulation du bus continu. Ce dernier est relié au réseau alternatif via un second convertisseur MLI qui a permis de contrôler les échanges de puissance active et réactive avec le réseau. Les résultats de simulation ont été présentés et commentés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif la commande par mode de glissement d'une génératrice asynchrone dans un système éolien connecté au réseau par deux onduleurs de tension utilisant la technique M.L.I

Afin d'atteindre cet objectif, le premier chapitre est consacré à quelques généralités sur le système éolien où nous avons fait sa description avec ses différentes parties constitutives, son principes de fonctionnement, son énergie de production et les différents types de machines utilisées dans les systèmes éoliens et leurs impacts sur le réseau et la qualité d'énergie. Cependant, actuellement la majorité des éoliennes installées dans le monde utilisent la génératrice asynchrone à cage.

Le deuxième chapitre a fait l'objet de la modélisation du système éolien, de la machine et de l'onduleur. Pour ce la, nous avons élaboré un modèle mathématique basé sur la théorie unifiée des machines électriques avec l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices.

Le troisième chapitre est dédié à la commande du système éolien basé sur la GAS piloté par le stator, ou nous nous sommes intéressés à l'application d'une technique de commande robuste, nommée commande par mode de glissement. D'après les résultats obtenus, on a constaté que cette technique de réglage donne de bons résultats. Car, les régulateurs par mode de glissement offrent de bonnes performances statique et dynamique, un rejet quasi-total de la perturbation, comme ils accordent aussi une bonne poursuite.

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

- Utilisation d'autres types de régulateurs;
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique floue, réseau de neurones, la commande adaptative, etc;
- L'intégration d'un système de stockage inertiel;
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis-à-vis des déséquilibres du réseau.

Bibliographie

- [1] N. Ouhrani et S. Ghellaf - « *Etude et Commande d'une Machine Asynchrone Monophasée* » Mémoire de Master de l'Université A. MIRA de Bejaia, Algérie, 2011.
- [2] A. L. Nemmour - « *Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation* » Mémoire de Magister de l'Université El- Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, Avril 2002.
- [3] A. Moussa Siddo et I. Soumana Nouhou - « *Etude du Générateur Asynchrone pour l'Utilisation dans la Production de l'Energie Eolienne* » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique, 10 AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie, 2007.
- [4] A. Saki et M. Belaidi - « *Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne* » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique .10, Avenue Hassen-Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, Juin 2006.
- [5] V. Trachsel - « *L'Energie Eolienne et Solaire: Alternatives aux Besoin Energétiques de la Suisse de Demain* » Travail de Maturité réalisé au Lycée Denis-De Rougement de Neuchâtel sous la direction de M. Michel Favez, Suisse, Juillet 2007.
- [6] M. Lopez - « *Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien pour une Unité de Production Isolée* » Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-Sud11, France.
- [7] <http://www.actuenvironnement.com>.
- [8] H. Camblong - « *Minimisation de l'Impact des Perturbation d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à Vitesse Variable* » Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, Décembre 2003.
- [9] Le groupe EDF - « *L'Energie Eolienne* » Estimation d'un Projet Eolien France, Octobre 2008.
- [10] A. Bouhadda - « *Contribution à l'Etude de Commande d'une Eolienne* » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, Algérie, Juillet 2011.
- [11] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi - « *Éoliennes* » Technique de l'Ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieur d'Art et Métiers et de l'Ecole Supérieure des Techniques Aérospatiales, France.
- [12] F. Poitiers - « *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne* » Thèse Doctorat de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [13] R. Drareni et Z. Ouahrani - « *Commande d'un Aérogénérateur à Base d'une Machine Asynchrone à Cage Connectée au Réseau à Travers un Convertisseur AC-DC-AC* » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique, 10 AV. Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, Juin 2009.

- [14] B. Beltran - « *Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur* » Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, France, juillet 2010.
- [15] Y. A. Bencherif - « *Modélisation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la Production de l'Energie Eolienne* » Mémoire d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, de l'Ecole Nationale Polytechnique, 10 AV. Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, Juin 2008.
- [16] K. Fercous - « *Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne* » Mémoire de Magister en physique de l'Université Mentouri de Constantine, Algérie, 27 mai 2009.
- [17] D. Tarek - « *Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone* » Mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de Batna, Algérie.
- [18] K. Idjdarene - « *Contribution à l'Etude et à la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes* » Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, Algérie, Mai 2010.
- [19] H. Amimeur - « *Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement* » Mémoire de Magister de l'Université El-Hadj Lakhdar de Batna, Algérie, 2008.
- [20] N. Hamdi - « *Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes* » Mémoire de Magister de l'Université Mentouri de Constantine, Algérie, Janvier 2008.
- [21] F. kendouli, K. Nabti et H. Benella - « *modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation* » Travail de recherche de laboratoire de Constantine de l'électrotechnique, Université de Mentouri, Algérie, Mars 2011.
- [22] A. Davigny - « *Participation aux services système de ferme d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie* » Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007.
- [23] K. Ghedamsi - « *Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone* » Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique 10 AV. Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, Décembre 2008.
- [24] N. Benbaha - « *commande robuste tolérante aux défauts : application à la machine à courant alternatif* » Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'université Batna, Algérie, 2009.
- [25] H. Amimeur et S. Aouane - « *réglage par mode de glissement d'un moteur asynchrone alimenté par un convertisseur matriciel* » Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'Université A. MIRA de Bejaia, Algérie, juin 2009.
- [26] A/M. Benkhalfoune et T. Medjdoub - « *Commande par mode de glissement d'une machine asynchrone muni d'un pilotage vectoriel* » Mémoire d'Ingénieur en électrotechnique de l'Université A. MIRA de Bejaia, Algérie, 2003.

- [27] T. Boumegoura - « *Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic* » Thèse de Doctorat Ecole centrale de Lyon, Ecully, France, 2001.
- [28] B. Aoues et A. Ndiaye - « *Commande vectorielle découplée de la machine asynchrone* » Mémoire d'Ingénieur d'état de l'Université A. MIRA de Bejaia, Algérie, Juin 2002.
- [29] S. El Aimani - « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseau de moyenne tension* » Thèse de doctorat de l'école centrale de Lille et de l'université de sciences et technologie de Lille, France, Décembre 2004.
- [30] A.Saibi, M. O. H. Mahmoudi et L.Nazli - « *Commande par mode de glissement d'une machine asynchrone double alimentation alimentée par onduleur à MLI à trois niveaux* » 4th International Conférence of Electrical Engineering, CEE'06, Batna University, Algérie, November 2006.
- [31] M. F. Benkhoris et A. Gayed - « *Discrete sliding control technique of DC motor drive* » IEE Conference Publication N°.249 Power Electronics and Variable Speed Drives, September 1996.
- [32] M. Kercha - « *Commande par mode de glissement de moteur pas à pas à aimant permanent* » Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie, 2005.
- [33] C. P. Coleman et D. Grodble - « *A comparison of robustness fuzzy logic, PID, sliding mode control* » IEEE, pp.1654-1659, 1994.

Paramètres de la machine asynchrone

$$p_n=1,5\text{MW}$$

$$v_{\text{eff}}=690\text{V}$$

$$P = 2$$

$$f = 50\text{Hz}$$

$$R_s=0.021\Omega$$

$$R_r=0.021\Omega$$

$$L_s=0.0137\text{H}$$

$$L_r = 0.0137\text{H}$$

$$M=0.0135\text{H}$$

$$J = 50\text{kg.m}^2$$

$$\omega_s=314 \text{ rad/s}$$

$$\eta=95\%$$

$$R_f=0.01\Omega$$

$$L_f=0.001\text{H}$$

$$C=0.0098\text{F}$$

Paramètres des régulateurs par mode de glissement

===== Régulateur de vitesse=====

$$\varepsilon_{\Omega} = 0.5$$

$$K_{\Omega} = 4800$$

===== Régulateur de flux=====

$$\varepsilon_{\varphi_r} = 0.1$$

$$K_{\varphi_r} = 3500$$

===== Régulateur de courant=====

$$\varepsilon_{d_s} = 1$$

$$K_{d_s} = 150$$

$$\varepsilon_{q_s} = 1$$

$$K_{qs} = 365$$

=====Régulateur PI=====

$$K_p=0.3$$

$$K_i=3$$