

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

Magister en Electrotechnique

Option : Diagnostic des Machines Electriques

Par

MELLOUL Ahmed

Thème

**Simulation et diagnostic d'une machine
asynchrone à double alimentation
d'une éolienne.**

Soutenu le 07/06/2011 devant le jury composé de :

DR. GHERBI AHMED	M.C . Université de Sétif	Président
DR. HACHEMI MABROUK	M.C . Université de Sétif	Rapporteur
DR. HEMSAS KAMEL EDDINE	M.C . Université de Sétif	Examineur
DR. RADJELI HAMMOUD	M.C . Université de Sétif	Examineur

Sétif 2011

A ma mère

A mon père

A ma femme, à mes deux fils Houdhaifa et Abdel Djalil

A mes frères et sœurs

A toute ma famille et mes amis

A v a n t - p r o p o s

Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire d'Electrotechnique de Sétif (LAS), sous la direction conjointe du monsieur **M. HACHEMI** Maître de Conférences au département d'électrotechnique de l'université de Sétif, à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **A. GHERBI** maître de conférences au département d'électrotechnique de l'université de Sétif, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi à monsieur **K. HEMSAS** maître de conférences au département d'électrotechnique de l'université de Sétif pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Je suis très reconnaissant également à monsieur **H. RADJELI** maître de conférences au département d'électrotechnique de l'université de Sétif pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de se siéger dans son jury.

A toutes les personnes (dont le nombre est très élevé pour les citer toutes ici), qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement à ce travail, je les remercie toutes, particulièrement ma famille et tous mes amis.

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

S o m m a i r e

Notations

Introduction générale

1

Chapitre I

Etat de l'Art des Systèmes De Conversion D'Energie Eolienne

I-1	Introduction.....	6
I.2	Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel.....	7
I.2.1	Historique de l'éolien.....	7
I.2.2	L'énergie éolienne en quelques (mots et chiffres)	8
I.2.2.1	L'énergie éolienne pour quoi faire ?.....	8
I.2.2.2	Rapport mondial sur l'énergie éolienne 2009.....	8
I.2.2.3	Les principaux marchés en 2009.....	10
I.2.2.4	Taux de croissance en hausse depuis 2002.....	11
I.2.2.5	L'éolien offshore.....	12
I.2.2.6	Perspectives mondiales.....	13
I.2.2.7	L'éolienne en Algérie.....	14
I.2.2.8	Projet à faire en l'Algérie.....	14
I.2.2.9	Emplacement des parcs éoliens.....	15
I.3	Constitution d'une éolienne.....	15
I.3.1	Principe.....	16
I.3.2.	Types des turbines éoliennes.....	17
I.3.2.1	Eoliennes à axe vertical.....	18
I.3.2.2.	Eoliennes à axe horizontal.....	18
I.3.3.	Constitution d'une éolienne moderne	19
I.3.3.1	le rotor.....	20
I.3.3.2	La nacelle.....	20
I.3.3.3	Le pylône.....	20
I.3.3.4	Moyeu.....	20
I.3.3.5	Les pales.....	22
I.3.3.5.	Nombres de pales.....	22
1		
I.4	Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	23
I.4.1	Action du vent sur les pales de la turbine.....	26
I.4.2	Contrôle de la puissance.....	27
I.5	Méthodes de contrôle de l'aéroturbines.....	29
I.6	Zones de fonctionnement.....	30
I.7	Transmission de la puissance.....	31
I.8	Méthodes de contrôle du générateur électrique.....	31
I.8.1	Système a vitesse fixe. (Structure MAS).....	32
I.8.2.	Systèmes à vitesse variable.....	32
I.8.2.1	Vitesse variable par dissipation de la puissance rotorique.....	33
I.8.2.2	Vitesse variable par double alimentation stator-rotor.....	34
I.8.2.3	Vitesse variable par pilotage du stator.....	35
I.8.2.4	Vitesse variable par pilotage avec double stator.....	36
I.9	Exemple d'une éolienne NORDEX S77 / 1500.....	37
I.10	Conclusion.....	38

Chapitre II

Modélisation de système générateur Eolien Convertisseur

II.1	Introduction.....	39
II.2	Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	40
II.2.1	Le vent. D'où vient le vent ?	40
II.2.1.1	Modélisation du vent.....	40
II.2.1.2	Vent incident sur la turbine éolienne.....	40
II.2.1.3.	Vent fictif en un point fixe.....	42
II.2.1.4	Filtre spatial.....	43
II.2.1.5	Rafales.....	44
II.2.2	Conversion aérodynamique.....	45
II.2.2.1	Equation dynamique de la turbine.....	47
II.2.3	Techniques d'extraction du maximum de la puissance.....	49
II.2.3.1	Bilan des puissances.....	49
II.2.3.2	Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse...	51
II.2.3.2.1	Principe général.....	51
II.2.3.3	Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	52
II.2.4	Modèle de l'actionneur des pales.....	54
II.2.4.1	Action en pleine charge.....	54
II.2.4.2	Modèle de rotation des pales.....	54
II.2.4.3	Boucles de régulation.....	55
II.2.5	Résultats de simulations.....	55
II. 3	Modélisation de la partie de conversion électromécanique.....	57
II. 3.1	Introduction.....	57
II. 3.2	Présentation de quelques études faites dans le domaine de la MADA	58
II.3.3	Double alimentation par le stator.....	64
II.3.4	Double alimentation par le stator et le rotor.....	65
II.3.4.1	Principe.....	65
II.3.4.2	Description de la MADA (à rotor bobinée).....	65
II.3.4.3	Modes de fonctionnement de la MADA.....	67
II.3.5	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	68
II.3.5.1	Rappel sur la loi de Faraday.....	69
II.3.5.2	Mise en équation de la partie électrique dans le plan(a.b.c).....	70
II.3.5.3	Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park	71
II.3.5.4	Calcul du couple électromagnétique.....	73
II.3.5.5	Choix du référentiel.....	74
II.3.6	Résultat de simulation.....	76
II.4.	Modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux.....	78
II.4.1	Définition.....	78
II.4.2	Principe de la MLI.....	79
II.4.3	Résultat de simulation.....	81
II.5	Conclusion.....	82

Chapitre III

Contrôle des puissances active et réactive de la MADA

III.1	Introduction.....	83
III.2	Principe de la commande vectorielle.....	84
III.3	Modèle de la MADA à flux statorique orienté	85
III.3.1	Expressions des puissances actives et réactives statoriques.....	87
III.3.2	Expressions des tensions rotoriques.....	87
III.4	Contrôle indépendant des puissances active et réactive.....	89
III.4.1	Commande directe.....	89
III.4.2	Commande indirecte.....	89
III.4.2.1	Commande en boucle ouverte.....	89
III.4.2.2	Commande en boucle fermée.....	90
III.5	Résultats de simulations.....	91
III.5.1	Simulation du système sans onduleur.....	91
III.5.1.1	Interprétation des résultats.....	95
III.5.2	Simulation du système avec onduleur.....	97
III.5.2.1	Interprétation des résultats.....	100
III.5.3	Résultat de la chaîne éolienne.....	101
III.5.3.1	Interprétation des résultats.....	102
III.6	Conclusion.....	105

Chapitre IV

Détection Des Défauts D'une MADA Par L'analyse Spectrale

IV.1	Introduction	106
IV.2	Attributs de la sûreté de fonctionnement:	107
IV.3	Terminologie propre au diagnostic :	107
IV.3.1	Défaut (Fault) :	107
IV.3.2	Défaillance (Failure):	110
IV.3.3	Panne (Break-down)	110
IV.3.5	Symptôme (Symptom)	110
IV.3.6	Résidu (Résiduel)	110
IV.3.7	Diagnostic	112
IV.3.8	Perturbation	111
IV.4	Détection et isolation de défauts (Système de surveillance)	111
IV.4.1.1	La détection	111
IV.4.1.2	Diagnostic	112
IV.4.1.3	La reprise	113
IV.5	Types des défauts de la MADA	113
IV.5.1	Défauts du stator et rotor	114
IV.6	La surveillance de la machine asynchrone à double alimentation	114
IV.6.1	Approche signal	114

IV.6.1.1	Analyse spectrale	115
IV.6.2	Introduction au diagnostic par analyse spectrale	115
IV.6.3	Analyse spectral du courant statorique par la FFT	115
IV.6.3.1	Résultats de simulation d'un fonctionnement sain	118
IV.6.3.2	Résultats de simulation d'un fonctionnement avec défaut	122
IV.6.4	Résultat avec analyse spectral par FFT	126
IV.7	Conclusion	127
	Conclusion générale	130

Liste des Figures

Fig. I.1	Capacité des installations éolienne (mondiale en MW).....
Fig. I.2	Capacité des installations éolienne (nouvelle en MW).....
Fig. I.3	Les 10 pays ayant les plus fortes croissances plus de 100 MW.....
Fig. I.4	Capacité dans chaque continentale (nouvelle et totale).....
Fig. I.5	Capacité dans chaque continentale (nouvelle et totale).....
Fig. I.6	Taux de croissance mondial en (MW).....
Fig. I.7	Taux de croissance nouveauté en(%).....
Fig. I.8	les plus grandes offshores du monde (Horns Rev).....
Fig. I.9	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en Algérie.....
Fig. I.10	Les composants d'un parc éolien.....
Fig. I.11	Installation d'un parc éolien.....
Fig. I.12	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....
Fig. I.13	Types d'éolienne.....
Fig. I.14	Effet du vent sur un corps creux (Le rotor de Savonius).....
Fig. I.15	éolienne de Darrieus de 4.2MW et 100m de diamètre.....
Fig. I.16	Différentes parties de l'éolienne NORDEX N80 (2.5MW).....
Fig. I.17	Pales de 39 m sur une NORDEX N80 (2.5MW).....
Fig. I.18	Bilan des forces sur un tronçon d'une pale.....
Fig. I.19	Evolution des coefficients de portance C_L et de trainée.....
Fig. I.20	Structure générale de contrôle d'un système éolien.....
Fig. I.21	Différentes techniques de contrôle des aéroturbines.....
Fig. I.22	Décrochage à passif stall.....
Fig. I.23	Contrôle par calage variable des pales.....
Fig. I.24	Zones de fonctionnement d'une

	éolienne.....
Fig. I.25	(MAS) vitesse de rotation fixe.....
Fig. I.26	Système à vitesse variable par dissipation de la puissance rotorique.
Fig. I.27.	Système à vitesse variable par double alimentation.....
Fig. I.28.	Variation de la vitesse de 0 à 100% de la vitesse nominale.....
Fig. I.29	Variation de la vitesse (MASDS).....
Fig. I.30	Puissance récupérée par les 3 pales en fonction de la vitesse du vent.....
Fig. II.1	Spectre énergétique de la vitesse du vent longitudinale.....
Fig. II.2	Quelques causes de la non-homogénéité du vent sur la turbine.....
Fig. II.4	Vitesse de vent d'après l'entreprise EDF.....
Fig. II.5	Fonctionnement optimal de la turbine.....
Fig. II.6	Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β
Fig. II.7	Configuration d'une éolienne.....
Fig. II.8	Modèle de la turbine.....
Fig. II.9	Modèle simplifié de la turbine.....
Fig. II.10	Schéma bloc de la turbine.....
Fig. II. 11	Diagramme de conversion de puissance.....
Fig. II.12	Stratégies de commande de la turbine étudiée.....
Fig. II.13	Max de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....
Fig. II.14	Max de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....
Fig. II.15	Orientation des pales.....
Fig. II.16	Système de régulation des pales
Fig. II.17	Vitesse de vent d'après EDF.....
Fig. II.18	Vitesse mécanique de l'arbre rapide.....
Fig. II.19	Vitesse de la turbine (l'arbre lent).....
Fig. II.20	Coefficient de puissance.....
Fig. II.21	Vitesse spécifique (TSR).....
Fig. II.22	Angle de calage β des pales.....
Fig. II.23	Puissance mécanique produite par la turbine.....
Fig. II.24	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....
Fig. II.25	MAS piloté par le stator.....
Fig. II.26	Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.....
Fig. II.27	Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA.....
Fig. II.28	Représentation schématique de la machine asynchrone à rotor bobine.....
Fig. II.29	Transformation de Park (abc à dq).....
Fig. II.30	Tensions et courants statoriques de la MADA.....
Fig. II.31	les courants rotoriques et couple électromagnétique de la MADA.....
Fig. II.32	Flux statoriques et rotoriques de la MADA.....
Fig. II.33	Puissances actives et réactives statoriques de la MADA.....

Fig. II.34	Onduleur de tension à deux niveaux.....	
Fig. II.35	Principe de la MLI triangulo-sinusoidale.....	
Fig. II.36	Principe de la MLI sinus triangle.....	
Fig. II.37	Signes de commande de l'onduleur.....	
Fig. II.38	Tensions simples de l'onduleur.....	
Fig. II.39	Spectre d'harmoniques de la tension de phase.....	
Fig. III.1	Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.....	
Fig. III.2	Orientation de l'axe d sur le flux statorique.....	
Fig. III.3	Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....	
Fig. III.4	Schéma bloc de la commande directe.....	
Fig. III.5	Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.....	
Fig. III.6	Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.....	
Fig. III.7	Schéma bloc du modèle sans onduleur.....	
Fig. III.8	Schéma bloc du modèle avec onduleur.....	
Fig. III.9	Tension	rotorique.
Fig. III.10	Tension statorique avec zoom.....	
Fig. III.11	Courant statorique avec zoom.....	
Fig. III.12	Courant rotorique (a, b, c).....	
Fig. III.13	Courant rotorique (d, q).....	
Fig. III.14	Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom.....	
Fig. III.15	Le couple électromagnétique.....	
Fig. III.16	Le flux rotorique selon l'axe d et q.....	
Fig. III.17	Suivi des consignes de Puissance active statorique	
Fig. III.18	Suivi des consignes de Puissance réactive statorique.....	
Fig. III.19	Tension rotorique ondulé.....	
Fig. III.20	Tension statorique avec	

	zoom.....
Fig. III.21	Courant statorique avec zoom.....
Fig. III.21	Courant rotorique (a, b, c).....
Fig. III.22	Courant rotorique (d, q).....
Fig. III.23	Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom.....
Fig. III.24	Le couple électromagnétique.....
Fig. III.25	Le flux rotorique selon l'axe d et q.....
Fig. III.26	Suivi des consignes de Puissance active statorique.....
Fig. III.27	Suivi des consignes de Puissance réactive statorique.....
Fig. III.28	Tension rotorique ondulé.....
Fig. III.29	Tension statorique avec zoom.....
Fig. III.30	Courant statorique avec zoom.....
Fig. III.31	Courant rotorique (a, b, c).....
Fig. III.32	Courant rotorique (d, q).....
Fig. III.33	Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom.....
Fig. III.34	Le couple électromagnétique.....
Fig. III.35	Le flux rotorique selon l'axe d et q.....
Fig. III.36	Suivi des consignes de Puissance active statorique.....
Fig. III.37	Suivi des consignes de Puissance réactive statorique.....
Fig. III.38	Profile du vent.....
Fig. III.39	Vitesse mécanique.....
Fig. III.40	Vitesse de la turbine.....
Fig. III.41	Angle de calage de pale.....
Fig. III.42	Coefficient de puissance.....
Fig. III.43	Vitesse spécifique TSR.....
Fig. III.44	Tension et courant statorique avec

	zoom.....
Fig. III.45	Tension rotorique ondulé avec zoom.....
Fig. III.46	Couple électromagnétique.....
Fig. III.47	Courant rotorique.....
Fig. III.48	Puissances active statoriques
Fig. III.49	Puissances réactive statoriques.....

Liste des Tableaux

(Tab I.1)	Puissance éolienne dans les Leaders en 2009.
(Tab I-2)	Rapport de vitesse pour des éoliennes actuelles
(Tab. II.1)	<i>Coefficients définissant l'évolution de C_p</i>

V, v	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne.
V'	Vitesse du vent à travers la section S.
ρ	Densité de l'air à 15°C.
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en dans une unité de temps.
R	Rayon de la turbine.
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne.
$P_{aér}$	Puissance absorbée par l'aérogénérateur.
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé.
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne.
λ	Vitesse spécifique (relative) de l'éolienne.
β	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_s	Vitesse de synchronisme.
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine.
$\Omega_{turbine_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine.
Ω_{mec}	Vitesse mécanique.
v	Vitesse du vent.
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée.
G	Gain du multiplicateur.
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine.
J_g	Moment d'inertie du rotor de la génératrice.
J	Moment d'inertie totale
f	Coefficient de frottement visqueux.
ΔE	Variation d'énergie cinétique de l'air.
E_v	L'énergie cinétique de vent.
C_{aer}	Couple aérodynamique de l'éolienne.
C_{mec}	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne.
C_{vis}	Couple des frottements visqueux.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_{em_ref}	Couple électromagnétique référence.
$C_{aer_estimé}$	Couple aérodynamique estimé.
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.

θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d.
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
θ_{obs}	Angle de l'observateur.
ω	Vitesse de rotation électrique.
ω_s	Pulsation électrique statorique.
ω_r	Pulsation électrique rotorique.
ω_m	Pulsation mécanique de la machine.
P_s	Puissance active au stator.
P_r	Puissance active au rotor.
Q_s	Puissance réactive au stator.
Q_r	Puissance réactive au rotor.
g	Glissement.
L_{rr}	Matrice d'inductance rotorique .
M_{sr}	Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator).
M_{rs}	Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor).
V_s	Vecteur tension statorique.
V_r	Vecteur tension rotorique.
I_s	Vecteur courant statorique.
I_r	Vecteur courant rotorique.
$[\varphi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\varphi_r]$	Vecteur flux rotorique.
V	Tension.
I	Courant.
φ	Flux.
M	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)
l_s	Inductance propre de chaque enroulement du stator.
l_r	Inductance propre de chaque enroulement du rotor.
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique.
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique.

L_s	Inductance de chaque enroulement du stator.
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor.
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator.
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Flux statorique selon l'axe d, q .
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Flux rotorique selon l'axe d, q .
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique selon l'axe d, q .
V_{rd}, V_{rq}	Tension rotorique selon l'axe d, q .
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d, q .
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d, q .
s	Opérateur dérivé de Laplace
p	Nombre de paire de pole de DFIG.
P_m	Puissance mécanique.
f_r	Fréquence de rotor.
f_s	Fréquence de stator.
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI.
τ_r	Temps de réponse du système.
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion.
FTBO	Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.
FTBF	Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
PI	Proportionnel – Intégrale.
DFIM	Doubly-fed induction machine.
DFIG	Doubly-fed induction générateur.
MAS	Machine asynchrone.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.

*“Of all the forces of nature, I should think the
Wind contains the greatest amount of power”*

... Abraham Lincoln

L'histoire de relation qui lie l'homme à l'énergie est née dès la première existence de ce dernier sur la terre. En fait, l'homme était et continue toujours à chercher de nouvelles sources de l'énergie qui peuvent satisfaire ses besoins qui ne cessent de se multiplier d'un jour à l'autre. L'homme a commencé par exploiter les animaux dans ses déplacements, pour faire entrainer les roues des moulins, puis il s'était orienté vers l'utilisation de l'énergie emmagasinée dans les fleuves, les ruisseaux et les chutes d'eaux avant de découvrir et de se servir de l'énergie du vent pour faire pousser les navires.

Au fil des ères et jusqu'à nos jours, l'homme a réussi à accumuler des expériences très riches en matière d'exploitation et de conversion des énergies. Au début de notre ère, et grâce aux progrès spectaculaires connus par les différentes disciplines de la science telles que la chimie, la mécanique, les mathématiques...etc. l'homme a pu développer des procédés très complexes révélant ainsi son génie. Au début du 20^{ème} siècle, et grâce au développement des sciences de l'ingénieur et surtout celui de l'économie, une mutation radicale a marqué la science, l'homme est passé du stade de la construction et de la création au stade de l'optimisation et de l'amélioration des performances, de ce fait, il est arrivé à une maîtrise quasi totale de l'énergie.

On a même entendu parler des procédés de conversion sans pertes et avec des rendements très proches de l'unité. Toutes ces gigantesques réalisations ne semblent pas avoir satisfait les ambitions parfois démesurées de l'homme qui essaye cette fois ci de violer une des règles les plus fondamentales de la nature en tentant d'obtenir de l'énergie sans rien dépenser. En regardant les efforts, les budgets et l'investissement déployés à cet effet, il est tout à fait clair que ceci est à sa portée.

Sans aucun doute, depuis la découverte hasardeuse de l'électricité; la machine la plus impressionnante que l'homme a pu réaliser pour concrétiser un des procédés les plus importants de la conversion de l'énergie jusqu'à nos jours est la machine électrique qui a été mise au point sous sa forme finale la fin du dix-huitième siècle et dont les principes de bases ont été établis grâce à la coopération de plusieurs savants de différentes générations et de différentes tendances. L'importance majeure de la machine électrique réside principalement dans l'étroite dépendance et la coexistence harmonieuse de plusieurs phénomènes physiques tels que le magnétisme, l'électrostatique, la chaleur, la dynamique des corps en mouvement ...etc. ainsi que leurs interactions mutuelles.

Grâce à sa réversibilité de fonctionnement, la machine électrique constitue un outil très précieux pour comprendre les mécanismes d'un procédé de conversion. En fait, le fonctionnement moteur de cette machine correspond au cas où elle transformait l'énergie électrique qu'elle absorbe en énergie mécanique en développant un couple ou une force.

L'opération inverse correspond au fonctionnement générateur. Entre autres, nous pouvons distinguer deux types principaux de machines électriques; les machines dites synchrones et les machines dites asynchrones. Dans le premier type, et pour développer un couple non nul, la vitesse de rotation n'est fixée que par la pulsation du stator; c'est la vitesse de synchronisme, c'est pour cette raison que la machine synchrone convient beaucoup mieux au fonctionnement générateur.

Bien que le deuxième type fût pendant très longtemps destiné principalement au fonctionnement moteur, la machine asynchrone présente des performances très intéressantes lorsqu'elle opère en génératrice. Sa caractéristique principale réside dans le fait que la fréquence des ses grandeurs statorique reste fixe si la vitesse de rotation varie autour de la vitesse de synchronisme.

Ce caractère a permis à la machine asynchrone et surtout à sa version dite machine asynchrone à double alimentation d'être le meilleur candidat pour travailler en association avec des énergies dites énergies renouvelables, que l'homme essaye à tout prix de les faire exploiter. Dans ce cadre, des efforts énormes de recherches ont été déployés afin de mieux exploiter cette robuste machine. Depuis plusieurs décennies, l'homme est devenu de plus en plus convaincu de la nécessité de nouvelles sources plus propres et plus rentables d'énergie. Ceci a pour but soit de renforcer celles déjà existantes, soit de les remplacer carrément. Dans ce contexte, il ne trouvera pas mieux que l'énergie éolienne.

Cette dernière présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes pour les centrales nucléaire qui rendent notre énergie peu attractive pour les générations futures [1].

Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher et elle peut être dangereuse au niveau écologique.

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermique, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites renouvelables. L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme.

En effet, les modes de production reposant sur la transformation d'énergie renouvelable (Eolien, Solaire...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable. Pour réaliser ceci, il est important de disposer de différentes technologies de générateurs telles que les machines synchrones et les machines à aimant permanent. La machine à induction à cage est la plus utilisée, car elle est peu coûteuse, robuste et sa maintenance est très facile et simple. Mais si elle est connectée directement au réseau, ce dernier impose la fréquence et dans ce cas la vitesse d'entraînement doit être constante. De plus si on utilise un convertisseur à son

stator, on trouve que la plage de variation de vitesse est plus limitée. Si on utilise un alternateur classique (machine synchrone triphasée) entraîné à vitesse variable, dans ce cas le système est composé d'un convertisseur statique de fréquence situé entre le stator et le réseau et qui permet de transformer la fréquence variable de l'alternateur. Il faut ajouter un compensateur synchrone afin de fournir la puissance réactive consommée par le convertisseur statique, ce qui augmente le coût du système. Tout ceci explique pourquoi on recherche à remplacer ce système. Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable, on leur préfère plutôt des machines à rotor bobiné doublement alimentées qui offrent d'excellents compromis performances, coûts [2].

Connue depuis 1899, la machine asynchrone à double alimentation (MADA). En anglais «*Doubly Fed Induction machine DFIM* » est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes de stabilité rencontrés des lors, l'ont fait abandonner pour un temps. Le schéma de raccordement de cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau (génératrice non autonome), ou avec des batteries de condensateurs (fonctionnement dit autonome), alors que le rotor est alimenté à travers le convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme.

La MADA utilisée pour la génération d'énergie électrique dans un site isolé est considérée comme une solution écologique intéressante. Le générateur à induction doublement alimenté est davantage adapté pour cette application, parce qu'il reçoit une vitesse variable sur son arbre, et il doit produire une tension à amplitude et fréquence constantes côté charge, donc pour une génératrice autonome, débitant sur un site isolé, le problème devient plus complexe, car il faut contrôler aussi la tension et la fréquence du côté du stator [2].

Grâce au progrès de l'électronique de puissance, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux et des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70 appliquée à la machine asynchrone avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle.

Le développement de la micro-informatique et des systèmes programmés ouvre la voie au contrôle en temps réel des machines électriques. Néanmoins, la difficulté pour commander la machine asynchrone réside dans le fait que son modèle mathématique est non linéaire, multi variable et fortement couplé vu l'existence d'un couplage complexe entre les deux armatures statoriques et rotoriques. Afin d'obtenir avec la machine asynchrone à double alimentation, des performances semblables à celle de la MCC, il est nécessaire de séparer le contrôle du flux et le contrôle du courant générant

le couple électromagnétique. L'apparition de la commande vectorielle constitue une évolution. Par cette technique, et pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA), peut effectuer un découplage artificiel entre le flux et le couple électromagnétique [2].

Problématique

La sûreté de fonctionnement est un enjeu majeur pour assurer une compétitivité optimale de l'outil de production de l'énergie. Les gains de la productivité représentent un souci quotidien pour les dirigeants des entreprises. La compétitivité de ce secteur passe par la maîtrise indispensable de la disponibilité de l'outil de production, l'amélioration de son fonctionnement, la sécurité de ses utilisateurs et la réduction des coûts d'entretien.

Il existe plusieurs notions permettant une optimisation des systèmes industriels qui s'intègrent à la discipline de la sécurité de fonctionnement, fiabilité, maintenabilité, sécurité et maîtrise de risques.

Pour une bonne surveillance de tels dispositifs complexes, il convient de développer des systèmes de diagnostic disposant d'une certaine faculté d'adaptation à des situations nouvelles (apprentissage), et permettant une reconnaissance fiable (décision) du mode de fonctionnement dans lequel le système évolue.

Le diagnostic peut être défini comme un processus en trois phases : la détection d'un défaut de mode de fonctionnement, son identification et la localisation de sa cause. Certaines utilisations de MADA ne tolèrent pas les pannes intempestives. Ces pannes peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, défauts des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court-circuit dans les bobinages statoriques et rotoriques)..

La naissance d'un défaut dans la MADA lors de son fonctionnement n'implique pas l'arrêt instantané de la machine, mais il affecte directement les performances de la machine telles que le couple électromagnétique, les courants et la vitesse. D'où la nécessité du diagnostic de la machine pour identifier, localiser et déterminer les causes des défauts. Un défaut physique n'est pas évident à localiser avec des capteurs, surtout si le défaut se retrouve au rotor, à cause du mouvement de ce dernier. L'utilisation des spires de flux dans l'entrefer ou dans les têtes de bobines en vue de voir l'image de l'état magnétique de la machine permettait de suivre les imperfections significatives dans le cas de l'apparition de défaut [3]. Mais cette solution ne peut être appliquée à toutes les machines utilisées à cause de la difficulté d'insertion de ce type de capteurs et de leurs coûts.

L'analyse par traitement du signal des grandeurs de ligne (courant, tension et puissance) peut donner une image réelle sur les déséquilibres qui se produisent dans la machine ; Cette analyse est basée sur les techniques classiques telles que : l'analyse de Fourier et de Hilbert.

Organisation du mémoire

Le travail présenté dans ce mémoire est une tentative de faire partie du monde de recherche dans le domaine de l'énergie éolienne. Il débute par un **premier chapitre** qui donne un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, puis une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure, Enfin ce chapitre est clôturé par une conclusion.

Le **deuxième chapitre** est composé de trois sections :

Une première est consacrée à la modélisation et la simulation de la partie mécanique de l'éolienne, Où le modèle du vent et son évolution sont étudiés de façon détaillée. Par la suite on calcule la puissance maximale pouvant être extraite, et présenter les techniques d'extraction du maximum de la puissance issue du vent. Enfin, on terminera la **première section** par des résultats de simulation pour vérifier les modèles du système à étudier. La **deuxième section** débute par une présentation de quelques études faites dans le domaine de la MADA puis traité la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation et la simulation de ses configurations en fonctionnement moteur et générateur. Dans la **troisième** et dernière **section** nous présentons la modélisation de l'onduleur alimentant la MADA. La commande MLI de ce dernier est étudiée.

Le **troisième chapitre**, est consacré à la commande vectorielle par orientation du flux, ceci présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour les machines asynchrones double alimentées aussi bien en fonctionnement générateur que moteur. Le stator de la MADA sera alimenté par une source de tension triphasée parfaite et le rotor par un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la stratégie de modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoidale. Puis on termine par l'étude du système complet : vent, turbine, machine asynchrone double alimentation et convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique.

Le **quatrième chapitre**, nous situons les méthodes de la surveillance, et les différents défauts qui se manifestent souvent dans la machine asynchrone à double alimentation ainsi que leurs causes. Nous utilisons un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques pour analyser le comportement de la machine en l'absence et en présence des défaillances. Ce type d'approche offre un modèle de machine simple, un temps de calcul raisonnable. L'étude est faite à partir de l'analyse fréquentielle ou spectrale du courant et de la puissance utilisant la transformation de Fourier rapide FFT. On termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Etat de l'Art des Systèmes De Conversion D'Energie Eolienne

I-1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne, [3,4].

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou 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 de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes, [5].

Dans ce chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Les statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, et le principe de fonctionnement d'une éolienne, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2 Etat de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel

I.2.1 Historique de l'éolien

L'énergie éolienne a été déjà utilisée par Hammourabi (fondateur de Babylone) afin d'irriguer la Mésopotamie vers l'an 2000 avant J.-C. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. Les chinois ont également exploité la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau.

Le début du Moyen Age a vu l'apparition des moulins en Europe avec comme application l'assèchement des lacs et terrains inondés au Pays-Bas ainsi que la moudre de grains.

La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIX^{ème} siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950, Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour améliorer notamment la technologie des aérogénérateurs.

L'industrie espagnole de l'énergie éolienne a remporté des victoires remarquables tant dans la conception que dans la fabrication des aérogénérateurs. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985 à 16 813 MW en 2007 à 25 170 MW en 2008 et en 2009 35.159 MW qui occupe la première place en production d'énergie éolienne. En 1991, l'Espagne avait seulement 7 MW de puissance installée; à la fin de 2008, elle cumulait 16 689 MW de puissance installée et se hissait au troisième rang et au quatrième rang en 2009 avec 19.149, de tous les pays du monde en matière de production d'énergie éolienne. [6].

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pales par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnent à vitesse fixe et sont directement reliées au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'interface d'électronique entre la génératrice et le réseau. [7].

I.2.2 L'énergie éolienne en quelques (mots et chiffres) :

I.2.2.1 L'énergie éolienne pour quoi faire :

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de notre activité, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait :

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètres sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètres pouvant produire jusqu'à 4.5MW.

I.2.2.2 Rapport mondial sur l'énergie éolienne 2009. [3]

- La capacité mondiale a atteint 159 213 MW, dont 27 261 MW ajoutés en 2008, et 38 313 MW ajouté en 2009.
- L'énergie éolienne a poursuivi son essor en 2008 avec une croissance de 29%, en 2008 et 31.7% en 2009.
- La tendance d'un doublement de capacité tous les trois ans se confirme.
- L'ensemble des éoliennes installées fin 2008 représente une production annuelle de 260 TWh par an, soit plus de 1.5% de la consommation électrique globale, et de 340 TWh par an en fin 2009 soit égale à 2% de la consommation électrique globale.
- Le secteur éolien est devenu un créateur global d'emploi, avec 440 000 emplois au niveau mondial en 2008 et de 550 000 emplois fin 2009.
- Le secteur éolien a représenté en 2008 un chiffre d'affaires de 40 milliards d'euros et 50 milliards d'euros en 2009.
- Pour la première fois depuis 10 ans, les Etats-Unis ont pris la première place devant l'Allemagne en termes d'équipement total en 2008, puis elle conserve la première position en termes de capacité totale installée.
- La Chine demeure en 2008 le marché éolien le plus dynamique, faisant plus que doubler ses installations pour la troisième année consécutive, avec maintenant 12 GW installés, elle conserve son rôle de locomotive de l'industrie éolienne

internationale et a installé 13 800 MW en une seule année, devenant ainsi le plus gros marché pour les éoliennes neuves, en faisant plus que doubler ses installations pour la quatrième année consécutive.

- L'Asie représente la plus importante part des nouvelles installations (40.4 %), suivi de l'Amérique du Nord (28.4%) et de l'Europe qui descend à la troisième place (27.3%).
- Avec un développement accéléré et de futures politiques de développement, une capacité mondiale de plus de 200 000 MW en 2010, et de plus de 1 900 000 MW est possible pour l'année 2020.

Rang	pays	2000	2002	2004	2006	2007	2008	2009
1	USA	2 550	4 708	6 740	11 603	16 818	25 237	35 159
2	CHI	302	399	764	2 599	5 912	12 210	26 026
3	ALL	5 430	12 001	16 629	20 622	22 247	23 897	25 777
4	ESP	2 250	4 144	8 263	11 630	15 145	16 689	19 149
5	IND	1 167	1 702	3 000	6 270	7 850	9 587	10 925

(Tab. I.1) Puissance éolienne dans les Leaders en 2009.

Le marché des éoliennes neuves a montré une croissance de 42% pour atteindre un total de 38 312 MW, pour 27 261 MW en 2008, 19 766 MW en 2007 et 15 127 MW en 2006. Il y a dix ans, ce marché représentait 2 187 MW, soit moins d'un dixième du marché de 2003. Pour comparaison, aucun réacteur nucléaire n'est entré en activité en 2008, selon l'Agence Internationale de l'Energie Atomique.

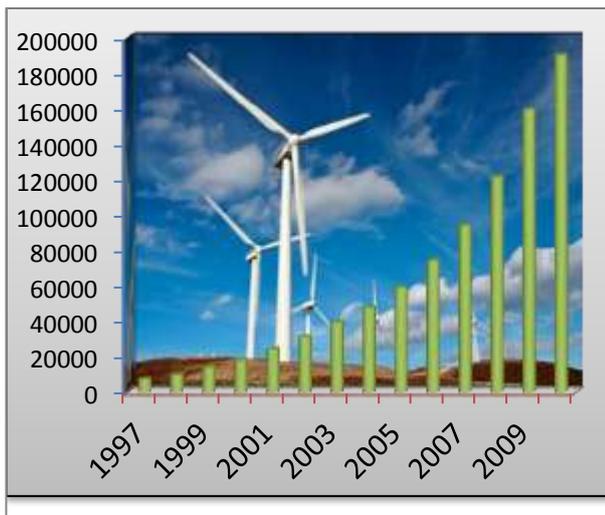


Fig. I.1 Capacité des installations éolienne (mondiale en MW).

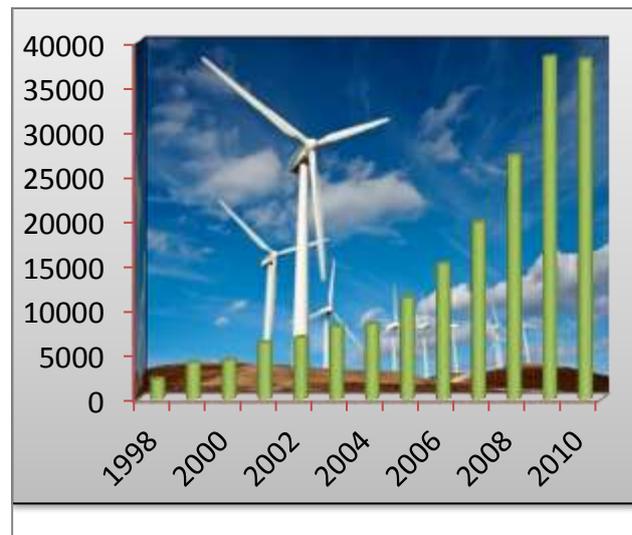


Fig. I.2 Capacité des installations éolienne (nouvelle en MW).

I.2.2.3 Les principaux marchés en 2009

En 2009, 82 pays en tout utilisent commercialement l'énergie éolienne, dont 49 qui ont accru leur capacité de production. La Chine et les Etats-Unis se sont placés, de beaucoup, comme les deux plus gros marchés pour les nouvelles installations, représentant à eux deux 61.9 % de la capacité ajoutée, une proportion supérieure à celle de l'année dernière (53.7 %).

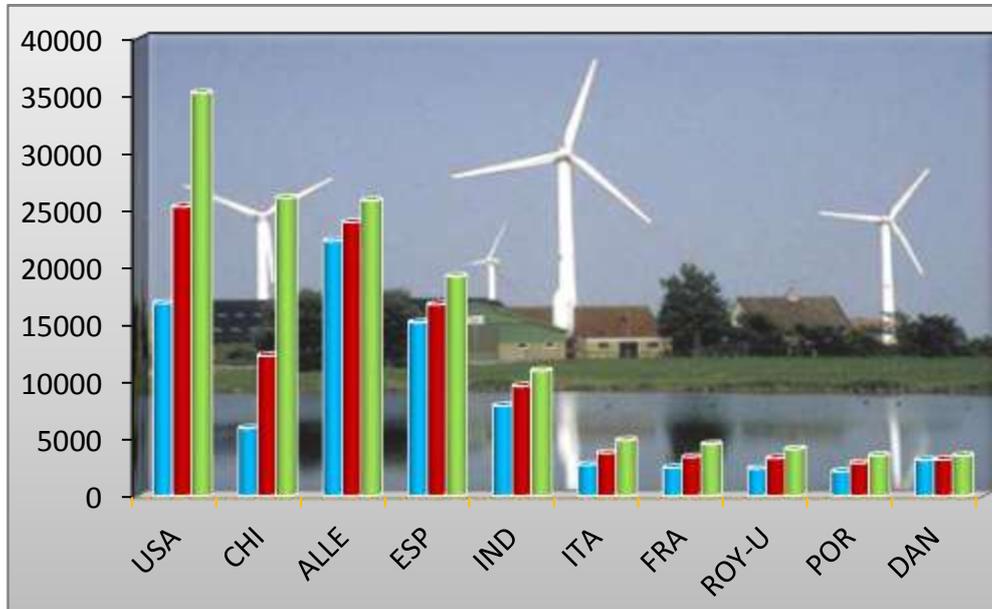


Fig. I.3 Les 10 pays ayant les plus fortes croissances plus de 100 MW. (2007 2008 2009)

Les Etats-Unis et la Chine représentent ensemble 38.4 % du total mondial installé. Les cinq premiers pays (Etats- Unis, Chine, Allemagne, Espagne et Inde) représentent 72.9 % du total, légèrement plus que les 72.4 % de 2008.

Pour la première fois, l'Europe représente moins de la moitié de la Capacité totale : lors des années passées, la part de l'Europe est tombée de 65.5 % en 2006 à 61 % en 2007, 54.6 % en 2008 puis 47.9 % en 2009.

Alors qu'il y a cinq ans l'Europe dominait le marché mondial des éoliennes avec 70.7 % de la nouvelle capacité installée, l'Europe est descendue à la troisième place en 2009 avec seulement 27.3 % de la capacité installée en 2009 (2008 : 32.8 %), juste derrière l'Amérique du Nord (28.4 %, après 32.6 % en 2008). L'Asie est devenue le continent leader, représentant 40.4 % des nouvelles éoliennes installées (31.5 % en 2008).

L'Amérique Latine (1.5 %, 0.6 % auparavant) et l'Afrique (constante à 0.5 %) restent des parts mineures de la capacité totale. Les deux continents ont augmenté leur part dans les nouvelles installations à 1.5 % pour l'Amérique Latine (2008 : 0,4 %) et 0.4 % pour l'Afrique (2008 : 0.3 %).

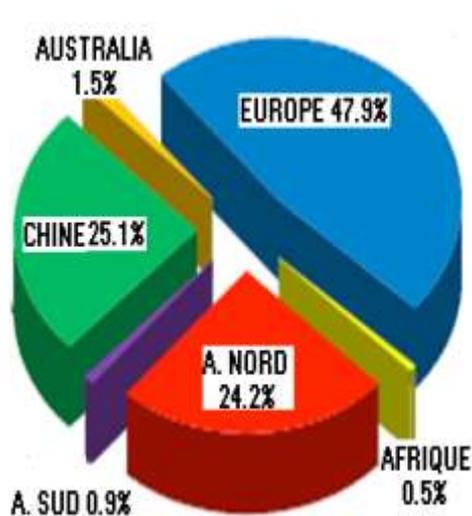


Fig. I.4 Capacité dans chaque continentale (nouvelle et totale).

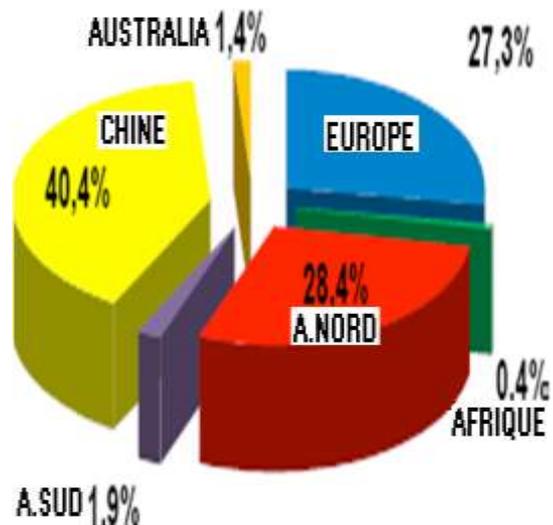


Fig. I.5 Capacité dans chaque continentale (nouvelle et totale).

La totalité des éoliennes installées fin 2009 contribuent à hauteur de 340 TW.h à la production mondiale d'électricité, ce qui représente 2 % de la demande électrique totale. Cette quantité d'énergie est égale aux besoins électriques de l'Italie, pays industrialisé de 60 millions d'habitants et septième économie mondiale.

Dans certains pays et certaines régions, l'éolien est devenu une des principales sources d'électricité, les parts les plus élevées étant :

- Danemark : 20 %
- Portugal : 15 %
- Espagne : 14 %
- Allemagne : 9 %

I.2.2.4 Taux de croissance en hausse depuis 2002.

Le taux de croissance est le rapport entre la nouvelle capacité installée et la capacité totale installée l'année précédente. Le taux de croissance s'accroît continuellement depuis l'année 2004, atteignant 31.7 % en 2009, le taux le plus élevé depuis 2001, après 29.0 % en 2008, 26.6 % en 2007, 25.6 % en 2006 et 23.8 % en 2005. Les taux de croissance les plus élevés de l'année 2009, avec plus de 100 %, peuvent être trouvés au Mexique, qui a quadruplé sa capacité installée, en Turquie (132 %) qui avait le plus fort taux de croissance les années passées, en China (113%) ainsi qu'au Maroc (104 %).

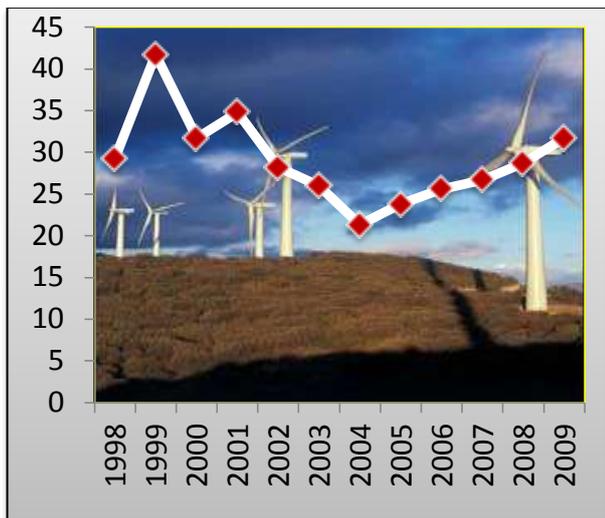


Fig. I.6 Taux de croissance mondiale en (MW)

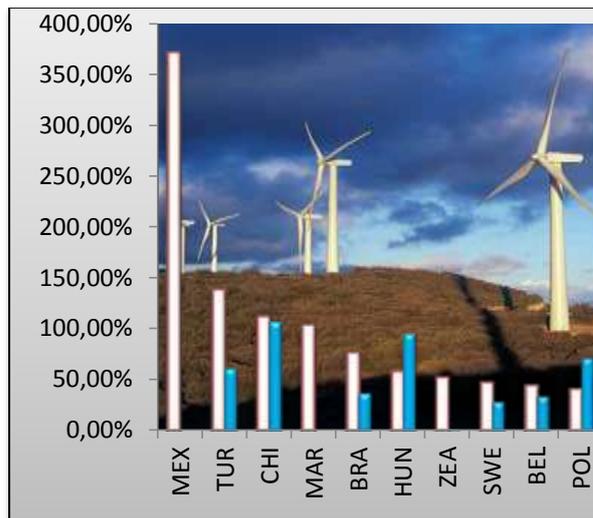


Fig. I.7 Taux de croissance nouveauté en(%)

Les pays d'Amérique latine et d'Afrique comptent respectivement seulement 0.6% et 0.5% de la capacité totale et sont tombés en termes de nouvelles installations à respectivement 0.4% et 0.3% de la capacité mondiale installée en 2008. Quelques parcs éoliens majeurs se trouvent dans des pays d'Afrique du Nord, comme le Maroc, l'Égypte ou la Tunisie.[3].

I.2.2.5 L'éolien offshore

La capacité éolienne offshore a poursuivi sa croissance en 2009. A la fin de l'année, les parcs éoliens installés en mer concernaient douze pays, soit dix se trouvant en Europe et des installations mineures en Chine et au Japon. La capacité totale installée s'élève à près de 2 GW, soit 1.2 % de la capacité totale mondiale. Des éoliennes pour une puissance de 454 MW ont été ajoutés en 2009, avec principalement de nouveaux parc offshore au Danemark, au Royaume-Uni, en Allemagne, en Suède et en Chine.

Le taux de croissance de l'éolien offshore est, à 30 %, légèrement en deçà du taux global de l'énergie éolienne. Au Danemark, le plus puissant parc éolien offshore a ainsi été inauguré en Mer du Nord : Horns Rev II, 209 MW. La Chine a installé le premier parc éolien majeur en dehors de l'Europe, de 21 MW, près de Shanghai.



Fig. I.8 les plus grand offshore du monde (Horns Rev 160 MW 80 x 2 MW)

I.2.2.6 Perspectives mondiales

Sur la base de l'expérience et des taux de croissance des années passées, prévoie que l'énergie éolienne continuera son développement dynamique dans les années à venir. Malgré les impacts à court terme de la crise financière actuelle qui rendent difficile les prévisions à court terme, on peut attendre, qu'à moyen terme, l'énergie éolienne attirera les investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable.

En calculant rigoureusement et en prenant en compte des facteurs d'insécurité, on estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 16% de la consommation électrique mondiale. Une capacité globale d'au moins 1 900 000 MW peut être attendue pour 2020, [3].

I.2.2.7 L'éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar, [8].

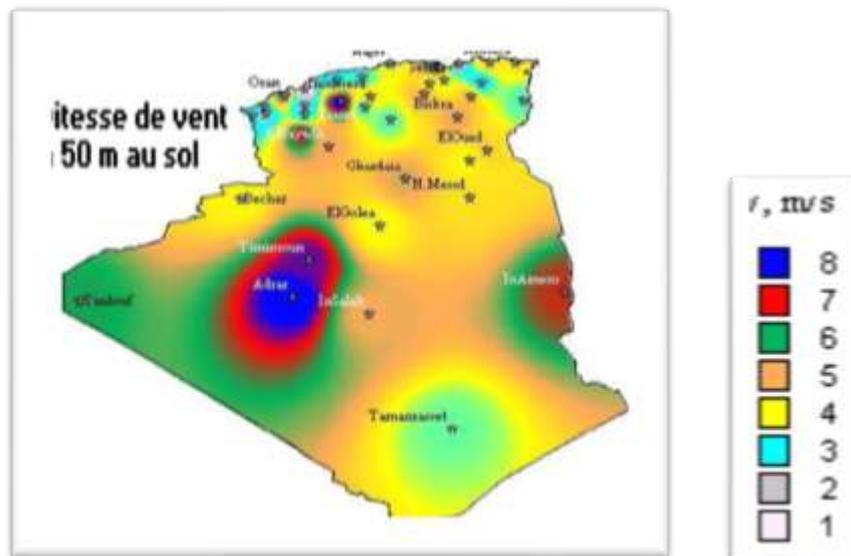


Fig. I.9 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent 50m du sol en (m/s) en Algérie, [8].

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie, [9].

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes, [9]:

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens.

I.2.2.8 Projet à faire en l'Algérie

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ.

Le potentiel éolien, technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007, [4].

Les trois régions situées au sud ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an.

La fig. I.9 présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne.

I.2.2.9 Emplacement des parcs éoliens:

Un parc éolien est une installation de production d'électricité pour le réseau électrique national par l'exploitation de la force du vent. Il s'agit d'une production au fil du vent, analogue à la production au fil de l'eau des centrales hydrauliques. Il n'y a donc pas de stockage d'électricité.

Un parc éolien est composé principalement :

- d'un ensemble d'éoliennes.
- d'une voie d'accès.
- d'un réseau d'évacuation de l'électricité.

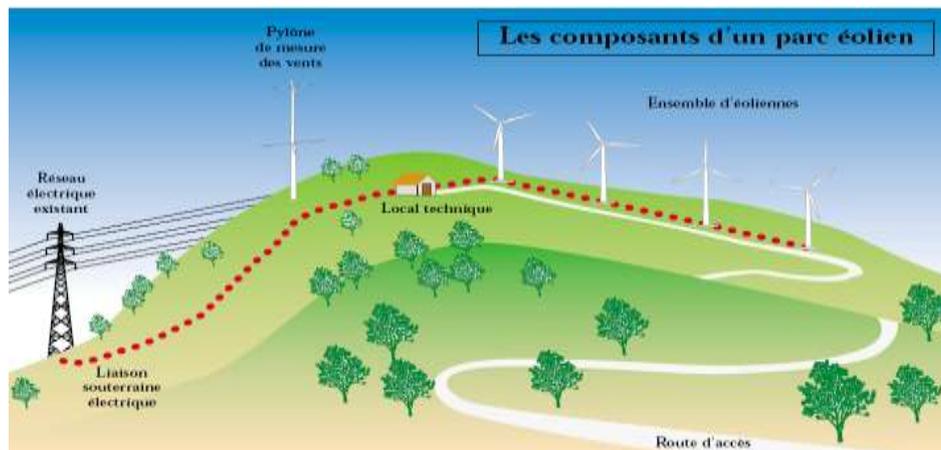


Fig. I.10: Les composants d'un parc éolien.

Les parcs éoliens se situent là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs

éoliens sont construits, ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la (Fig. I.10).



Fig. I.11 Installation d'un parc éolien.

I.3 Constitution d'une éolienne.

I.3.1 Principe

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. 1-9).

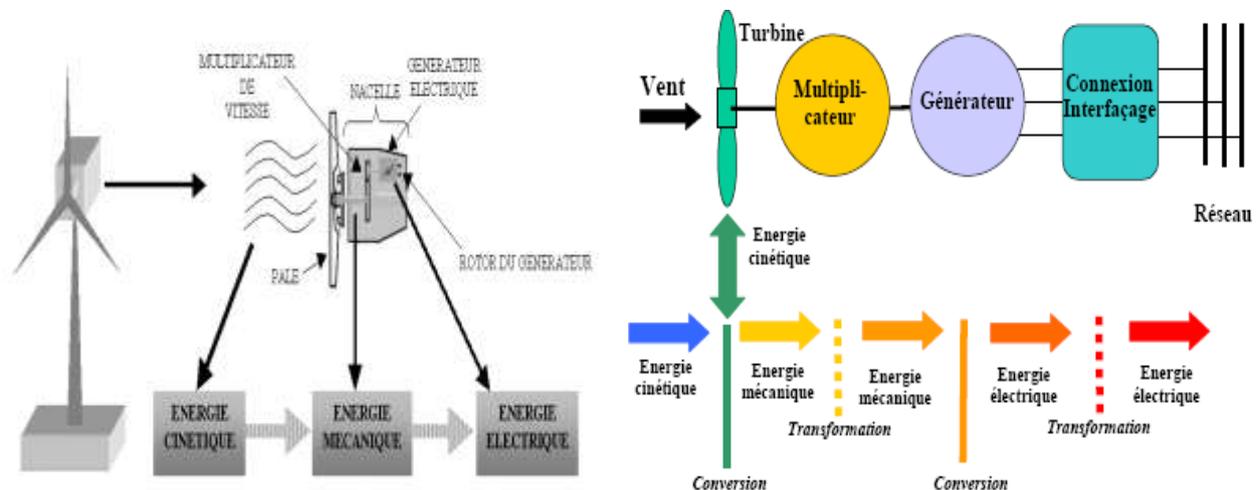


Fig. I.12 Conversion de l'énergie cinétique du vent

Cette conversion se fait en deux étapes [10, 5] :

- Au niveau de la **turbine**, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Au niveau de la **génératrice**, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique. [13].

I.3.2. Types des turbines éoliennes

Il existe deux types d'éoliennes modernes ; celle à axe horizontal dont le rotor ressemble à une hélice d'avion, et éoliennes à axe vertical dont la forme s'apparente à celle d'un batteur à œuf à l'envers. Dans les deux cas, les éoliennes capturent l'énergie du vent et la transforment en énergie électrique (aérogénérateur) ou mécanique (éolienne de pompage, de sciage, etc.), ils sont illustrés sur la (Fig. I.12). On peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ .

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. [11 13].

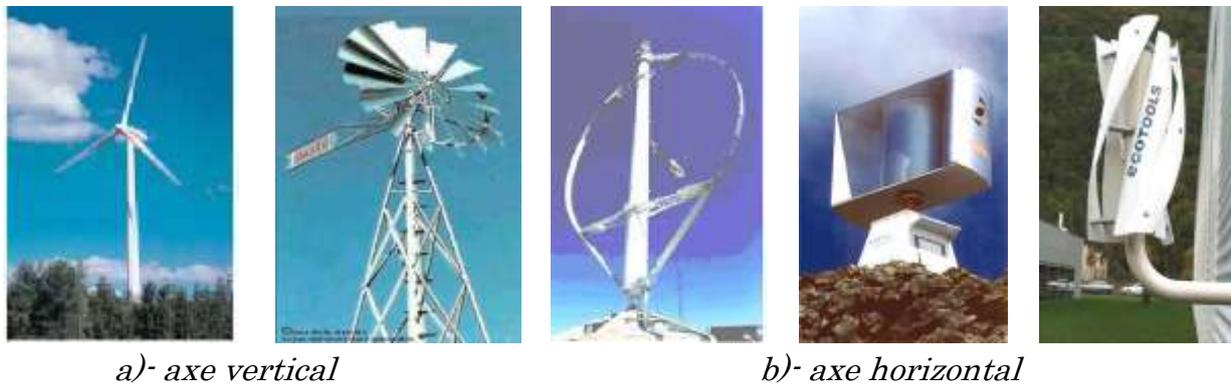


Fig. I.13 Types d'éolienne

I.3.2.1. Eoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [11, 15].

Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

Inconvénients

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elles fonctionnent avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle et la variation cyclique d'incidence.

La traînée différentielle : Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est le suivant: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Fig. I.14). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le rotor de Savonius, du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Le fonctionnement est ici amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur.



Fig. I.14 Effet du vent sur un corps creux (Le rotor de Savonius).

Le rotor de Savonius, étant très simple, présente un intérêt pour les pays très peu industrialisés car il est facile à fabriquer. De plus, il démarre à de faibles vitesses de vent, de l'ordre de 2 m/s. Les dimensions des machines à rotor de Savonius restent toutefois modestes, 3 à 4 m de hauteur maximale pour des diamètres de 2 m environ.

Variation cyclique d'incidence : Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. Ce principe de fonctionnement

a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (Fig. I.15).



Fig. I.15 éolienne de Darrieus de 4.2MW et 100m de diamètre

I.3.2.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [10, 11].

Avantage

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

Dans le reste de notre étude, nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch).

I.3.3. Constitution d'une éolienne moderne :[10].

La (fig. I.16), représente une Chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N80 (2.5MW).

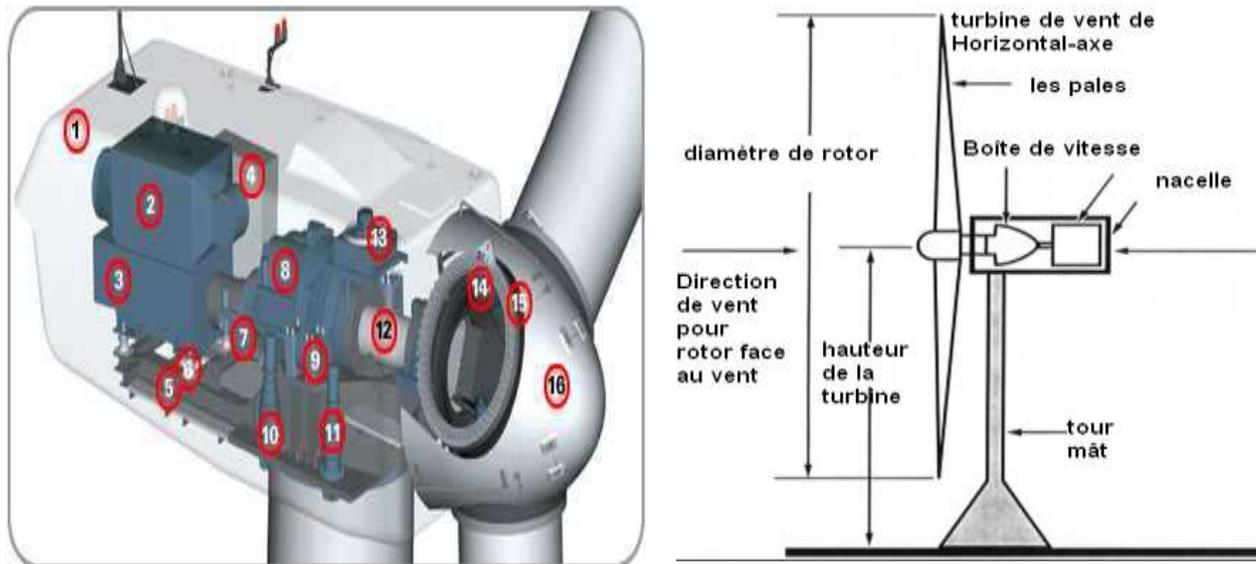


Fig. I.16 Différentes parties de l'éolienne NORDEX N80 (2.5MW).

Un mât, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile. La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.

I.3.3.1. le rotor:

Fait tourner le mécanisme d'entraînement et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, pour résister à l'action des éléments. On les construit habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, en plastique renforcé ou en bois. Le rotor ne tourne pas trop vite. C'est le diamètre des pales qui détermine la quantité d'électricité produite par le système, L'éolienne compte habituellement deux

ou trois pales, Le rotor à trois pales réduit les contraintes mécaniques que subit le système, mais son coût est plus élevé.

Les rotors à **pas variable** : le mécanisme est presque idéal, car on optimise la vitesse de rotation et la puissance (presque constante), en fonction du vent disponible. Mais un tel dispositif est complexe et coûteux.

Les rotors à **pas fixe** : néanmoins ralentir automatiquement à partir d'une certaine vitesse. La conception des pales conduit à un effet aérodynamique qui réduit l'efficacité du rotor. Cette technologie entraîne néanmoins une variation plus importante des vitesses du rotor et exige de réguler davantage le courant de sortie. En outre, par vents forts, et bien que la turbine ralentisse, les pales, toujours face au vent, exercent de fortes pressions sur la nacelle et le mât.

I.3.3.2 La nacelle.

Située en haut de la tour et qui comporte toute l'installation de production d'électricité: le multiplicateur, le (ou les) générateur(s), les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés.

I.3.3.3 Le pylône.

Le pylône ou tour son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor plus nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. La tour cylindrique est une structure en acier d'une hauteur comprise entre 60 et 100 mètres, à l'intérieur de laquelle se trouvent l'échelle d'accès et les câbles électriques de raccordement au réseau.

I.3.3.4 Moyeu.

En général c'est une pièce d'acier moulé, il reçoit les pales sur des brides normalisés et se monte sur l'arbre lent du multiplicateur. Pour sa conception on utilise les éléments finis. Il est souvent protégé par une coupe polyester forme d'obus qui a une forme aérodynamique (plus esthétique que fonctionnelle)

I.3.3.5 Les pales.

Les pales sont une partie très important des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales:

- La longueur.
- La largeur.
- Le profil.
- Le matériau.
- Le nombre.

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par des hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tels que : coûts, résistance au climat.



Fig. I.17 Pales de 39 m sur une NORDEX N80 (2.5MW).

- **Longueur.**

Le diamètre de l'hélice est en fonction de la puissance désirée, la détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales due à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail des pales en fatigue et les risques de vibration, surtout pour les très longues pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent. Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30m.

- **Largeur :**

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera large. Mais pour obtenir des vitesses de rotations élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

- **Le profil :**

Il est choisi en fonction du couple désiré. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 KW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice. Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices)

- **Les matériaux :**

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère. Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légères, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- ❖ **Le bois** : il est simple, légère, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue, mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
- ❖ **Le lamellé-collé** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue à la fatigue.
- ❖ **Les alliages d'aluminium** : pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- ❖ **Les matériaux composites** : Leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

I.3.3.5.1 Nombres de pales.

Les éoliennes à marche lente ont généralement entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel aux nombres de pales et au diamètre; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée. Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risque de vibration, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

I.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne. [10, 19, 22]

Si la vitesse du vent augmente, grâce au calculateur et une girouette située à l'arrière de la nacelle, une commande aux moteurs d'orientation, l'éolienne se déplace face au vent. Les trois pales sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'axe lent, le multiplicateur, l'axe rapide et la génératrice asynchrone.

Dès que la vitesse du vent est suffisante (15km/h), l'éolienne peut être couplée au réseau. Les pales tournent alors à environ 30tr/mn et entraînent la génératrice à 1515 tr/mn. Cette vitesse de rotation restera constante tout au long de la période de production. Lorsque la vitesse du vent atteint 50km/h l'éolienne fournit sa puissance nominale. La génératrice délivre alors une tension et courant électrique alternatif dont la puissance varie en fonction de la vitesse du vent.

Pour des vitesses du vent supérieur à 50km/h, la puissance est maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leur roulement.

Lorsque la vitesse du vent dépasse 100km/h, les pales sont mises en drapeau (parallèle à la direction du vent) et leur portance devient quasiment nulle. L'éolienne cesse alors de tourner : elle ne produit plus d'électricité. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 100km/h, le rotor tourne ((en roue libre)) et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en production.

Toutes ces opérations sont entièrement automatiser. En cas d'arrêt d'urgence un frein à disque placé sur l'axe rapide permet de mettre l'éolienne en sécurité. Au pied de chaque éolienne, un transformateur convertit la tension produite en tension du réseau sur lequel toute l'électricité produite est déversée.

Un système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique est utilisé pour refroidir la génératrice, et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

I.4.1 Action du vent sur les pales de la turbine:

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface [5, 10, 12, 24]. La (fig. I.15), illustre une coupe transversale d'une pale, vue du bout de la pale, qui se déplace dans un vent incident de vitesse V_0 .

Du fait de la rotation, le tronçon de largeur dr situé à une distance r du moyeu est soumis en plus du vent incident de vitesse V , à un vent apparent V que se crée la pale en tournant. La vitesse de ce vent relatif est donnée par :

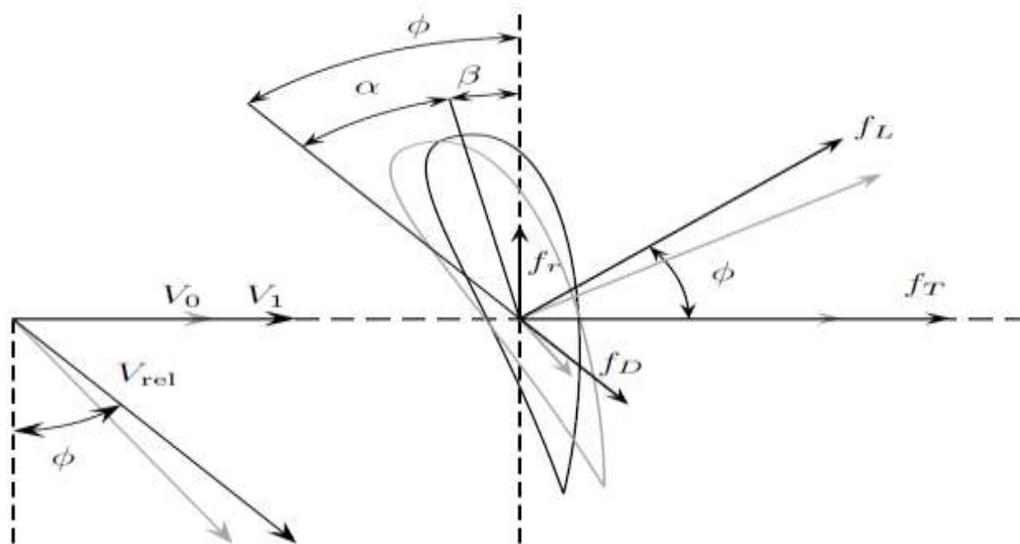


Fig. I.18 Bilan des forces sur un tronçon d'une pale

$$V = r \times \Omega t \quad (I.1)$$

Où : r est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale en r .
 Ωt Est la vitesse de rotation de la turbine en rd/s .

La composition de vitesses de ces deux vents, incident V_0 et apparent U donne la vitesse du vent réel V_{rel} au quel est soumise la pale.

$$V_{rel} = V_0 + U \quad (I.2)$$

La vitesse résultante du vent relatif V_{rel} fait un angle **d'attaque** Ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\Psi = \text{Arctan}\left(\frac{V_0}{U}\right) \quad (I.3)$$

On introduit alors l'angle dit **d'incidence**, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent relatif :

$$\alpha = \Psi - \beta \quad (I.4)$$

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur dr et de longueur de corde à une distance r de l'axe de rotation une force résultante dF :

On peut décomposer la force résultante dF de la manière suivante:

- La portance dL , normale à la direction du vent apparent.
- La force de trainée, dD parallèle à la direction du vent.

Ces deux forces sont généralement exprimées en fonction du coefficient de portance C_L et du coefficient de trainée C_D [25].

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- la poussée axiale dF_a , perpendiculaire au plan de rotation.
- la poussée tangentielle dF_t , dans la direction de rotation.

$$dL = \rho \frac{dA}{2} \times V_r^2 \times C_L(\alpha) \quad (I.5)$$

$$dD = \rho \frac{dA}{2} \times V_r^2 \times C_D(\alpha) \quad (I.6)$$

Où : ρ Densité de l'air. dA : Surface du tronçon balayé par le rotor de la turbine. C_L α , C_D α coefficient de portance et coefficient de trainée respectivement.

Ces coefficients C_L α et C_D α dépendent fortement de l'angle d'incidence α (Fig. I-19). Pour des angles faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados.

La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici, elle aspire la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la trainée. La trainée augmente en général si la surface exposée à la

direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles α importants.

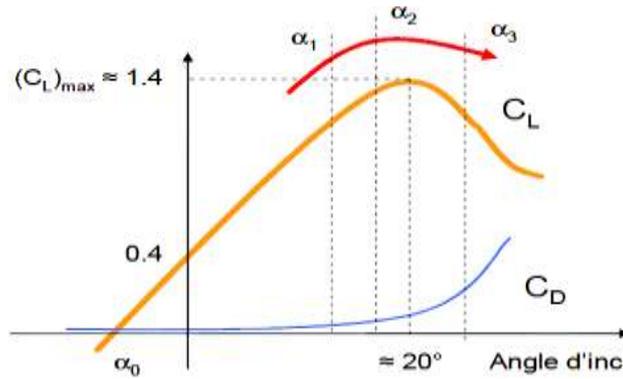


Fig. I.19 Evolution des coefficients de portance C_L et de trainée C_D

La résultante de ces deux forces peut être décomposée en une composante axiale et une autre tangentielle. La composante axiale de coupure par unité de longueur soit donnée par :

$$dF_a = [dL \times \cos \Psi + dD \times \sin \Psi] \tag{I.7}$$

$$dF_t = [dL \times \sin \Psi - dD \times \cos \Psi] \tag{I.8}$$

Cette force tangentielle doit être supportée par le rotor, la tour et les fondations. D'une autre part, la force tangentielle développe un couple de rotation qui produit le travail utile.

La somme des intégrales sur toutes les pales, des composantes horizontales et verticales des forces de portances et de trainée, permet le calcul de la force de poussée axiale et du couple aérodynamique (couple capté par la turbine). Ainsi ces expressions sont les suivantes.

$$F_a = \sum_{K=1}^{N_p} \int_{R_m}^R dF_a \ r \ dr \tag{I.9}$$

$$\Gamma_t = \sum_{K=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r \times dF_t \ r \ dr \tag{I.10}$$

$$\Gamma_t = \rho \frac{dA}{2} \times V_r^2 \times r \times [C_L(\alpha) \times \sin \phi - C_D(\alpha) \times \cos \phi] \tag{I.11}$$

N_p est le nombre de pales, R est le rayon de l'aéroturbines et R_m est la distance du centre du moyeu au coin de la pale côté moyeu.

La force axiale est importante à connaître pour calculer les efforts subis par les pales et la tour. Seule la portance contribue à la génération du couple utile, la trainée crée plutôt un couple dans le sens inverse. Par conséquent, un rapport élevé entre la portance et la trainée C_L/C_D est fortement conseillé pour avoir un bon rendement de la turbine. [25].

L'intégration le long N_p des pales des couples élémentaires exercés sur chaque « tronçon », Permet d'obtenir après calcul le couple Γ_T puis l'expression de la puissance captée soit comme suit.

$$P_T = \Gamma_T \times \Omega_T \quad (I.11)$$

I.4.2 Contrôle de la puissance

Comme nous venons de le voir au paragraphe précédent, le couple éolien est en fonction du carré de la vitesse du vent sur laquelle on n'a aucune action, mais aussi il est en fonction de l'angle d'incidence α que nous pouvons modifier sa valeur. Le contrôle de puissance peut se faire donc à chacun des deux niveaux de conversion de l'énergie et de différentes manières suivant les conditions de fonctionnement.

- Au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance convertie pour les vents forts. Plusieurs méthodes sont utilisées.
- Au niveau du générateur, en particulier pour les structures à vitesse variable. Ceci permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens.

Le système de contrôle d'un système générateur éolien peut par ailleurs être séparé en trois niveaux fonctionnels essentiels [1,16].

- Le système de contrôle des grandeurs physiques. Il s'agit d'assurer la régulation et l'asservissement des grandeurs autour des valeurs de consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.
- Le système de gestion et d'élaboration des lois de consignes et de gestion des protections.
- Le système de gestion de l'ensemble dans un parc éolien. C'est le niveau de contrôle supérieur qui gère un certain nombre d'éoliennes en fonction de la demande provenant des contraintes d'utilisation du réseau électrique.

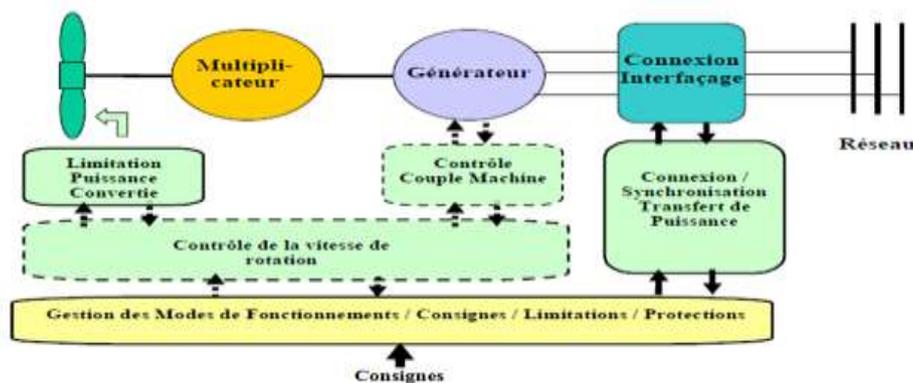


Fig. I.20 Structure générale de contrôle d'un système éolien

I.5 Méthodes de contrôle de l'aéroturbines

Comme le montrent les expressions des forces précédemment données, celles ci augmentent rapidement avec le vent apparent (réel) et la puissance correspondante peut devenir rapidement supérieure à la puissance nominale de la machine. Il faut

donc à un moment donné pouvoir limiter le couple. Le réglage du couple, donc de la puissance captée par la turbine, se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend principalement de l'angle d'incidence α . Le réglage de la puissance va donc se faire par action sur β et α

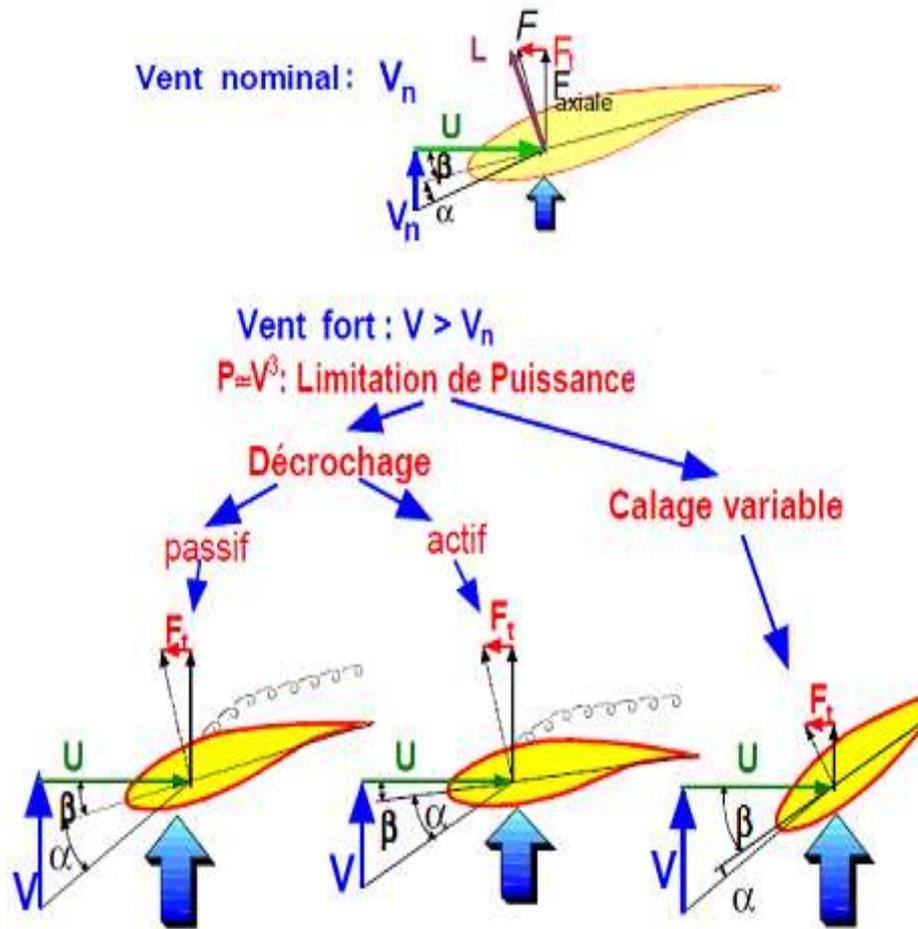


Fig. I.21 Différentes techniques de contrôle des aéro turbines

Il existe trois méthodes de contrôle qui sont décrites sur la (Fig. I-21). Elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais certaines peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine [10, 25].

Passif stall, Cette technique est la forme la plus simple de commande de puissance des aéro turbines. L'angle de calage β est fixe, alors que l'angle d'incidence α augmente naturellement avec la vitesse du vent incident, (Fig. I.21). Cette augmentation provoque une augmentation de la traînée et un décrochage progressif de la pale apparaît si la vitesse de rotation est pratiquement constante. Le couple est maintenu à peu près constant ($\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$) Jusqu'au décrochage total ($\alpha_3 < \alpha$) (chute brutale de CL et accroissement important de CD) ou il chute rapidement. La puissance est donc bien limitée.

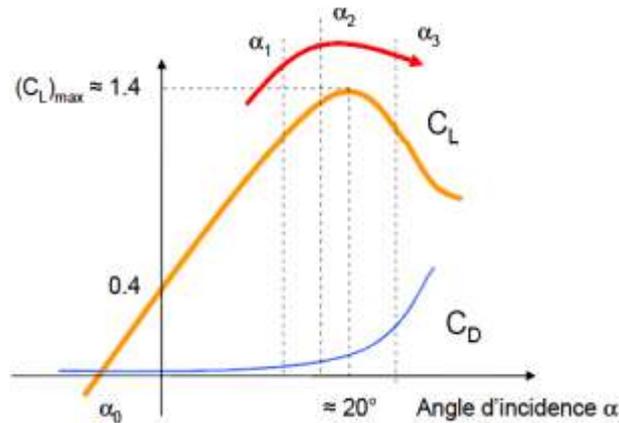


Fig. I.22 *Décrochage à passif stall.*

Ce concept simple et robuste ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine pour s'assurer, à une certaine vitesse du vent, que l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée. En plus il faut disposer de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine en cas de panne empêchant la transmission de la puissance générée au réseau électrique.[10, 24].

Actif stall Cette technique, appelée aussi décrochage par calage négatif des pales (negative-pitch control) [23], est basée sur le même principe que le décrochage passif, mais dans ce cas le décrochage est assuré en diminuant légèrement l'angle de calage β pour augmenter l'angle d'incidence α . Ainsi, le décrochage peut être légèrement avancé ou retardé. L'angle de calage β de quelques degrés (3 à 5° généralement). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total ou il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

Comme pour le décrochage passif, l'utilisation de la technique du décrochage actif nécessite une grande précision sur la géométrie et la vitesse de rotation de la turbine pour assurer le décrochage à la vitesse du vent voulue. En plus, il est nécessaire d'ajouter un système électrique ou hydraulique pour orienter les pales lorsque la vitesse de rotation nominale de la machine sera atteinte.

Pitch contrôle Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales β , donc l'angle d'incidence α , jusqu'à quelques dizaines de degrés en fonction de la vitesse du vent (20° à 30° généralement). Ainsi, les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales seront réduites (à la fois pour la Portance et pour la traînée), (Fig. I.22), Tout en maintenant un couple pratiquement constant qu'on peut l'annuler par mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$). La puissance est donc bien limitée [18].

Avantages : La diminution de l'angle d'incidence α (Fig. I.23) ; jusqu'à une valeur nulle ou négative limite toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit

considérablement les efforts à vitesse de vent élevée. Comme la force de poussée axiale est également diminuée, les efforts sur la tour sont réduits. Cet avantage est encore amplifié à vitesse variable puisque l'excès d'énergie pendant une rafale (dont la variation est trop brutale pour que le mécanisme d'orientation puisse compenser les effets) peut être stocké dans l'inertie du rotor par variation de sa vitesse (si le générateur l'accepte) alors que la puissance transmise reste pratiquement constante. Le frein mécanique n'est alors qu'un frein de « parking ». Cet avantage majeur est une raison suffisante pour que cette technique soit la plus utilisée à nos jours

Inconvénients : Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent (Actif stall). L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien.

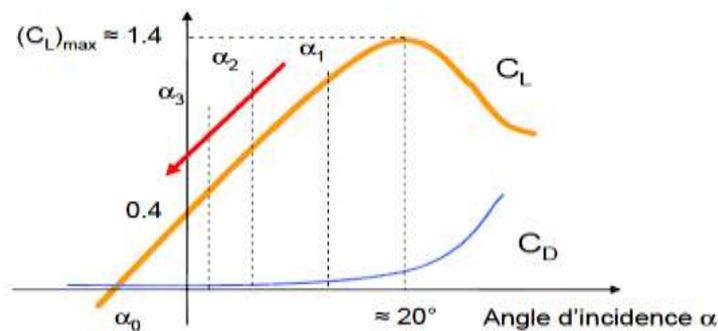


Fig. I.23 Contrôle par calage variable des pales

I.6 Zones de fonctionnement

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n (fig. I -24). Pour des vitesses de vent supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue.

Il y a d'autres grandeurs dimensionnant : V_D la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_M la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [12].

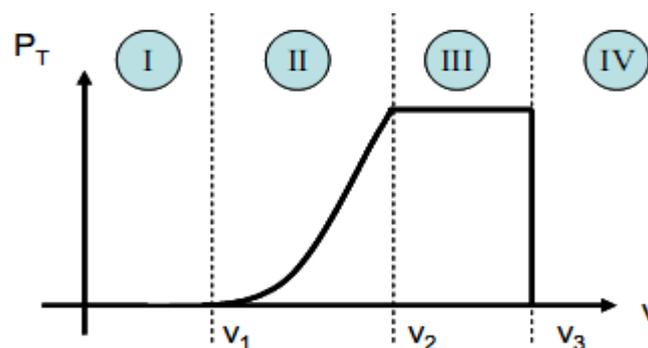


Fig. I.24 Zones de fonctionnement d'une éolienne

Les vitesses V_D , V_n et V_M définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas), vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_r varie entre 2.5 m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du Vent V_r . Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Suivant les constructeurs, V_r varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n . V_M vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour les grandes majorités des éoliennes, V_M vaut 25m/s.
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie. [19, 20].

I.7 Transmission de la puissance

La puissance captée par la turbine est ensuite transmise à la génératrice. Dans le cas où cette génératrice est une machine asynchrone standard (structures appelées MAS, MADA ...), un multiplicateur de vitesse est inséré sur l'arbre afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

Le Tableau I-2 donne quelques exemples de valeurs de rapport de Multiplication pour des éoliennes actuelles.

Constructeur	Eolien	Rapport de vitesse
NEG MICON	NM44 7550KW	55.36
BONUS	1 MW	69
DEWIND	D6.60-1250Kw	48.9
NORDEX	N80-2500KW	67.9

(Tab I-2) : Rapport de vitesse pour des éoliennes actuelles

Le multiplicateur de vitesse permet, outre l'adaptation de vitesse, d'avoir une certaine élasticité entre ce qui se passe côté entrée (source primaire fluctuante) et côté sortie (générateur et réseau). Ceci n'est pas sans conséquences, puisque la majorité de la maintenance sur ces structures concerne le multiplicateur de vitesse qui subit des contraintes importantes. Le multiplicateur introduit donc des problèmes de maintenance (une opération tous les six mois est généralement conseillée), des problèmes de poids (environ 19 tonnes pour l'éolienne N80-2500kW de NORDEX) et des problèmes d'oscillations mécaniques. Certains constructeurs ont donc cherché à le supprimer, système dit à attaque directe. Par conséquent, cela impose alors au générateur électrique d'être capable de tourner à la même vitesse que la turbine, donc présentant un nombre important de paires de pôles, donc une machine spécifique.

Enfin, certains constructeurs ont commence à proposer récemment des structures « intermédiaires » composées d'un multiplicateur a rapport réduit (de l'ordre de 10) et d'une génératrice au volume moins important [16].

I.8 Méthodes de contrôle du générateur électrique.

Les générateurs asynchrones sont en grande partie les machines électriques les plus populaires dans l'industrie des générateurs éoliens. Ces dernières années, on trouve aussi les générateurs synchrones particulièrement dans les systèmes à attaque direct (sans multiplicateur de vitesse) et les systèmes autonomes [15].

Suivant la vitesse de rotation, les générateurs éoliens peuvent être organisés en deux catégories principales.

I.8.1 Système a vitesse fixe. (Structure MAS)

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées, ils mettent en œuvre essentiellement des générateurs asynchrones à cage tournant en hyper synchronisme à une vitesse légèrement supérieur au synchronisme [11,12]. Cette caractéristique convient très bien aux turbines à décrochage aérodynamique qui nécessite, pour bien agir, une vitesse de rotation constante.

L'utilisation d'une machine asynchrone à cage, généralement dimensionnée pour une vitesse de rotation de 1500 tr/min pour des raisons d'encombrement et de prix, nécessite l'utilisation d'un multiplicateur de vitesse de rapport relativement élevé [25].

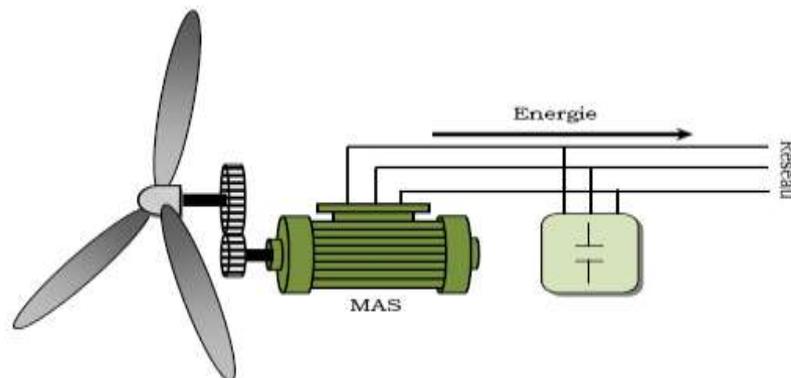


Fig. I.25 (MAS) vitesse de rotation fixe.

On note également que certains constructeurs tel que NEG, MICON, BONUS et NORDEX utilise aussi des machines asynchrone à double stators (à double enroulements) avec nombre de pôles différent, l'un étant utilisé pour les faibles vitesses de vent et l'autre pour les fortes vitesses de vent [16].

En raison de la connexion directe au réseau de la machine asynchrone, le contrôle de puissance pour ce type de systèmes ne peut se faire qu'au niveau de la turbine, soit par décrochage aérodynamique ou par calage variable des pales.

Avantages.

- Utilisation d'une machine standard, robuste et pas chère.
- Aucune interface d'électronique de puissance.
- System de contrôle très simple.

Inconvénients.

- Pas de gestion de la puissance extraite.
- Maintenance de la boîte de vitesse.
- Magnétisation de la machine non gérée.
- Fonctionnement à une plage de vitesse de vent très étroite, donc une production d'énergie très perturbée.

Ces inconvénients ont poussé les industriels à développer d'autres systèmes plus performants et fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large.

I.8.2. Systèmes à vitesse variable

Il existe plusieurs structures possibles que nous pouvons classer suivant la gamme de variation de la vitesse de rotation de la machine électrique utilisée.

I.8.2.1 Vitesse variable par dissipation de la puissance rotorique

Cette structure utilise une machine asynchrone à rotor bobiné dont le stator est connecté directement au réseau électrique et le rotor connecté à un redresseur alimentant une charge. Le contrôle du redresseur permet d'avoir une résistance rotorique équivalente variable permettant une variation de vitesse de l'ordre de 10% au-delà de la vitesse de synchronisme [18, 14].

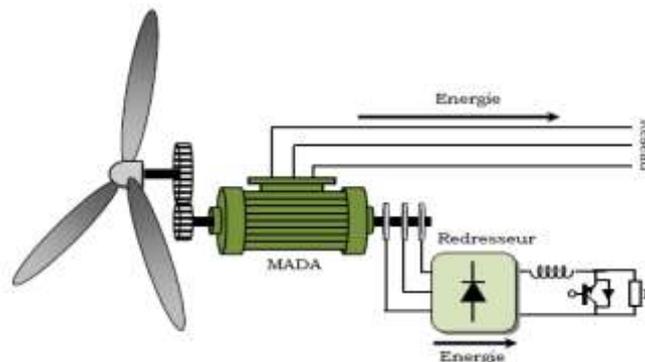


Fig. I.26 *Système à vitesse variable par dissipation de la puissance rotorique.*

Avantages.

- Vitesse variable à environ 10% de la vitesse du synchronisme, mais reste encore une faible variation.
- System de contrôle simple.
- Électronique de puissance faiblement dimensionnée.

Inconvénients.

- Puissance extraite non optimisée.
- Maintenance de la boîte de vitesse et des contacts glissant au rotor de la machine.
- Magnétisation de la machine non gérée.

Cette structure apporte peu d'avantages par rapport à la structure MAS et elle conserve les mêmes inconvénients. Toutefois, on peut la considérer comme un premier pas vers la technologie des éoliennes à vitesse variable.

I.8.2.2 Vitesse variable par double alimentation stator-rotor

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne, [6]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.26). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor,

Actuellement, c'est la structure la plus utilisée vu les avantages qu'elle apporte. En effet, en plus de la vitesse variable, cette structure offre une gestion de puissance très efficace en utilisant une interface d'électronique de puissance dimensionnée à seulement 30% de sa puissance nominale [11,14].

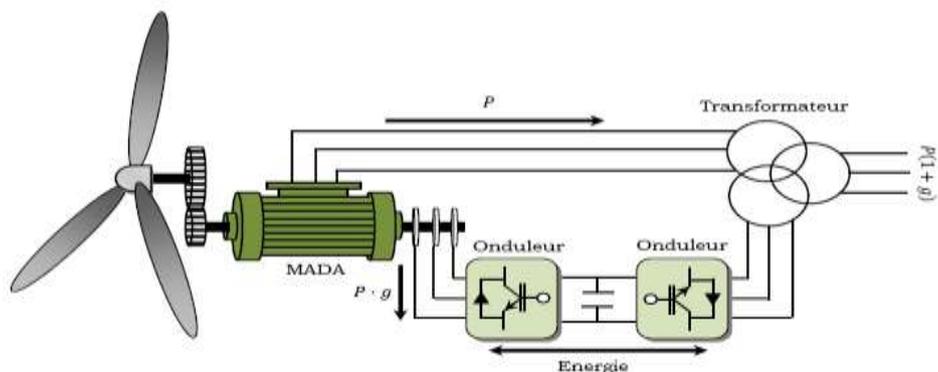


Fig. I.27 *Système à vitesse variable par double alimentation.*

Le contrôle de puissance de la MADA par la commande des deux convertisseurs de puissance permet l'optimisation de l'énergie extraite pendant les vents faibles et moyens d'une part, et le contrôle de l'angle de calage des pales de la turbine permet de limiter la puissance extraite, donc la protection du système, pour les vents forts, d'une autre part.

Avenages

- Vitesse variable à environ $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme.
- Puissance extraite optimisée.
- Électronique de puissance dimensionnée à seulement 30% de P_n .
- Connexion au réseau plus facile à gérer.

Inconvénients

- Maintenance de la boîte de vitesse et des contacts glissants.
- Système de contrôle très complexe.
- Coût d'électronique de puissance relatif.

Cette structure fait l'objet de notre travail et elle sera étudiée profondément dans les autres chapitres de ce mémoire.

I.8.2.3 Vitesse variable par pilotage du stator.

Deux structures sont possibles suivant le type de la machine utilisée, une machine asynchrone ou une machine synchrone. Actuellement, la structure avec machine synchrone est la plus utilisée car la mise en œuvre de machines spécifiques multipolaires permet de supprimer ou de réduire le multiplicateur de vitesse [14]. Cependant, du fait que la fréquence et la tension délivrée par cette génératrice dépendent de sa vitesse de rotation, l'utilisation d'une interface d'électronique de puissance, dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale de la machine, est indispensable [18].

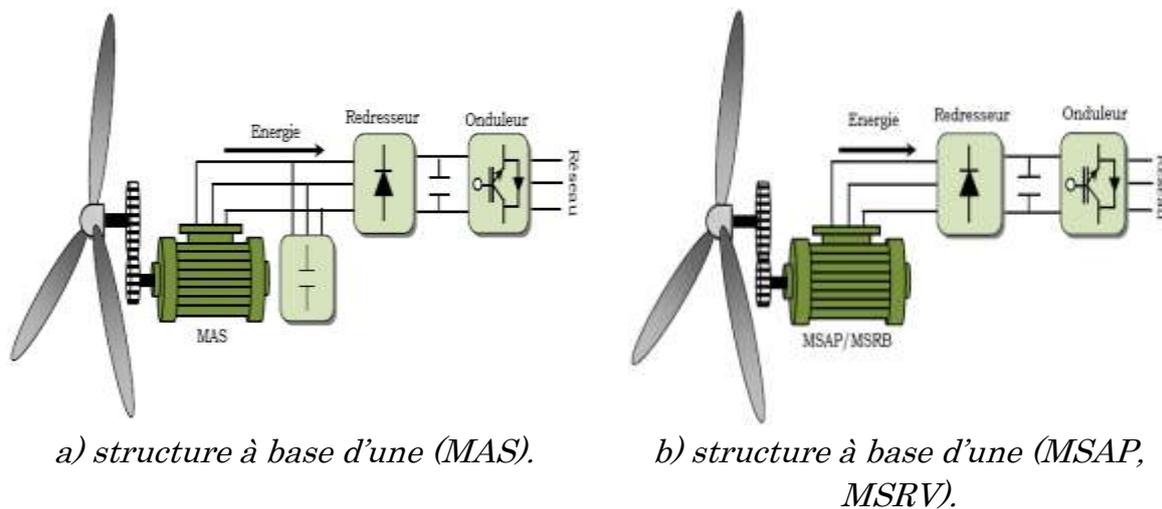


Fig. I.28 Variation de la vitesse de 0 à 100% de la vitesse nominale.

MSRV, La connexion directe au réseau de puissance implique que le MSRB tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur

surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

MSAP, La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

Avenages.

- Vitesse variable sur toute la plage de vitesse.
- Puissance extraite optimisée.
- Connexion au réseau plus facile à gérer.
- Absence du multiplicateur de vitesse (pour les machines synchrones à grand nombre de pôles).

Inconvénients.

- Machine spécifique à plusieurs paires de pôles donc très encombrée et de grand diamètre.
- Électronique de puissance dimensionnée à au moins 100% PN donc plus chère.
- Coût de la machine élevé surtout dans le cas d'une machine synchrone à aimant.

I.8.2.4 Vitesse variable par pilotage avec double stator.

Pour exploiter plus d'énergie de vent par le dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Fig. I.26). Cette machine présente deux enroulements au stator, l'un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l'autre de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

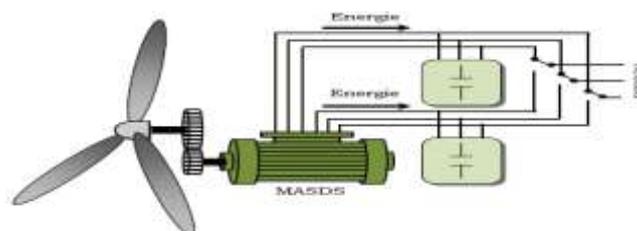


Fig. I.29 *Variation de la vitesse (MASDS).*

I.9 Exemple d'une éolienne haute performance « NORDEX S77 / 1500 KW ».

Rotor

Le rotor se compose de trois pales en plastique renforcé de fibres de verre (GFK), d'un moyeu, de couronnes d'orientation et d'entraînements pour le calage des pales.

Train d'entraînement

Le train d'entraînement est composé de l'arbre du rotor, du multiplicateur, d'un couplage élastique à cardan et de la génératrice.

Le multiplicateur

Le multiplicateur est un engrenage planétaire à deux étages avec un étage à roue dentée droite. Le système de refroidissement consiste en un circuit à capacité de refroidissement graduelle.

Génératrice

La génératrice est de type asynchrone à double alimentation. La génératrice est maintenue à une température de fonctionnement optimale grâce au circuit de refroidissement.

Refroidissement et filtration

Le multiplicateur, la génératrice et le convertisseur ont des systèmes de refroidissement actifs indépendants les uns des autres. Le refroidissement du multiplicateur, de la génératrice et du convertisseur s'effectue par un circuit d'eau qui garantit des températures de fonctionnement optimales pour n'importe quel temps.

Système de freinage

Trois pales indépendantes, dont le dispositif de commande est double, se calent obliquement à la direction du vent par le système de freinage aérodynamique. De plus, le frein hydraulique à disque assiste le processus de freinage en cas d'arrêt d'urgence.

Orientation

La direction du vent est en permanence mesurée par deux girouettes à hauteur du moyeu. En cas de dépassement par rapport à l'écart admissible, la nacelle est orientée par l'intermédiaire de deux moteurs.

Commande et raccordement au réseau

Les éoliennes sont munies de deux anémomètres. Un anémomètre sert à la commande, le second surveille le premier. Sur un moniteur de contrôle placé dans l'armoire électrique, toutes les données d'exploitation peuvent être contrôlées, et diverses fonctions peuvent être commandées. Les données et signaux pour la surveillance à distance des données sont transmis par liaison RNIS.

Caractéristiques :

- Diamètre de rotor : 77 m avec 3pales.
- Vitesse de rotation : 9,6 à 17,3 t/mn.

- Puissance nominale : 1500 kW (pour un vent de 13 m/s).
- Vent de démarrage : 3 m/s.
- Poids 88 000 kg (sans la tour).
- Masse d'une pale : 6500 KG
- Rapport de multiplication de la vitesse de rotation du rotor est de : 104,2.
- puissance récupérée par les 3 pales en fonction de la vitesse du vent est donnée par la fig. I.26
- Masse de moyeu 19500 KG.
- Masse de génératrice 3200 KG

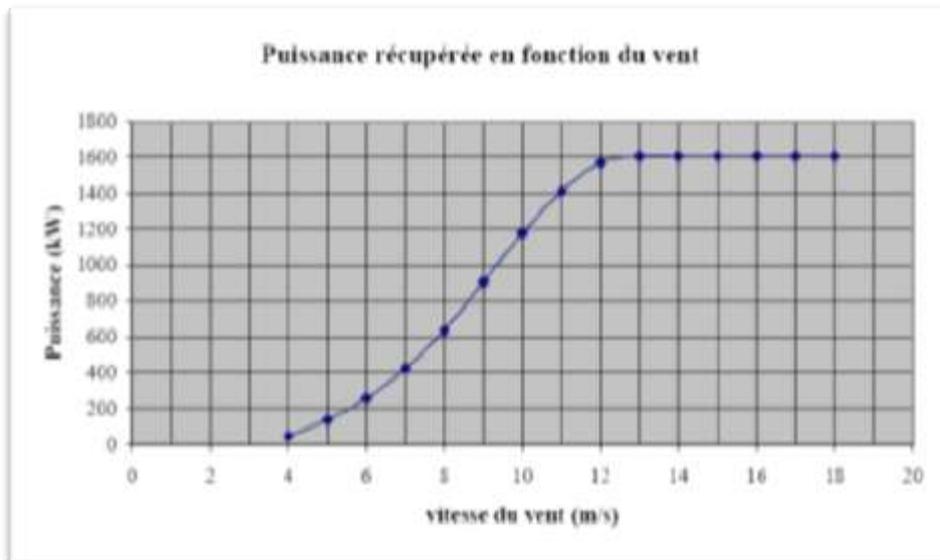


Fig. I.30 Puissance récupérée par les 3 pales en fonction de la vitesse du vent

I.10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur les techniques de contrôle des différentes structures. La structure à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation stator-rotor a tiré notre attention vu les avantages qu'elle présente et qui peuvent être encore améliorés si on l'associe à une turbine à calage variable des pales, c'est la raison pour la quelle nous allons consacrer le reste de ce mémoire pour l'étude de cette structure.

Chapitre II

Modélisation de système générateur éolien

Convertisseur

II.1 Introduction

Le besoin de contrôle des turbines éoliennes remonte à leurs origines d'utilisation. Le but principal était la limitation de la puissance et de la vitesse de rotation pour protéger les turbines des vents forts. A nos jours, les turbines éoliennes sont devenues de taille et de puissances plus grandes, les spécifications de contrôle plus exigeantes et les mécanismes de régulation plus sophistiqués.

Ce chapitre est composé de trois parties :

Dans la première partie, nous commençons par la modélisation de la source primaire, le vent, en essayant d'être le plus proche de la réalité. Les différentes parties mécaniques de l'éolienne seront aussi modélisées sous certaines hypothèses simplificatrices. Ensuite, deux stratégies de commande différentes seront abordées pour chaque zone de fonctionnement de l'éolienne. On terminera la première partie par des résultats de simulation pour vérifier les modèles du système à étudier.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobinée, après avoir effectuée une petite étude de l'état de l'art de la MADA, son principe de fonctionnement et les différents types des MADA. On terminera cette partie par une simulation de la (MADA) en fonctionnement générateur.

Dans la troisième et dernière partie nous présenterons la modélisation de l'onduleur qui alimentera la machine (MADA), ainsi que la commande MLI de ce dernier.

II.2 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

II.2.1 Le vent. D'où vient le vent ? [21].

La terre reçoit 1.75×10^{14} KW de puissance du soleil au forme de rayons solaires, ces rayons réchauffent l'air atmosphérique. L'intensité de ce réchauffement sera plus à l'altitude et écarte alors autour, ceci cause une chute de pression à l'équateur (latitude 0°) car le soleil est directement aérien. L'air autour des poteaux devient moins chaud, car l'angle auquel le rayonnement atteint la surface est plus aigu. La densité d'air diminue avec l'augmentation de la température, ainsi, un air plus léger de l'équateur se lève vers le haut dans l'atmosphère à une certaine autour de cette région, qui attire l'air plus frais des poteaux à l'équateur, ce mouvement d'air cause le vent.

Ainsi, le vent est le produit du gradient de la pression résultant du réchauffement inégal de la surface terrestre par le soleil, l'énergie éolienne est absolument une forme indirecte d'énergie solaire. Tout le rayonnement solaire de un à deux pour cent atteignant la surface terrestre est converti en énergie éolienne.

Le vent décrit ci-dessus, qui est conduit par la différence de la température, est appelé le vent géostrophique, ou généralement le vent global. Ce qui n'est pas affecté par la surface terrestre, est trouvé à des altitudes plus élevées. La rotation de la terre mène à un autre phénomène près de sa surface appelée l'effet de Coriolis, nommé du nom du mathématicien célèbre Gustave Gaspard Coriolis.

La brise de mer c'est un exemple pour l'effet du vent local. Pendant le jour la terre se réchauffe rapidement que la surface de mer. En conséquence, l'air près de la terre se lève, formant une région de basse pression, ceci attire l'air frais à la terre de la mer. On l'appelle la brise de mer. Pendant la nuit c'est l'inverse, car le refroidissement est plus rapide sur la terre, que sur la mer, Ainsi le vent souffle de la terre à la mer, qui s'appelle la brise de terre.

II.2.1.1 Modélisation du vent

Cette partie aurait pu être séparée en plusieurs parties, une de ces parties concernant le vent. Les grandeurs représentant le vent et le comportement aérodynamique sont en fait interdépendantes. Ceci est surtout vrai lorsque l'on utilise, pour simuler le couple capté par une aéroturbine, une méthode simplifiée utilisant un modèle de vent fictif en un seul point de l'aire balayé par le rotor éolien, au lieu d'utiliser le vent incident sur la turbine éolienne.

II.2.1.2 Vent incident sur la turbine éolienne

Le vent est une grandeur stochastique même si certaines de ses caractéristiques sont déterministes. On ne peut pas le représenter par des expressions exclusivement déterministes, ce sont avant tout des paramètres statistiques qui le définissent.

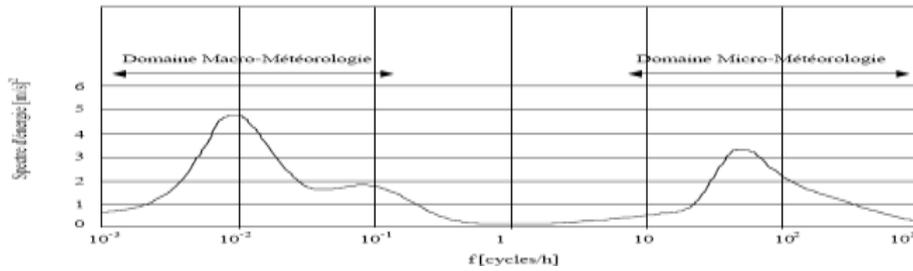


Fig. II.1 *Spectre énergétique de la vitesse du vent longitudinale (Van der Hoven)*

Le spectre énergétique de la vitesse du vent (Fig. II.1) représente l'énergie correspondant à chaque fréquence des fluctuations du vent. Le spectre proposé par Van der Hoven en 1957 montre qu'il y a deux zones principales de fluctuation du vent : une zone macro-météorologique liée aux variations saisonnières ou journalières et une autre micro-météorologique qui correspond aux turbulences (rafales) avec des cycles de l'ordre de la dizaine de secondes [21].

Les variations de la vitesse moyenne du vent sont en effet lentes par rapport à la largeur de la bande passante du système de commande d'un aérogénérateur. Il est bien plus subtil d'utiliser des modèles de vent permettant de retrouver les caractéristiques statistiques d'un vent donné à partir des paramètres simples. Ces caractéristiques peuvent être définies par une densité spectrale de puissance de la turbulence. Deux modèles couramment utilisés sont le spectre de von Karman et celui de Kaimal.

La turbulence n'est pas la seule cause de la non-homogénéité du vent incident sur la turbine. D'autres éléments tels que l'effet d'ombre ou le cisaillement du vent, illustrés sur la Figure (II.2).

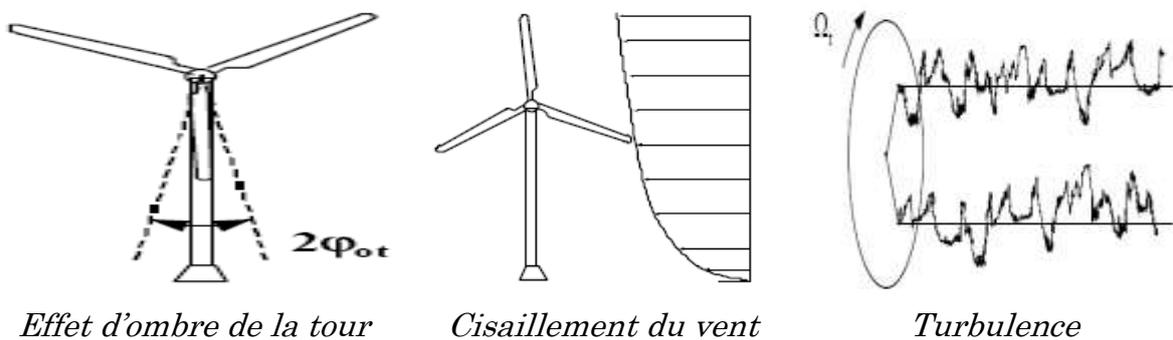


Fig. II.2 *Quelques causes de la non-homogénéité du vent incident sur la turbine*

Le cisaillement est la variation du vent avec l'altitude, conséquence du ralentissement dû au frottement sur le sol de la masse d'air en mouvement. Une loi de variation simple est donnée par l'expression suivante :

$$V_z = V_h \cdot \left(\frac{z}{h}\right)^\mu \tag{II.1}$$

z est l'altitude, h une hauteur prise comme référence et μ , la classe de rugosité, un coefficient dépendant de la nature du terrain ($\mu = 0.5$ pour un terrain totalement dégagé, $\mu = 1.5$ pour une zone agricole avec haies et quelques constructions éparses, $\mu = 3.5$ pour une zone habitée).

L'effet tour (d'obstacle), lui, entraîne un ralentissement du vent au voisinage de la tour. Ces variations modélisables correspondent à la partie (déterministe) de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éolienne, ...) correspondent à la partie (stochastique) de la variation spatiale du champ de vitesses [21].

II.2.1.3 Vent fictif en un point fixe.

La vitesse du vent en un point $V_0(t)$ peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne V (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations $V_t(t)$:

$$V_0(t) = V + V_t(t) \quad (\text{II.2})$$

V Vitesse moyenne du vent.

$V_t(t)$ Composante représentant la turbulence du vent.

La composante représentant la turbulence $V_t(t)$ est caractérisée par l'échelle de longueur L_v et l'écart type σ_v de cette turbulence. La définition de la composante turbulente se fait en 2 étapes :

- 1ère étape : reconstitution du spectre de la turbulence à partir d'un bruit blanc filtré (deux filtres largement utilisés sont le filtre de Von Karman et celui de Kaimal), le filtre de Von Karman peut être approché sous la forme suivante.

$$G_s = \frac{K_v \cdot (m_1 \cdot T_v \cdot s + 1)}{(T_v \cdot s + 1) \cdot (m_2 \cdot T_v \cdot s + 1)} \quad (\text{II.3})$$

Avec $m_1 = 0.4$ et $m_2 = 0.25$

$$K_v s = \frac{2 \cdot T_v \cdot (1 - m_2^2) \cdot \left(\frac{m_1^2}{m_2} - m_2 + 1 - m_1^2\right)^{-1}}{1} \quad (\text{II.4})$$

$$T_v = \frac{L_v}{V} \quad (\text{II.5})$$

K_v : Gain statique du filtre.

T_v : Constante de temps du filtre.

L_v : L'échelle de longueur de la turbulence obtenue expérimentalement et il dépend de la nature du terrain.

- 2ème étape : définition de l'écart type de la turbulence σ_v , L'écart type dépend de la vitesse moyenne V et d'un coefficient K_0 , qui dépend de la nature du terrain, et qui représente l'intensité de la turbulence.

$$\sigma_v = K_\sigma \cdot V \tag{II.6}$$

K_σ Coefficient d'intensité de la turbulence.

[12] donne des ordres de grandeurs de l'intensité K_σ et de l'échelle de longueur L_v de la turbulence pour divers sites. Ainsi à partir d'un bruit blanc gaussien en entrée, il est possible de déterminer la composante de la turbulence et donc de générer une série temporelle de la vitesse du vent en un point $V_0(t)$ comme présenté sur la figure (II.3).

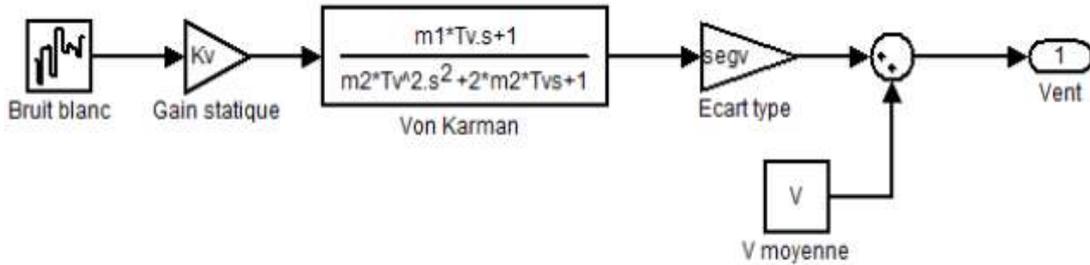


Fig. II.3 Construction de la vitesse de vent en un point

II.2.1.4 Filtre spatial

La vitesse du vent en un point de l'aire balayée par l'aéroturbine doit permettre de retrouver le couple éolien proche de celui que produirait le champ de vitesse du vent réel incident sur toute l'aire balayée par le rotor. Il a été démontré expérimentalement que seules les composantes basses fréquences du vent incident se retrouvaient dans le couple total produit par les pales. Par contre, l'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences [2]. L'aéroturbine a donc un comportement correspondant à un filtre passe-bas appelé (filtre spatial) vis à vis de la vitesse du vent incident [2]. On reconstitue cet effet en appliquant sur la vitesse instantanée du vent un filtre dont la fonction de transfert est donnée par :

$$G(s) = \frac{\bar{z} + b.s}{\bar{z} + b.s \cdot \bar{a} \cdot 1 + \frac{b}{\bar{a}}.s} \tag{II.7}$$

$$b = \gamma \cdot \frac{R_T}{V} \tag{II.8}$$

R_T : Rayon de pales de l'éolienne.

γ : Facteur d'affaiblissement ou facteur déclin sur le rotor ($\gamma = 1.3$)

\bar{a} : valeur empirique ($\bar{a} = 0.55$)

V : Vitesse moyenne du vent au point de mesure

Dans certains cas, cette fonction de transfert peut se simplifier comme suit

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau.s} \tag{II.9}$$

Le filtre spatial est ainsi utilisé pour corriger l'information donnée par l'anémomètre. Une étude comparative montre qu'il n'y a pas de différences notables entre un modèle fin du vent et un modèle utilisant ce type de filtre.

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne $\tau = 4$.

II.2.1.5 Rafales

Une rafale est définie par une magnitude, une durée et une fonction liée à sa forme [2]. La magnitude donne la déviation maximale par rapport à la valeur moyenne de la vitesse du vent. La durée exprime le temps pendant lequel la vitesse du vent diffère de celle de sa valeur moyenne. Des rafales plus sévères sont modélisées par des fonctions exponentielles, la taille d'une rafale dépend de sa durée, plus la durée est grande, plus la taille de la rafale est grande. Pour estimer la durée d'une rafale, on utilise la fonction de cohérence. La cohérence est une quantité sans dimension, entre zéro et un, qui représente le degré de similitude dans le temps, de deux événements séparés dans l'espace. La durée minimale d'une rafale assurant une taille englobant tout le rotor est donnée par :

$$\tau = \frac{d_y \cdot 2R}{V \cdot \ln(\text{coh}_D)} \quad (\text{II.10})$$

d_y : est le coefficient de déclin, et coh_D : est la cohérence entre deux points extrêmes du rotor.

La vitesse du vent sera modélisée, dans notre étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [26] :

$$V_v(t) = 10 + 0.2 \cdot \sin(0.1047 \cdot t) + 2 \sin 0.2665 \cdot t + \sin 1.2930 + 0.2 \cdot \sin(3.6645 \cdot t) \quad (\text{II.11})$$

Il est à signaler que ce profil de vent particulier correspond à des mesures effectuées par EDF sur le site du canal des dunes [26].

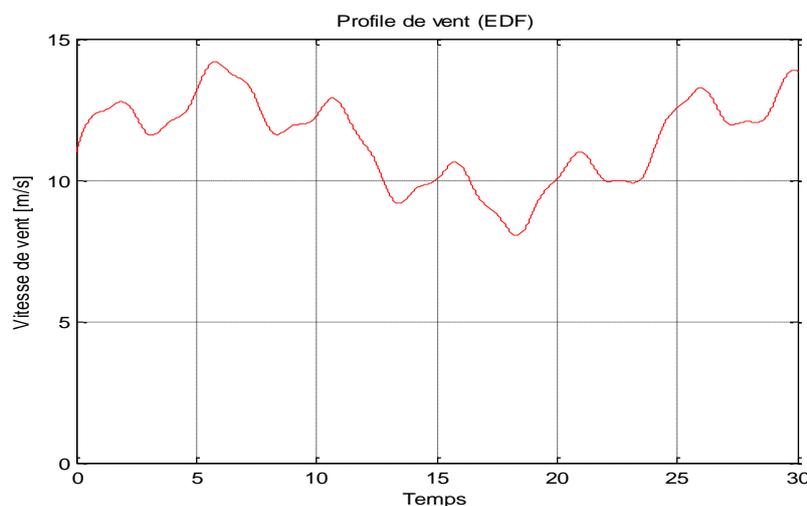


Fig. II.4 *Vitesse de vent d'après l'entreprise EDF*

II.2.2 Conversion aérodynamique

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette théorie est rappelée dans l'annexe A, elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_{aer} .

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p \quad (II.12)$$

R_T : Le rayon des pales de la turbine.

C_p : Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.

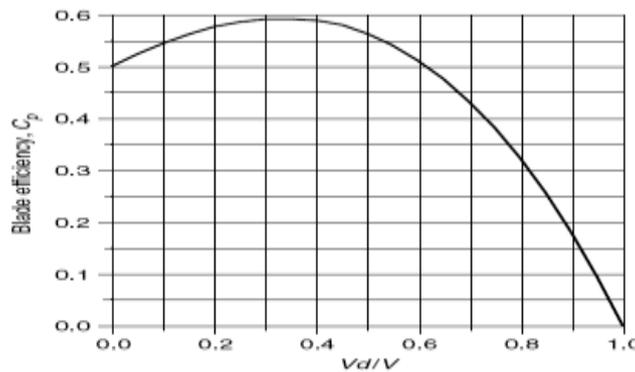


Fig. II.5 *Fonctionnement optimal de la turbine*

Ce coefficient, dont la limite théorique égale à $\frac{16}{27} = 0.593$ (limite de Betz), dépend de deux paramètres [16]:

La vitesse spécifique λ « tip speed ratio TSR ».

$$\lambda = \frac{R_T \cdot \Omega_T}{V} \quad (II.13)$$

On en déduit aisément l'expression du couple éolien à partir de l'équation (II.12).

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.14)$$

La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient C_p , puisqu'il dépend grandement du type de turbine (turbine à axe horizontal ou vertical, turbine à une, deux ou trois pales).

Au cours de ce travail, nous nous sommes limités au cas des turbines à axe horizontal et à trois pales dont l'angle de calage est réglable, qui est un standard dans les éoliennes actuelles.

D'où on définit le coefficient du couple par l'expression suivante :

$$C_q = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (II.15)$$

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine a un comportement spécifique et les constructeurs sont peu bavards sur leurs propres produits. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance. Néanmoins, l'allure des réseaux de courbes est toujours la même.

L'expression du coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [12]

$$C_p \lambda, \beta = C_1 \cdot C_2 \cdot \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \cdot e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.17})$$

Coefficient	valeur 1.5 MW
C_1	0.5176
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

(Tab. II.1) Coefficients définissant l'évolution de C_p

Les six coefficients définis, dépendent de la turbine considérée. L'exemple donné ci-dessus correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur allemand ENERCON [ENE] dont la puissance nominale est de 1500kW.

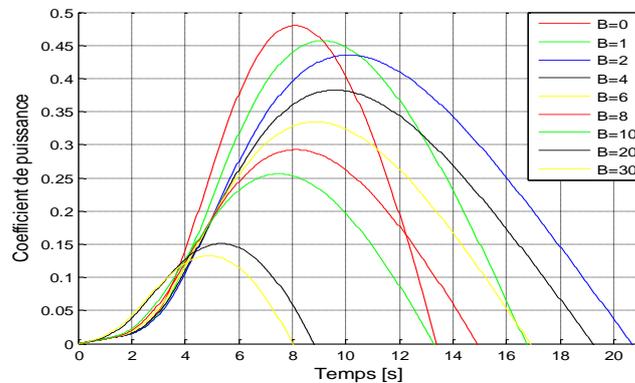


Fig. II.6 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

La puissance captée par la turbine pourra donc s'écrire :

$$P_{aeo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \lambda, \beta \quad (\text{II.18})$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple capté par la turbine est donc directement déterminé par :

$$C_{aéo} = \frac{P_{aéo}}{\Omega_{aéo}} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_{aéo}} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \lambda, \beta \quad (\text{II.19})$$

II.2.2.1 Equation dynamique de la turbine

L'énergie captée par la turbine est transmise à la génératrice. Dans le cas où cette génératrice est une machine asynchrone (structures MAS, MADA), un multiplicateur de vitesse est inséré dans la transmission afin d'effectuer l'adaptation de vitesse.

Le système mécanique complet comprend donc les éléments suivants :

- Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- L'axe lent.
- Le multiplicateur de vitesse.
- L'axe rapide (rotor de la génératrice).

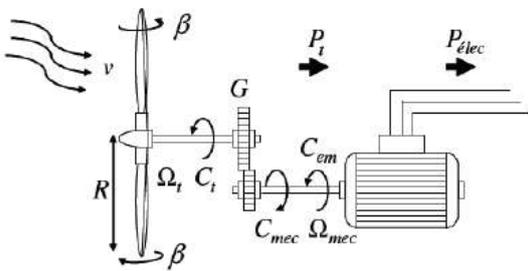


Fig. II.7 Configuration d'une éolienne.

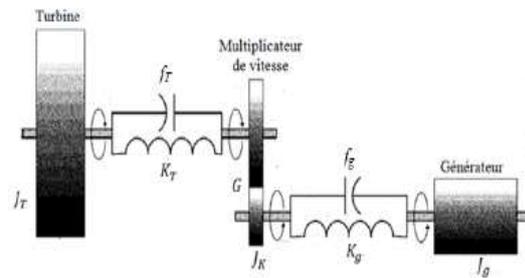


Fig. II.8 Modèle de la turbine.

Ce modèle est très complexe et sa modélisation exige la connaissance de plusieurs paramètres difficile à obtenir. Néanmoins, nous pouvons poser des hypothèses que nous les trouvons réalistes et qui sont acceptées dans divers ouvrages [2]. En effet, Le moment d'inertie de l'ensemble moyeu-pales représente à lui seul, en prenant comme exemple les éoliennes à base de machines asynchrones, 90% du moment d'inertie global, alors que celui de la génératrice est de l'ordre de 6 à 8%. Le reste (2 à 4%) correspond au moment d'inertie du multiplicateur de vitesse, ce qui nous permet de poser les hypothèses simplificatrices suivantes [12].

Hypothèses simplificatrice.

- La voiture de la turbine comprend trois pales de longueur R_T chacune une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie J_T .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $1/G$.
- les arbres de transmission sont parfaitement rigides.

Ces hypothèses nous permettent de considérer le modèle simplifié à deux masses.

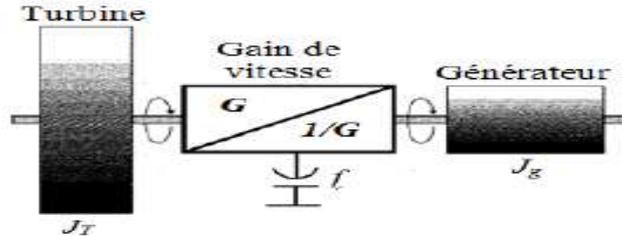


Fig. II.9 Modèle simplifié de la turbine

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad ; \quad \Omega_T \cdot G = \Omega_{mec} \quad (II.20)$$

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_T et comprend la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice,

$$J = \frac{J_T}{G^2} + J_g \quad (II.21)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2 MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor.

$$C_{mec} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (II.22)$$

Où J est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.23)$$

Le couple résistant est modélisé par un coefficient de frottements visqueux

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.24)$$

Alors, l'équation mécanique du modèle, ramenée sur l'arbre du générateur, se simplifie sous la forme suivante :

$$\frac{C_t}{G} - C_g = \frac{J_T}{G^2} + J_g \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + \frac{f_t}{G^2} + f_g \cdot \Omega_{mec} \quad (II.25)$$

C_t, C_g : Le couple éolien et le couple électromagnétique.

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

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

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_{mec} : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_t}{G^2} + J_g = J \text{ et } \frac{f_t}{G^2} + f_g = f \tag{II.26}$$

D'où, l'équation mécanique devienne.

$$\frac{C_t}{G} - C_g = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.27}$$

Ainsi, nous pouvons établir le modèle de la turbine dont le schéma bloc est donné par la (fig. II.10). Cette turbine génère le couple aérodynamique $C_{aér}$ qui est appliqué au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent V , l'angle d'orientation des pales β , et la vitesse de rotation de la turbine Ω_t turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique Ω_{mec} et le couple aérodynamique $C_{aér}$ respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur C_g . Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique Ω_{mec} , il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur C_g , le couple électromagnétique C_{em} fourni par la génératrice. [26]

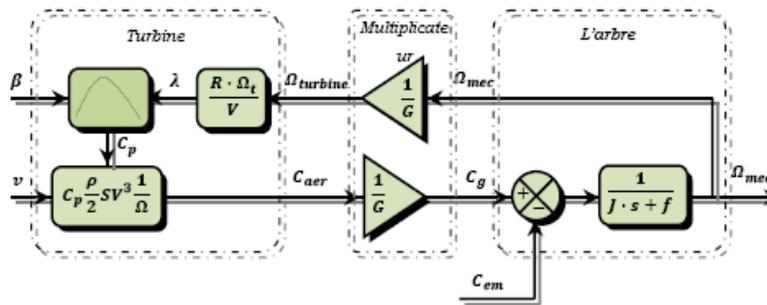


Fig. II.10 Schéma bloc de la turbine.

Le schéma montre que la vitesse de la turbine Ω_t peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale β et le couple électromagnétique de la génératrice C_g . La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

II.2.3 Techniques d'extraction du maximum de la puissance

II.2.3.1 Bilan des puissances

L'équation (II.18) quantifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice + turbine (ou encore du ratio de vitesse λ), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance.

Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique $P_{aér}$ diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (fig. II.11), [26].

$$P_{elc} = P_{aér} - Pertes \quad (II.28)$$

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.29)$$

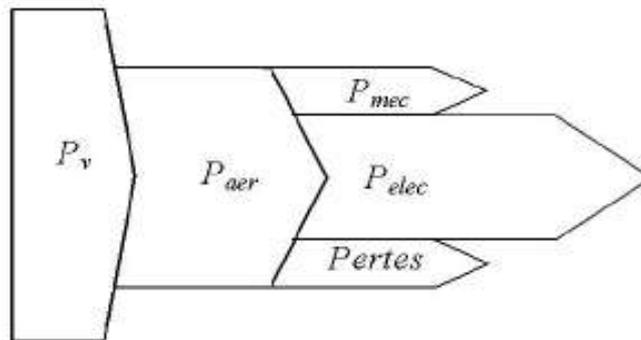


Fig. II.11 Diagramme de conversion de puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.). On distingue deux familles de structures de commande qui sont comme suit [12] :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique ;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

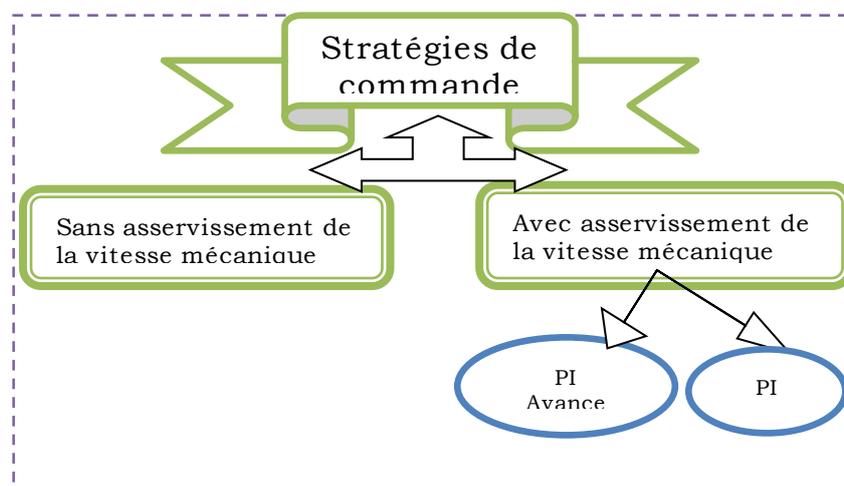


Fig. II.12 Stratégies de commande de la turbine étudiée

II.2.3.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

II.2.3.2.1 Principe général

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Le schéma bloc de la (fig. II.13) Montre clairement que les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence. [26]

$$C_{em} = C_{em_ref} \quad (II.30)$$

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour atteindre les objectifs de commande, une boucle de vitesse avec un régulateur proportionnel intégral est utilisée. La vitesse est influencée par l'application de trois couples : le couple éolien, le couple électromagnétique et le couple des frottements visqueux.

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (II.31)$$

L'action du régulateur de vitesse doit donc accomplir deux tâches [11,31] :

- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La référence de vitesse de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ permettant d'obtenir la valeur maximale du coefficient de puissance C_p .

On a :

$$\lambda_{opt} = \frac{R_t \cdot \Omega_{t_opt}}{v} \quad (II.32)$$

D'où

$$\Omega_{t_opt} = \frac{v \cdot \lambda_{opt}}{R_t} \quad (II.33)$$

Avec $\Omega_g = G \cdot \Omega_t$

On obtient :

$$\Omega_{g_ref} = G \cdot \frac{v \cdot \lambda_{opt}}{R_t} \quad (II.34)$$

Cette référence de vitesse sera ensuite filtrée par un passe-bas pour éliminer l'imprécision sur la mesure de la vitesse du vent due aux turbulences, et aussi pour atténuer la dynamique de la référence de vitesse pour améliorer la stabilité de la boucle de régulation.

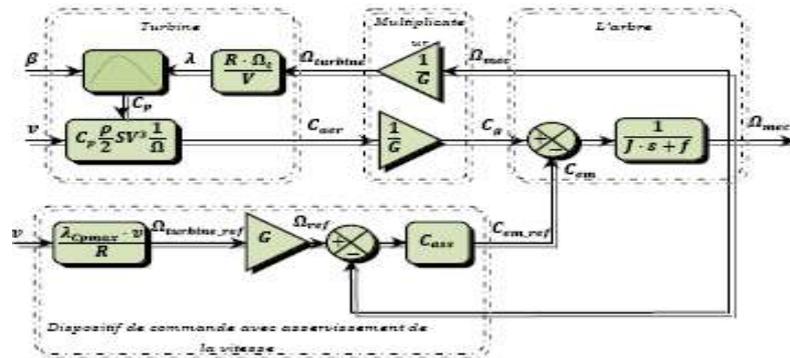


Fig. II.13 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui rend la lecture de la vitesse du vent erronée.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales, [12].

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse

II.2.3.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

La seconde structure de la commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = (C_g - C_{em} - C_{vis}) \tag{II.35}$$

On a :

$$C_{t_opt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda_{opt}} \cdot C_p(\lambda_{opt}) \tag{II.36}$$

C_{t_opt} : Le couple optimal.

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Cette équation écrite est sur l'arbre lent de l'éolienne, pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G .

$$C_{t_opt} = \frac{1}{2.G} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2}{\lambda_{opt}} \cdot C_p(\lambda_{opt}) \quad (II.37)$$

Si le couple électromagnétique C_{em} est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal. Cependant, l'équation (II.19) exige une mesure de la vitesse du vent généralement réalisée par un anémomètre situé sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace d'une part, et très perturbée par les turbulences provoquées par les pales en rotation d'une autre part [2]. L'utilisation d'un filtre spatial peut corriger le problème des turbulences en faisant un filtrage passe-bas de la mesure de l'anémomètre, mais le phénomène du cisaillement (variation de la vitesse du vent avec la hauteur des pales) reste non pris en charge.

Une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée pour contourner ce problème [25,30]. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit :

$$V = \frac{R_t \cdot \Omega_t}{\lambda_{opt}} \quad (II.38)$$

D'où le couple optimal C_t peut être exprimé en fonction de la vitesse du rotor comme suit.

$$C_{t_opt} = \frac{1}{2.G} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^5}{\lambda_{opt}^3} \cdot C_p \cdot \lambda_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (II.39)$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor au point de fonctionnement.

$$C_{t_opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (II.40)$$

Tel que :

$$K_{opt} = \frac{1}{2.G} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^5}{\lambda_{opt}^3} \cdot C_p \cdot \lambda_{opt} \quad (II.41)$$

En régime permanente, l'équation mécanique s'écrit sous la forme.

$$C_g - C_{em} - C_{vis} = 0 \quad (II.42)$$

$$\frac{C_t}{G} - C_{em} - C_{vis} = 0 \quad (II.43)$$

En remplaçant C_t par son expression ; on trouve :

$$\frac{K_{opt} \cdot \Omega_t^2}{G} - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} = 0 \quad (II.44)$$

Avec $\Omega_{mec} = \Omega_t \cdot G$

$$C_{em_opt} = \frac{K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2}{G^3} - f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.45}$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimal de l'éolienne [26]. Le schéma bloc de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous.

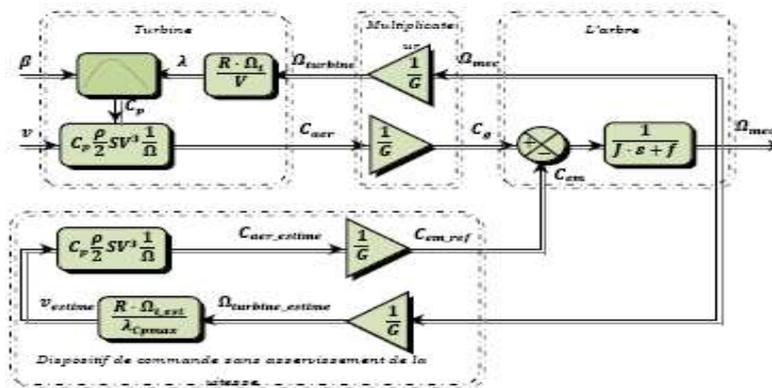


Fig. II.14 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

II.2.4 Modèle de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

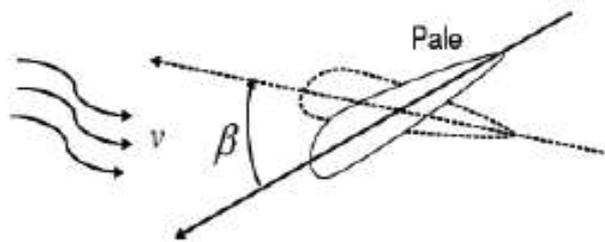


Fig. II.15 Orientation des pales.

II.2.4.1 Action en pleine charge : (Contrôle de l'angle de calage)

L'action consiste à limiter la puissance extraite en jouant sur l'angle de calage β des pales. Le mécanisme de positionnement des pales consiste à orienter les pales suivant un angle B_{ref} de référence par l'intermédiaire d'un système hydraulique ou électrique. Le choix de cet angle provient en général d'une boucle externe visant à réguler soit la vitesse de la turbine, soit la puissance mécanique générée.

II.2.4.2 Modèle de rotation des pales

Peu d'articles ou de références bibliographiques proposent une modélisation de la rotation des pales autour de leur axe. On retrouve en général des modèles en premier ordre de ce type

$$\frac{\beta}{C_{\beta}-C_r} = \frac{1}{D_d - J_d \cdot s} \quad (\text{II.46})$$

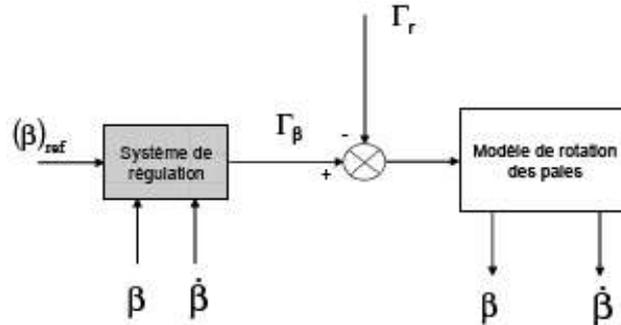


Fig. II.16 *Système de régulation des pales*

II.2.4.3 Boucles de régulation

Ce système se compose de deux boucles imbriquées, l'une contrôlant la vitesse de variation de β , l'autre contrôlant la position des pales.

- **Limitation de vitesse:**

Les contraintes mécaniques s'exerçant sur les pales sont extrêmement élevées pour de fortes vitesses de vent. Ainsi il faut veiller à limiter la vitesse de rotation des pales autour de leur axe. Peu auteurs [12], abordent ce thème avec deux points de vue différents:

L'un des auteurs fait la distinction entre les vitesses positive β^+ et négative β^-

$$\beta^+ \leq 4. \left(\frac{m}{s}\right) \quad \beta^- \leq 0.7. \left(\frac{m}{s}\right) \quad (\text{II.47})$$

Un autre, auteur fait la distinction entre un fonctionnement normal et un fonctionnement d'urgence $5^\circ/s$ pour le fonctionnement normal et $20^\circ/s$ pour l'autre.

Dans le cadre de cette étude, la vitesse de variation de l'angle est limitée à $\pm 20^\circ/s$, quel que soit le fonctionnement.

- **Limitation de position:**

Tant que la vitesse du vent n'atteint pas sa valeur nominale (autour de $12m/s$), le mécanisme d'orientation des pales n'intervient pas et β vaut 0. Au-delà, la régulation intervient et l'angle peut varier entre 0° et 50°

La boucle de régulation de la vitesse de variation de l'angle de calage a été approchée par une fonction de transfert de premier ordre avec une constante de temps T_B . Pour obtenir une réponse réaliste, un limiteur est introduit pour limiter la vitesse de variation de β à environs $20^\circ/s$.

II.2.5 Résultats de simulation

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats de simulation que nous allons présenter ont été faits pour une turbine de 1.5 MW dont

les paramètres sont donnés dans l'annexe. Ces résultats obtenus basées sur la structure de commande sans asservissement de la vitesse.

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais tout simplement observer la vitesse, le couple la puissance produits à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent et aussi l'angle de calage β .

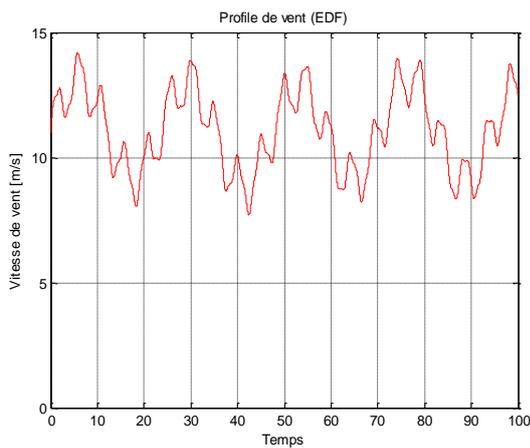


Fig. II.17 Vitesse de vent d'après EDF

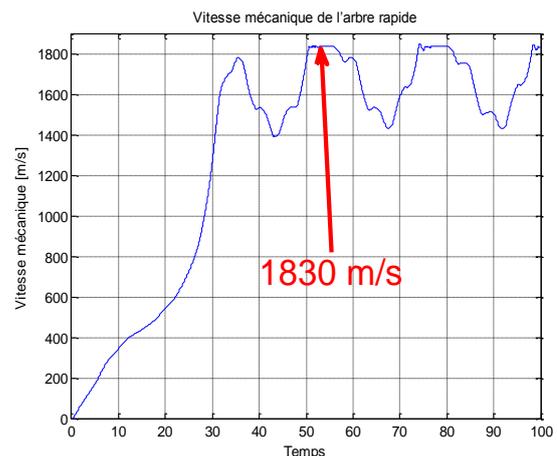


Fig. II.18 Vitesse mécanique de l'arbre rapide

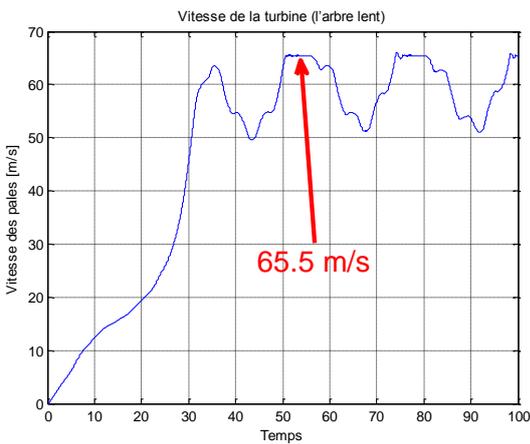


Fig. II.19 Vitesse de la turbine (l'arbre lent)

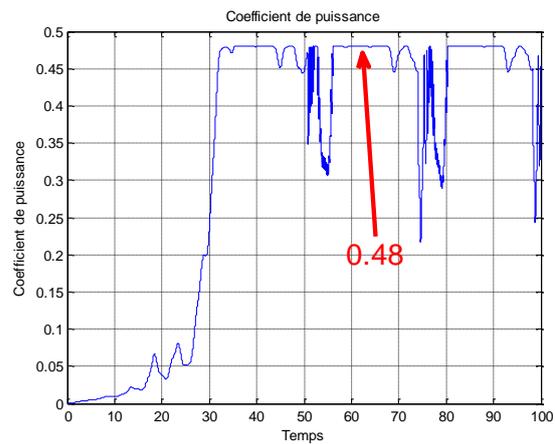


Fig. II.20 Coefficient de puissance

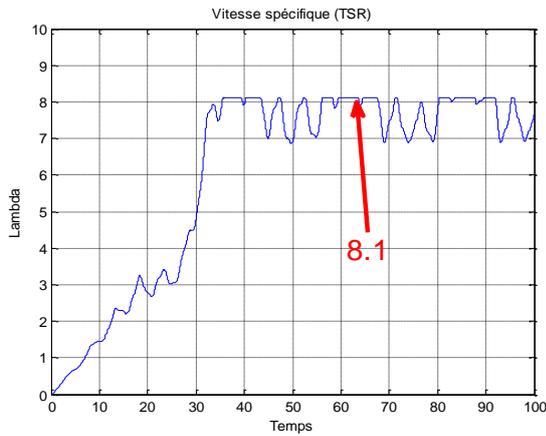


Fig. II.21 Vitesse spécifique (TSR)

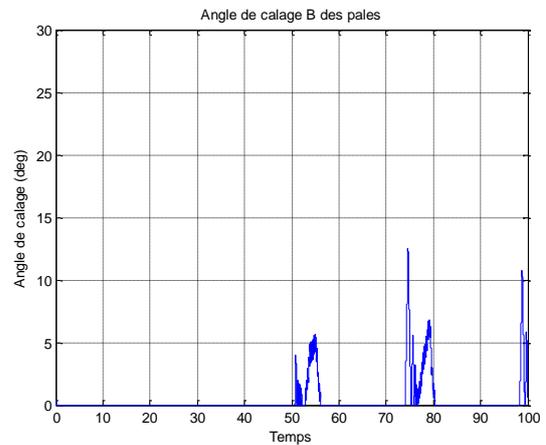


Fig. II.22 Angle de calage B des pales

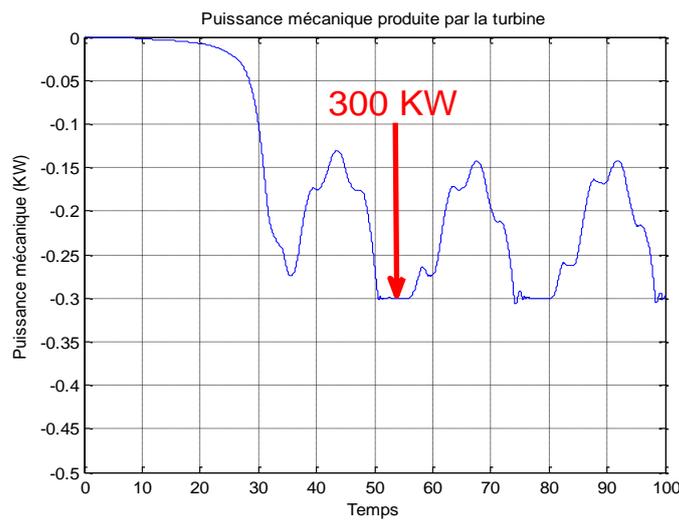


Fig. II.23 Puissance mécanique produite par la turbine

II. 3 Etude et modélisation de la partie de conversion électromécanique

II. 3.1 Introduction

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. (Fig. II.24).

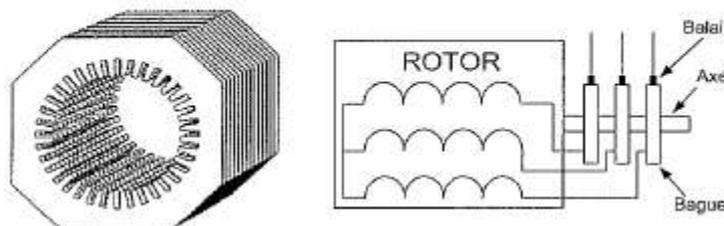


Fig. II.24 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écurie coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné est de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant lors du démarrage, augmenter le couple durant cette phase; ainsi que de pouvoir élargir la plage de variation de la vitesse. [14]

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée «machine généralisée», car sa structure permet de considérer son comportement

physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif.

Ce fonctionnement peut être, éventuellement, résumé par le terme de: machine synchrone à excitation alternative. Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentation ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentations envisageables.

Dans le présent chapitre nous nous intéresserons à la modélisation dynamique de la machine asynchrone à double alimentation (un bobinage au stator et l'autre au rotor), et plus précisément la modélisation par la méthode de R.H Park.

II. 3.2 Etudes faites sur la MADA :

On trouve dans [27] un recensement de certains articles parus sur la MADA, classés suivant leur architecture. Dans chacune de ces classes, les auteurs rappellent les équations fondamentales et les principales applications. On y distingue les classes suivantes :

- a- MADA simple (Single Doubly Fed induction Machine) Les enroulements statoriques sont connectés au réseau, tandis que le rotor est relié à son propre onduleur.
- b- MADA en cascade (Cascade Doubly Fed induction Machine) La MADA en cascade est constituée de deux MADA ayant leurs enroulements statoriques connectés au réseau et leurs enroulements rotoriques connectés entre eux. De plus, les deux machines sont couplées mécaniquement.
- c- MADA cascadiée à un repère (single frame cascade machine) Il s'agit de deux machines à cage dont l'axe rotorique est identique. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines. Une machine a son stator relié au réseau, l'autre à un onduleur.

- d- MADA sans balais (Brushless Doubly Fed induction Machine) C'est une machine très proche de la précédente, sauf que cette fois-ci les deux enroulements statoriques appartiennent à un circuit magnétique commun. Le rotor est commun et à cage d'écureuil.
- e- MADA à réductance (Doubly Fed Reluctance Machine) C'est une machine utilisant le principe d'un rotor de moteur à réductance variable
- f- MADA TANDEM (TANDEM induction Machine) C'est une machine possédant un rotor à cage et deux enroulements statoriques: l'un est fixe, l'autre peut être tournant.

D'après J. POSA on trouve une étude sur le dimensionnement et la modélisation de la MADA sans balais. Cette machine est en fait composée de deux enroulements statoriques indépendants et d'un rotor spécial. Le premier enroulement statorique est dit enroulement de puissance. Il est directement connecté au réseau, l'autre dit enroulement de commande .Il est piloté par un onduleur L'intérêt d'une telle machine

est qu'elle assure un fonctionnement à très basse vitesse, permettant ainsi d'envisager la suppression des réducteurs mécaniques. Elle nécessite une maintenance plus facile, car elle est dépourvue du système "bagues- balais" par d'autres études [45] dont les deux articles sont très proches, présentent une étude sur la stabilité de la MADA, basée sur des simulations. La machine a des enroulements statoriques reliés au réseau, tandis que ses enroulements rotoriques sont connectés à un onduleur. La stratégie de commande retenue est celle du champ orienté. Les auteurs introduisent un courant magnétisant directement proportionnel au flux d'entrefer. Le repère tournant est aligné sur le flux d'entrefer. Les résultats de simulation donnés par les auteurs présentent des oscillations de flux lors des variations de la charge. Ce flux se met à osciller fortement, notamment en mode moteur. Ils décident ensuite de rajouter une compensation d'oscillation du flux basée sur une estimation de ce dernier .Les simulations effectuées par la suite montrent une nette amélioration de la réponse du flux et celle du couple. Les auteurs pensent ainsi pouvoir améliorer la stabilité du générateur basée sur la MADA utilisée dans des applications visant l'éolien.

M. HELLER voit en la MADA la solution du futur pour les industries de pompage .Il propose d'évaluer la stabilité d'une MADA en utilisant la méthode des petites variations autour d'un point de fonctionnement .Pour ce faire, il considère une MADA dont le stator est connecté au réseau et le rotor relié à un onduleur .Le contrôle est assuré par l'orientation du flux statorique. Le mode de fonctionnement retenu est un fonctionnement moteur .La méthode des petites variations lui permet de tracer le lieu des pôles de son système. Il présente ensuite des résultats expérimentaux réalisés sur une machine de 33KW.

.M.KELBER reprend cette étude et la prolonge en ajoutant une partie sur la commande du système. A.MASMOUDI [33] étudie les échanges d'énergie dans une MADA .L'auteur considère une MADA dans le cas le plus général, c'est à dire qu'elle

possède deux alimentations variables et indépendantes ,l'une au stator ,l'autre au rotor .Il se place du point de vue de cet échange énergétique dans l'entrefer .Il dresse un bilan de l'échange énergétique entre les enroulements statoriques ou rotoriques pour un fonctionnement en moteur, en générateur ou en frein .L'auteur propose une étude sur la stabilité en analysant les valeurs propres de la matrice dynamique découlant de sa modélisation en fonction des variations des paramètres électriques.

A.TOUMI étudie la stabilité d'une MADA notamment pour des applications éoliennes. Après avoir établi un modèle mathématique de la MADA, il emploie la méthode des petites variations pour linéariser le modèle. Ensuite, il applique le critère de Routh afin d'obtenir des courbes de variations des coefficients. Dans cet article, l'auteur étudie l'influence et l'inertie du rapport des tensions statoriques et rotoriques. On regroupe dans cette section les études qui traitent de la qualité des signaux d'une MADA. Là aussi, toutes les configurations de la MADA peuvent être concernées.

A.DITTRICH propose dans son article de contribuer à l'amélioration des signaux délivrés par une MADA en compensant les harmoniques de courant. L'auteur s'intéresse à une MADA dont chaque côté est connecté à un onduleur de tension. L'application visée par son étude est l'éolien Un onduleur contrôle la tension du bus continu, tandis que l'autre, placé au rotor, assure le contrôle de la puissance active .Il part de l'idée que le facteur de puissance est fondamental pour le développement de l'exploitation de l'énergie éolienne .Il fait une étude théorique de la réduction des harmoniques des courants principaux par la méthode de compensation des harmoniques dus à des effets secondaires .Il constate par exemple, que des harmoniques de courant apparaissent à cause des oscillations du flux statorique .Les mesures réalisées prouvant l'efficacité d'une telle méthode peuvent aussi être consultées. Les essais expérimentaux ont été réalisés en laboratoire sur un système utilisant une machine de 4KW.

R.GHEYSSENS s'intéresse, lui, à une MADA fonctionnant en générateur ayant ses enroulements statoriques connectés au réseau tandis que ses enroulements rotoriques sont reliés à un cycloconvertisseur. L'auteur se propose de comparer l'influence d'une alimentation en tension ou en courant sur le comportement de la MADA. Ensuite, il présente les résultats d'une implantation en logique rapide pour une alimentation en courant. Dans son étude de l'influence du choix de l'alimentation, il introduit la notion de trois couples : un couple asynchrone statorique, un couple asynchrone rotorique et un dernier couple dû à l'insertion des deux sources alimentation en tension du stator, et tension ou courant du rotor .La stratégie de contrôle est occultée .Une série de résultats expérimentaux sur une machine de 4.5KW est donnée.

M.YAMAMOTO étudie une MADA dont le stator est relié au réseau, tandis que le rotor est connecté à un onduleur indépendant. Il utilise la méthode du champ orienté

appliquée au flux d'entrefer et propose de contrôler la puissance active et réactive statoriques indépendamment de façon stable. Les applications visées par cette étude sont l'hydroélectricité et l'éolien. Dans cette étude, l'auteur affirme que des harmoniques de courant, dus à l'alimentation du rotor, sont transmis au stator; ce qui a pour conséquence de changer la fréquence des signaux de ce dernier. L'analyse harmonique des courants statoriques le confirme. Une étude expérimentale des courants est proposée afin d'étayer cette affirmation. Les réponses temporelles des courants peuvent être consultées. Bien entendu, toutes ces études font appel à des stratégies de commande qui sont sous-jacentes. Elles sont placées dans cette catégorie, car on a pensé que le point essentiel de ces études est leurs conclusions qui découlent d'une analyse d'un signal.

D.ARSUDIS étudie une MADA dont le stator est relié au réseau triphasé et le rotor à un onduleur de tension à GTO, lui-même alimenté par un redresseur de tension. Dans cet article, l'auteur propose l'étude de la MADA en tant que générateur à vitesse variable. Il propose de contrôler les puissances actives et réactives statoriques à la fois

en régime permanent et transitoire. La méthode de contrôle est celle du champ orienté. L'auteur introduit un courant magnétisant statorique; l'orientation du champ est ensuite choisie de façon à caler la rotation du repère sur ce courant magnétisant ainsi défini. Les courbes expérimentales présentent les puissances active et réactive. Ces résultats attestent des performances du contrôle proposé. Les courbes expérimentales ont été obtenues sur une machine de 22KW.

J.BENDL étudie le contrôle d'une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un onduleur indépendant. Il vise des applications destinées à la génération d'électricité à travers l'hydraulique ou l'éolien. L'auteur propose dans cette étude une nouvelle stratégie permettant un contrôle indépendant des séquences positives et négatives des courants statoriques. Cela a pour conséquence une immunité accrue du facteur de puissance face aux perturbations du réseau et un contrôle plus flexible pour chacun des trois courants. Seuls des résultats de simulation des courants, tensions et puissances statoriques et rotoriques sont donnés. Ils attestent des bonnes performances du contrôle adopté.

D.FORCHETTI considère une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un onduleur. L'étude porte sur un fonctionnement générateur de la MADA. L'auteur propose un contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux statorique. Les deux variables de contrôle sont les deux courants rotoriques (direct et en quadrature). Les variables de sortie sont la fréquence et l'amplitude de la tension statorique. Des résultats expérimentaux sont ensuite présentés et commentés. Les tests expérimentaux ont été réalisés sur une machine de 5,5KW.

W.HOFMANN fait une étude des variables de la MADA dont les enroulements statoriques sont connectés au réseau, tandis que les enroulements rotoriques sont

reliés à un onduleur. Il propose une application éolienne et par conséquent une courbe de couple mécanique disponible en fonction de la vitesse. Il part de l'hypothèse que sa machine est pilotée par un contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux statorique. La simulation des variations des courants, des pertes et des flux est présentée. Il démontre que son contrôle, qui doit minimiser les pertes, est performant.

B.HOPFENSBERGER propose l'étude d'une MADA dont les enroulements statoriques sont reliés à un réseau triphasé. Le rotor est alimenté par un onduleur. Il se place dans le cas d'un fonctionnement en mode moteur et vise des applications nécessitant une variation de la vitesse de rotation. Il adopte une stratégie de contrôle de type champ orienté. L'orientation du repère est choisie suivant le flux statorique. Il propose ensuite de montrer quelques résultats expérimentaux avec et sans capteur de position. Il est particulièrement intéressant de constater que l'auteur propose deux façons de déterminer l'angle de rotation du repère tournant :

- La première est basée sur la mesure et l'expression des courants statoriques dans un repère tournant.
- La deuxième nécessite la mesure des puissances active et réactive statoriques.

Le même auteur propose l'étude de deux machines asynchrones à rotor bobiné dont les axes rotoriques sont couplés à la fois mécaniquement et électriquement entre eux (principe de la cascade hypo ou hyper synchrone). Dans cet article, l'auteur explore une façon de contrôler ce système en essayant de satisfaire les principes généraux du contrôle vectoriel : référence de couple, de vitesse, de puissance active et réactive. Les résultats expérimentaux peuvent être consultés. Il s'agit des courbes expérimentales des variations de vitesse, des courants et des puissances active et réactive statoriques. Dans un autre article, l'auteur reprend l'étude précédente, mais en appliquant cette fois-ci la théorie du champ orienté au flux commun rotorique, alors que dans l'étude précédente il avait choisi un flux statorique. Là aussi, des résultats expérimentaux sont présentés. Il s'agit des courbes expérimentales de variation de vitesse, des courants et des puissances active et réactive statoriques.

D.LECOCQ présente des résultats de simulation d'une MADA dont le stator et le rotor sont connectés à des onduleurs indépendants. Il propose d'adopter la théorie du champ orienté appliqué au flux statorique. Il choisit d'imposer la vitesse, le flux, le facteur de puissance et le glissement. Il prétend pouvoir les contrôler à la fois en régime permanent et transitoire.

F.BETIN explique comment procéder à un contrôle indirect du flux du même système. Il part du principe que la MADA offre quatre degrés de liberté : le flux, le couple, la fréquence rotorique et le facteur de puissance. Il choisit alors le flux d'entrefer et introduit un courant magnétisant, celui-ci est proportionnel au flux d'entrefer.

Ensuite, il formule les trois autres relations liant les courants avec une des grandeurs à contrôler. Il définit quatre régulateurs de courants à mettre en œuvre. Des résultats expérimentaux sont présentés: il s'agit des réponses du flux statorique, de vitesse, des tensions, des courants statoriques.

M.MACHMOUM propose une étude des performances d'une MADA en régime permanent. Son étude s'inscrit dans le cadre des applications à vitesse variable, que le fonctionnement soit en moteur ou en générateur. Il s'agit d'une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un cycloconvertisseur considéré comme une source de courant. Pour la stratégie de commande, l'auteur choisit d'aligner l'axe d de son repère tournant avec le courant rotorique. Il désire contrôler les courants rotoriques et l'angle de déphasage de la tension statorique par rapport à son repère, il le nomme angle de charge. L'expression analytique du couple peut alors être partagée en deux parties: une partie due au courant rotorique et l'autre due à l'interaction entre les alimentations statoriques et rotoriques. Des résultats expérimentaux qui présentent les réponses du courant rotorique en fonction de l'angle de décalage en régime

permanent permettant de conclure qu'une alimentation en courant est préférable pour le contrôle de la MADA.

Dans une autre étude, l'auteur s'intéresse à une alimentation en tension au rotor. Le modèle ainsi obtenu est d'une utilisation simple et minimise le nombre de paramètres ayant une influence sur l'état de la MADA en régime permanent par rapport à une alimentation en tension. Cette fois, le repère tournant est associé au vecteur tension statorique. Une analyse de l'expression analytique du couple en régime permanent permet de constater que le couple dépend de trois paramètres: le glissement, le ratio entre les amplitudes statoriques et rotoriques et le déphasage entre les deux sources de tension. Des résultats de simulation sont présentés. Il s'agit des courbes de variation du couple, des courants statoriques et rotoriques en fonction des différentes valeurs que peuvent avoir les paramètres définis: le rapport des tensions, l'angle de déphasage entre le vecteur tension statorique et le vecteur tension rotorique.

L.MOREL étudie une MADA dont le stator est relié au réseau et le rotor à un onduleur. Il affirme qu'une telle disposition permet de dimensionner la puissance du convertisseur utilisé au rotor à 20% de la puissance mécanique maximale. Il propose d'effectuer un contrôle de type champ orienté. Afin d'obtenir un moteur ou un générateur à vitesses variable, il propose de passer par trois phases différentes pour amener la vitesse du moteur de zéro à sa vitesse nominale:

- Mode I: on démarre le moteur avec les enroulements statoriques en court-circuit;
- Mode II: on connecte le stator sur le réseau,
- Mode III: la MADA est alimentée à tension et à fréquence fixes au stator et par un convertisseur au rotor. Le fonctionnement du système durant les différents modes est démontré avec validation par des résultats expérimentaux. Il s'agit

des réponses en vitesse de la MADA, des courbes de réponse des courants et des tensions rotoriques.

G.PODDAR considère une MADA dont le stator et le rotor sont connectés à des onduleurs indépendants. Le fonctionnement moteur est d'abord envisagé. Il propose de contrôler deux courants

statoriques avec la méthode du champ orienté, tandis qu'une loi statique (V/f) sera implantée au rotor permettant ainsi de contrôler le flux et la pulsation rotorique. Il présente également une nouvelle loi de fréquence permettant une indépendance de la réponse du système vis-à-vis des variations paramétriques. Il conclut en démontrant que le double de la puissance nominale du moteur est atteint pour une vitesse de rotation de la machine valant le double de la vitesse nominale. Des résultats expérimentaux sont présentés. Nous pourrions ainsi consulter les courbes de réponse des flux statoriques, des courants statoriques et rotoriques ainsi que la vitesse pour différents couples de charge.

D.RAMUZ présente une étude de la MADA dont les enroulements statoriques et rotoriques sont alimentés par deux onduleurs indépendants. L'auteur propose d'utiliser cette configuration pour un fonctionnement moteur dans des applications telles que la traction électrique ou la première transformation de l'acier.

Afin de contrôler sa MADA, l'auteur utilise un contrôle vectoriel à orientation de flux. Dans un premier temps, il présente des résultats expérimentaux avec un contrôle basé sur un repère tournant lié au flux statorique ; dans un deuxième temps, le contrôle est basé sur une orientation du repère suivant le flux d'entrefer. Les résultats présentés sont: la vitesse, les courants statoriques et rotoriques. Ces résultats sont effectués sur une machine de 1.5KW.

II.3.3 Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (Fig. II.25), Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement

Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation. Ce dernier possède un autre nombre de paires de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal du générateur y circule.

Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en

trouve réduit. Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation, permet de contrôler le flux statorique de la machine, le glissement peut être ainsi contrôlé, et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également.

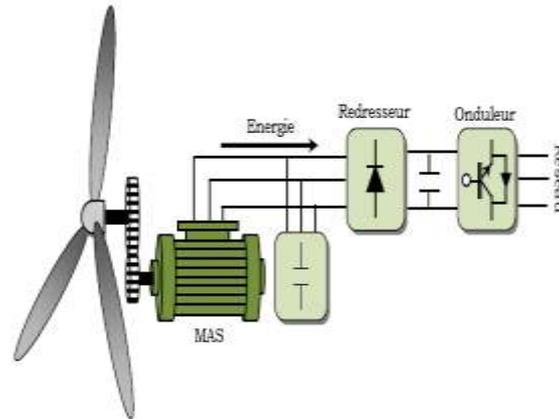


Fig. II.25 MAS piloté par le stator

Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu. Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

II.3.4 Double alimentation par le rotor

II.3.4.1 Principe

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne. [26]

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse la puissance P est fournie par le stator et traverse l'entrefer une partie de cette puissance fournie, $(1 - g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique; le reste, $(g.P)$ sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $(g.f)$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1+ g).P$ [1]. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (Fig. II.26). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique

tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.é.m. créés au rotor et au stator est

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.48})$$

N_r et N_s sont respectivement le nombre des spires des bobinages rotoriques et statoriques.

ω_s et ω_{mec} Sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique.

En définissant le glissement par :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.49})$$

L'équation devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{II.50})$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (\text{II.51})$$

Donc, le rapport entre la puissance S_r au rotor et la puissance S_s au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{II.52})$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice équation (II.52) en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g . [26]

Technologie	Type de MADA	Convertisseur utilisé	Transfert de puissance	Variation de la vitesse de rotor
Machine sans balais A double alimentation	Double bobinage au stator	Convertisseur MLI au stator et côté réseau	Transfert unidirectionnel de l'énergie du glissement	Variable 25%
Double alimentation par le rotor et le stator et dissipation d'énergie	Un seul bobinage au stator et un rotor bobiné	Redresseur pour le contrôle du glissement Hacheur connecté à une charge	Transfert bidirectionnel d'énergie de glissement	Variable 25%

		résistive		
Double alimentation par le rotor et le stator et récupération d'énergie de glissement (Kramer)	Un seul bobinage au stator et un rotor bobiné	Redresseur à diodes onduleur à thyristor	Transfert unidirectionnel d'énergie de glissement	Variable 25%
Double alimentation par le rotor et le stator et récupération d'énergie de glissement.	Un seul bobinage au stator et un rotor bobiné	Cycloconvertisseur Sherbius	Transfert bidirectionnel d'énergie de glissement	Variable 50%
Double alimentation par le rotor et le stator et récupération d'énergie de glissement.	Un seul bobinage au stator et un rotor bobiné	Double convertisseur MLI	Transfert bidirectionnel d'énergie de glissement	Variable 50%

II.3.4.2 Description de la MADA (à rotor bobiné)

Une machine asynchrone à double alimentation MADA est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi de trois enroulements identiques et symétrique couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois bagues figure (II.26).

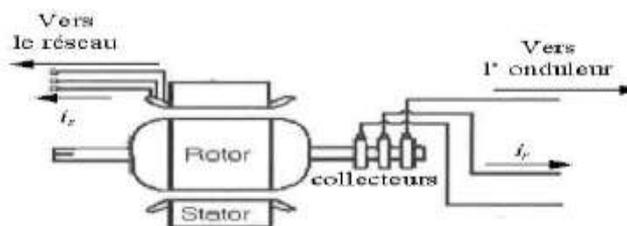


Fig. II.26 Structure d'une machine asynchrone à double alimentation

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur est appelé cascade hypo ou hyper synchrone.

II.3.4.3 Modes de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone à cage, la MADA fonctionne en moteur et en générateur, la différence réside dans le fait que pour la MADA ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement. Dans le cas d'une MADA c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionnement en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [11].

Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération

d'énergie éolienne à vitesse variable. La figure (II.27) montre les différents modes de fonctionnement de la MADA, en moteur hypo synchrone ou hyper synchrone dans les quadrants a et b respectivement et en génératrice hypo synchrone ou hyper synchrone dans les quadrants c et d respectivement. Seuls les quadrants c et d sont exploitables pour la production de l'énergie électrique, donc nous nous intéressons dans notre étude à ces deux quadrants pour la production d'énergie éolienne.

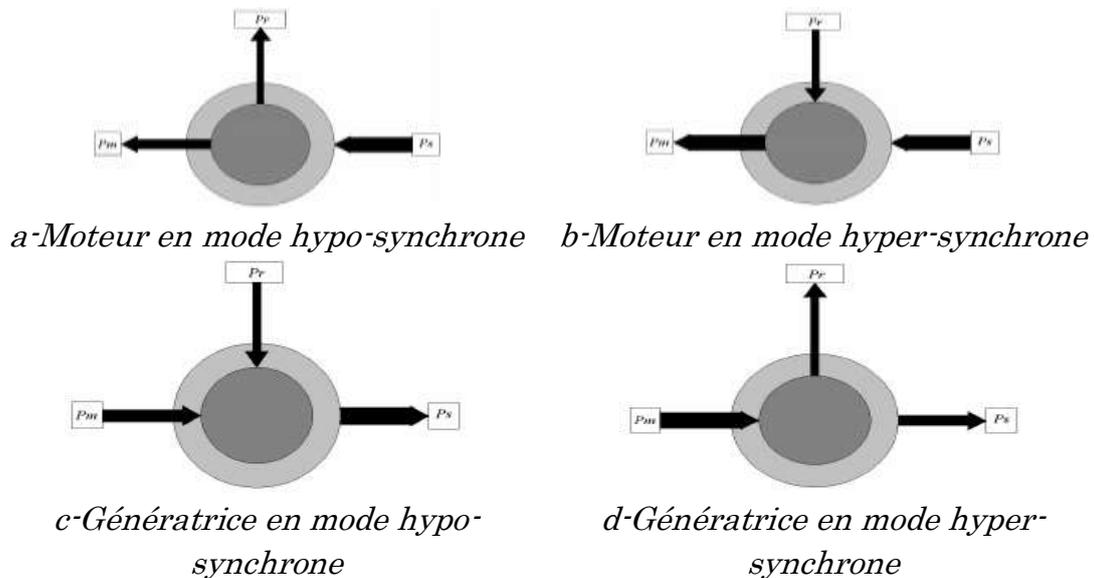


Fig. II.27 Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA

P_s : Puissance statorique

P_r : Puissance rotorique

P_m : Puissance mécanique

Pour le fonctionnement moteur :

- a- Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme, la puissance électrique du stator est transformée en partie en puissance mécanique et le reste peut être réinjectée au réseau à travers le rotor. La MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules.
- b- Lorsque la machine tourne au dessus de la vitesse de synchronisme, elle peut recevoir de la puissance électrique du côté stator et du rotor. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

Pour le fonctionnement générateur :

- c- Lorsque la machine reçoit de la puissance du dispositif mécanique et du rotor, celle-ci tourne en dessous de la vitesse de synchronisme. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.
- d- Lorsque la machine tourne au dessus de la vitesse de synchronisme, la puissance électrique est réinjectée au réseau à travers le stator et le rotor. La

MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que la puissance rotorique est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules.

En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant jusqu'à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux et moins coûteux que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage. De plus, le contrôle des tensions rotoriques nous donne la possibilité de maîtriser les puissances active et réactive, ce qui est très utile pour la poursuite du point de fonctionnement optimale dans la production d'énergie éolienne.

II.3.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Pour commander la machine asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il nous faut disposer de son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement [9], à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande ; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental.

Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique ; la deuxième est liée à l'identification des paramètres

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont [12]:

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- La FMM créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
- La symétrie de construction est parfaite.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [9]:

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est en fonction de la vitesse de rotation Ω , telle que $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$, où θ est l'angle entre l'enroulement statorique (A) et l'enroulement rotoriques (a) en chaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous.

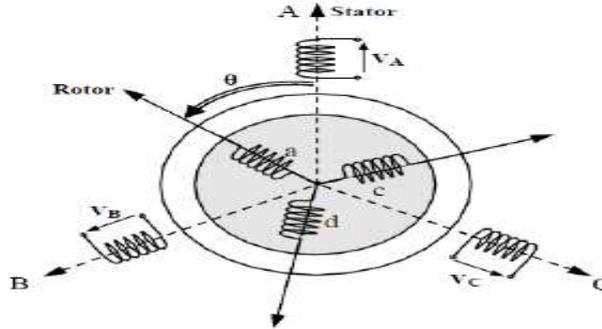


Fig. II.28 Représentation schématique de la machine asynchrone à rotor bobiné.

II.3.5.1 Rappel sur la loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation entre la tension (v) aux bornes d'une bobine, de résistance R_B d'inductance L_B , le courant i , la variation du flux totalisé φ_t :

$$v = R_B \cdot i + \frac{d\varphi_t}{dt} \quad \text{d'où :} \quad \frac{d\varphi_t}{dt} = v - R_B \cdot i \tag{II.53}$$

Avec $(\varphi_t) = \varphi + \varphi_c$ où φ_c est un flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements, et φ est le flux propre de l'enroulement

II.3.5.2 Mise en équation de la partie électrique dans le plan (abc).

D'après les hypothèses simplificatrices, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements. En appliquant la loi de Faraday aux enroulements de la machine asynchrone, on détermine les équations différentielles exprimant les différents flux [12].

$$\begin{array}{l}
 \text{stator} \\
 \text{rotor}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \frac{d}{dt} \cdot \begin{array}{l} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{array} \\
 \frac{d}{dt} \cdot \begin{array}{l} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{array}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 \begin{array}{l} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{array} \\
 \begin{array}{l} V_{rA} \\ V_{rB} \\ V_{rC} \end{array}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{l}
 \begin{array}{l} R_s \\ 0 \\ 0 \end{array} \\
 \begin{array}{l} R_r \\ 0 \\ 0 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \begin{array}{l} 0 \\ R_s \\ R_r \end{array} \\
 \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ R_r \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \begin{array}{l} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{array} \\
 \begin{array}{l} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{array}
 \end{array}
 \tag{II.54}$$

- $I_{s,r(a;b;c)}$ sont les courants au stator et au rotor de la machine ;
- $\varphi_{s,r(a;b;c)}$ sont les flux propres circulants au stator et au rotor de la machine ;
- $V_{s,r(a;b;c)}$ sont les tensions simples triphasées au stator et au rotor de la machine.
- R_s est la résistance de l'enroulement statorique ;

- R_r est la résistance de l'enroulement rotorique.

On définit les vecteurs flux suivant

$$[\varphi_s] = L_{ss} I_s + [M_{sr}] I_r \tag{II.55}$$

$$[\varphi_r] = [M_{rs}] I_s + L_{rr} I_r$$

$$L_{ss} = \begin{matrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{matrix} = L_s \cdot \begin{matrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 1 \end{matrix} \tag{II.56}$$

L_s Inductance propre des enroulements statoriques ;

M_s Inductance mutuelle des enroulements statoriques $M = -\frac{L_s}{2}$

$$L_{rr} = \begin{matrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{matrix} = L_r \cdot \begin{matrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 1 \end{matrix} \tag{II.57}$$

L_r Inductance propre des enroulements rotoriques ;

M_r Inductance mutuelle des enroulements rotoriques $M = -\frac{L_r}{2}$.

Et finalement :

$$M_{sr} = M_{rs}^T = M \begin{matrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{matrix} \tag{II.58}$$

Où M représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

II.3.5.3 Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $P(\theta)$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, o). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par [04].

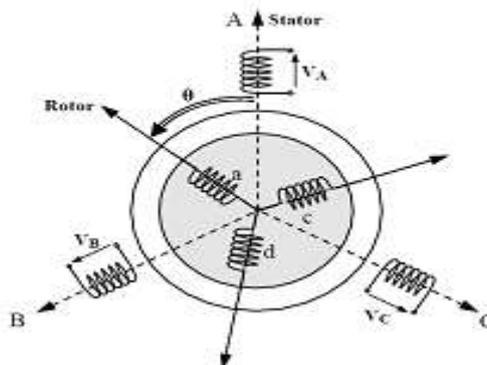


Fig. II.29 Transformation de Park (*abc* à *dq*)

$$P_{\theta} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.59})$$

La (fig. II.29), montre alors la disposition des systèmes d'axes dans l'espace électrique. Le rotor et le stator de la machine, alors désignés machine de Park, tournent à la même vitesse de telle sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires [18]:

$$\frac{d}{dt} \varphi_{s\,dqo} = V_{s\,dqo} - R_s \cdot i_{s\,dqo} - \delta \cdot \varphi_{s\,dqo} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{II.60})$$

$$\frac{d}{dt} \varphi_{r\,dqo} = V_{r\,dqo} - R_r \cdot i_{r\,dqo} - \delta \cdot \varphi_{r\,dqo} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.61})$$

$$\delta = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.62})$$

- $V_{s\,dqo}$ est le vecteur tension statorique dans le repère de Park ;
- $i_{s\,dqo}$ est le vecteur courant statorique dans le repère de Park ;
- $\varphi_{s\,dqo}$ est le vecteur flux statorique dans le repère de Park ;
- $V_{r\,dqo}$ est le vecteur tension rotorique dans le repère de Park ;
- $i_{r\,dqo}$ est le vecteur courant rotorique dans le repère de Park ;
- $\varphi_{r\,dqo}$ est le vecteur flux rotorique dans le repère de Park.

Dans le repère de Park, les flux et les courants sont liés par :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{s\,dqo} \\ \varphi_{r\,dqo} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & L_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{s\,dqo} \\ i_{r\,dqo} \end{pmatrix} \quad (\text{II.63})$$

$$L_s = \begin{pmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{pmatrix} \quad (\text{II.64})$$

$$L_r = \begin{pmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.65})$$

$$M_{sr} = \begin{pmatrix} \frac{3M_{\max}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3M_{\max}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3M_{\max}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.66})$$

Dans la suite, on notera $\frac{3.M_{\max}}{2} = M$

Si les grandeurs électriques triphasées sont équilibrées, alors les grandeurs homopolaires sont égales à zéro. Dès lors, les transformées de Park induisent des vecteurs comportant seulement les deux composantes directe d et quadrature q

On écrit Alors les équations matricielles précédentes (II.60), (II.61) comme suit :

Pour les équations électriques :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_o \\ V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \varphi_{sd} \cdot \omega_o \\ V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_o - \omega_r) \\ V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \varphi_{rd} \cdot (\omega_o - \omega_r) \end{aligned} \quad (\text{II.67})$$

$$\omega_o = \frac{d\theta_o}{dt} \quad (\text{II.68})$$

(ω_o) La vitesse angulaire arbitraire.

Pour les équations de flux :

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{aligned} \quad (\text{II.69})$$

($L_s = l_s - m_s$) L'inductance cyclique du stator ;

($L_r = l_r - m_r$) L'inductance cyclique du rotor

II.3.5.4 Calcul du couple électromagnétique

On obtient la puissance instantanée absorbée par la machine en calculant la somme des produits de chaque f.é.m. avec son courant

$$P_m = e_{sd} \cdot i_{sd} + e_{sq} \cdot i_{sq} + (e_{rd} \cdot i_{rd} + e_{rq} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II.70})$$

En exprimant les f.é.m. et en factorisant par rapport aux vitesses angulaires, on obtient :

$$P_m = \varphi_{sd} \cdot i_{sq} + \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \cdot \omega_s + \varphi_{rd} \cdot i_{rq} + \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \cdot \omega_r \quad (\text{II.71})$$

En exprimant les flux en fonction des courants à partir de l'équation (II.69) on constate que :

$$(\varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd}) = -(\varphi_{rd} \cdot i_{rq} - \varphi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II.72})$$

Dans ces conditions, on obtient deux expressions pour le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p. \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad \text{ou} \quad C_{em} = p. (\varphi_{rd} \cdot i_{rq} - \varphi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II.73})$$

Si l'on s'intéresse à l'expression utilisant les grandeurs au rotor on obtient.

$$C_{em} = p. (\varphi_{rd} \cdot i_{rq} - \varphi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II.74})$$

On pose :

$$c_{rd} = p. \varphi_{rd} \cdot i_{rq} \quad c_{rq} = -p. \varphi_{rq} \cdot i_{rd} \quad (\text{II.75})$$

On écrit alors :

$$C_{em} = c_{rd} + c_{rq} \quad (\text{II.76})$$

Si l'on utilise les grandeurs statoriques, l'expression du couple devient :

$$C_{em} = p. \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (\text{II.77})$$

On pose :

$$c_{sd} = p. \varphi_{sd} \cdot i_{sq} \quad c_{sq} = -p. \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (\text{II.78})$$

On écrit alors :

$$C_{em} = c_{sd} + c_{sq} \quad (\text{II.79})$$

La première expression du couple (II.74) conduit à la commande vectorielle de la machine dite « à flux rotorique orienté », alors que la seconde expression (II.77) sera utilisée pour la commande dite « à flux statorique orienté » [4].

En dérivant la relation reliant l'angle statorique à celui du rotor suivante :

$$\theta_s = \theta_r + a \quad (\text{II.80})$$

On retrouve alors la relation entre la pulsation statoriques ω_s et la pulsation rotorique ω_r :

$$\omega_r = \omega_s - p. \Omega_{mec} \quad (\text{II.81})$$

Ω_{mec} Est la vitesse de rotation de la machine.

Pour la machine polyphasée (m phases) ramenée à la machine biphasée. Il faut multiplier toutes les expressions du couple électromagnétique par le coefficient $K = 0.5$ [9]; alors l'expression du couple s'écrit comme suit :

$$C_{em} = \frac{m}{2} p. \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (\text{II.82})$$

Et, l'équation mécanique de la machine s'écrit

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.83})$$

$$C_{vis} = f. \Omega_{mec} \quad (\text{II.84})$$

Nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{aligned}
 C_{em} &= p \cdot (\varphi_{qr} \cdot I_{dr} - \varphi_{dr} \cdot I_{qr}) \\
 C_{em} &= p \cdot (\varphi_{ds} \cdot I_{qs} - \varphi_{qs} \cdot I_{ds}) \\
 C_{em} &= p \cdot M \cdot I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{qs} \cdot I_{qr} \\
 C_{em} &= p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds})
 \end{aligned} \tag{II.85}$$

II.3.5.5 Choix du référentiel

A) Référentiel lié au stator

$$\frac{d\theta_o}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = -\omega \tag{II.86}$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

B) Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_o = \omega$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_o}{dt} = \omega \tag{II.87}$$

C) Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_o = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_s \\
 V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \\
 V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
 V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned} \tag{II.88}$$

On a donc :

$$\begin{aligned}
 V_{ds} &= R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\
 V_{qs} &= R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr} \\
 V_{dr} &= R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s L_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} + \omega_r L_r I_{qr} + \omega_r M I_{qs} \\
 V_{qr} &= R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s L_r I_{dr} + \omega_s M I_{ds} - \omega_r L_r I_{dr} - \omega_r M I_{ds}
 \end{aligned} \tag{II.89}$$

Ce système d'équation (II.89) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{matrix} &= \begin{matrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{matrix} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} + \begin{matrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{matrix} \frac{d}{dt} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} + \omega_s \begin{matrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{matrix} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} \\
 &+ \omega_r \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{matrix} \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} \tag{II.90}
 \end{aligned}$$

$$[V] = A I + B \frac{d}{dt} I + \omega_s C I + \omega_r D I \tag{II.91}$$

$$\begin{aligned}
 V &= \begin{matrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{matrix} \quad I = \begin{matrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{matrix} \quad \varphi = \begin{matrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{matrix} \quad A = \begin{matrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{matrix} ; \\
 B &= \begin{matrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{matrix} \quad C = \begin{matrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{matrix} \quad D = \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{matrix} .
 \end{aligned}$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \tag{II.92}$$

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \tag{II.93}$$

II.3.6 Résultats de simulation.

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

Les figures ci dessous sont obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1600 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence de 50Hz et d'amplitude $V = \sqrt{2} \cdot 220$ V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 22V et une fréquence égale à la fréquence rotorique ($g \cdot \omega_s$)

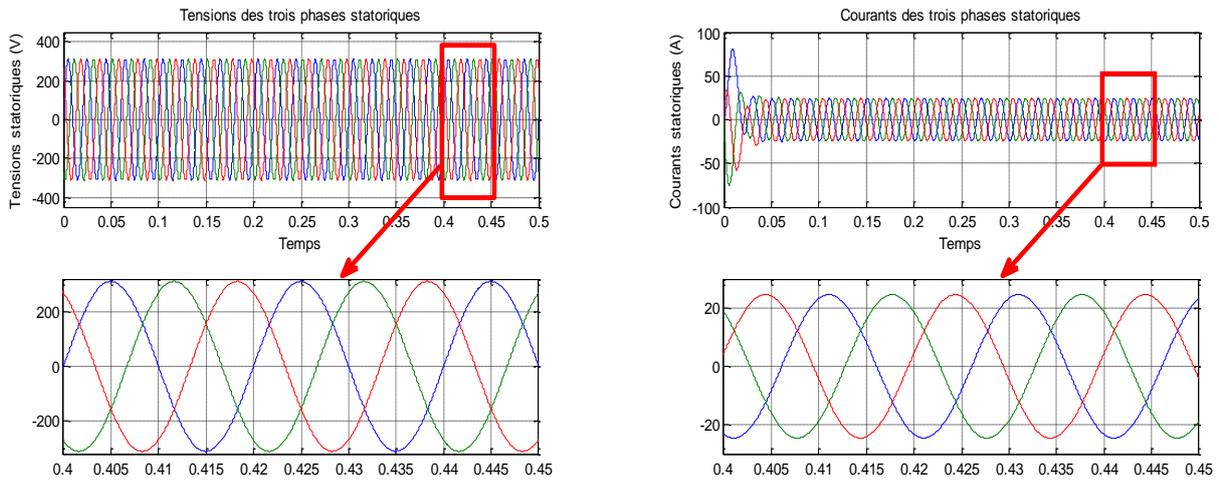


Fig. II.30 Tensions et courants statoriques de la MADA

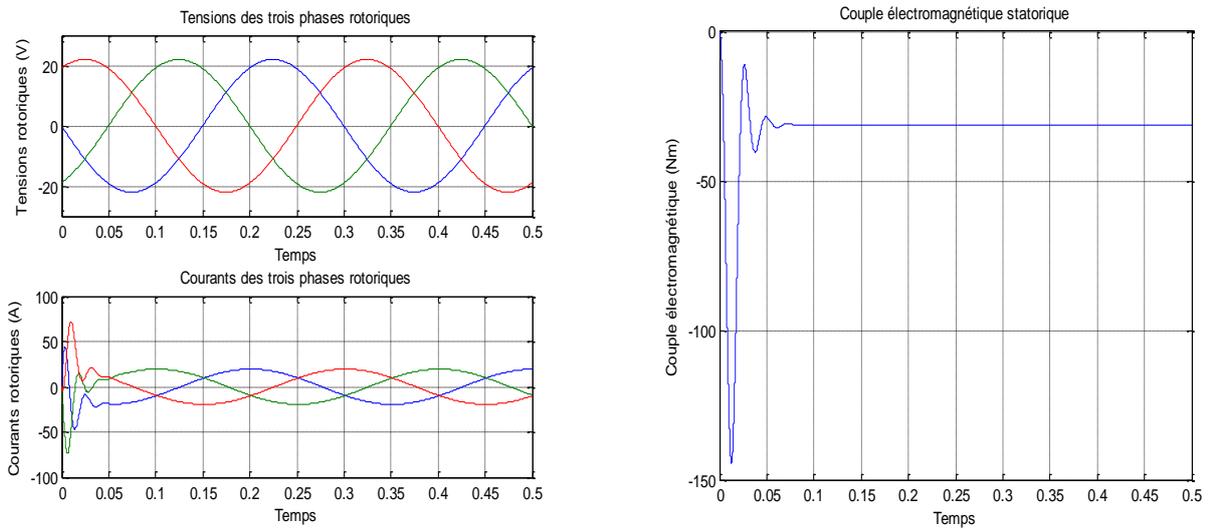


Fig. II.31 les Tensions courants rotoriques et couple électromagnétique de la MADA

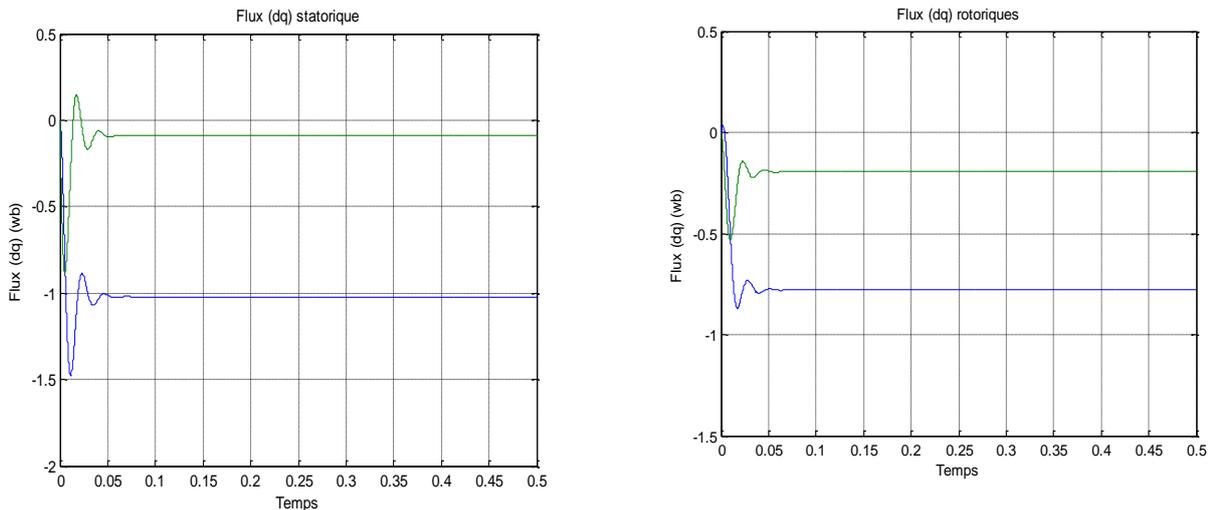
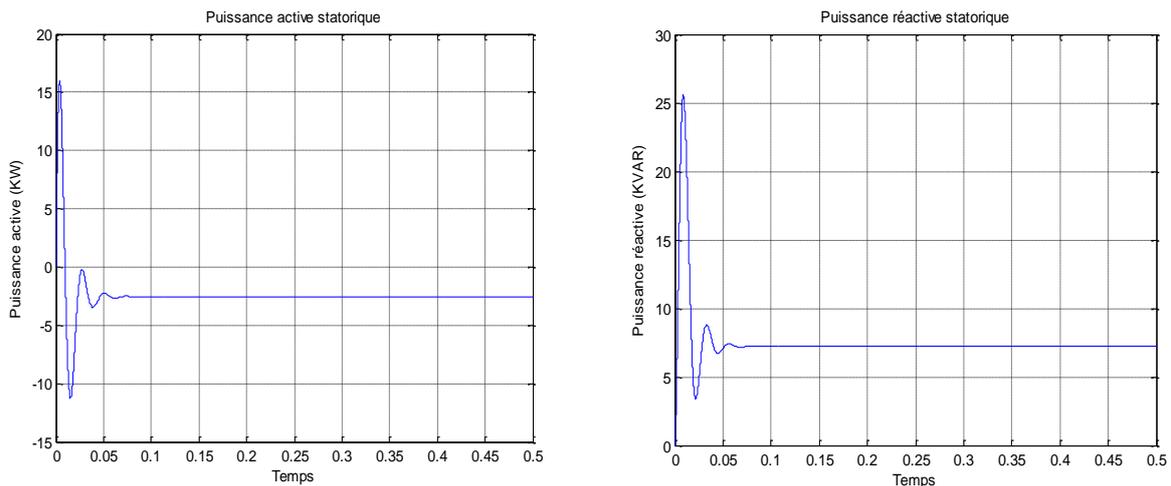


Fig. II.32 Flux statoriques et rotoriques de la MADA**Fig. II.33** Puissances actives et réactives statoriques de la MADA

Les résultats de simulation obtenus montrent que pendant le régime dynamique, la puissance délivrée au réseau est négatif atteint au démarrage une valeur maximale - 11.28 KW. On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs 0,05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50Hz pour les courants statoriques.

II.4. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

II.4.1 Définition

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET...). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI. L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des

tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [9]. La (Fig. 34), représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine.

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [26].

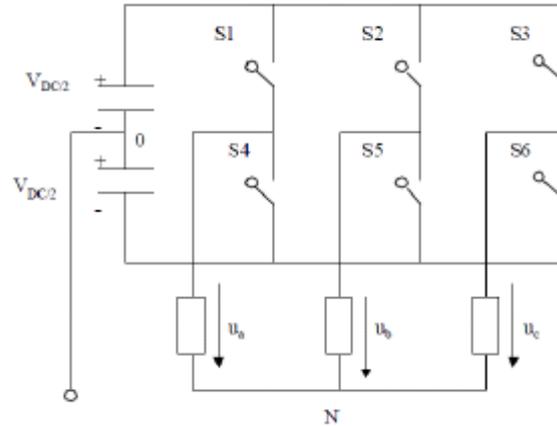


Fig. II.34 Onduleur de tension à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables (S_a, S_b, S_c) en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

- **Branche 1**

$S_a = 0$ si S_1 est en position off et S_4 est à on.

$S_a = 1$ si S_1 est en position on et S_4 est à off.

- **Branche 2**

$S_b = 0$ si S_2 est en position off et S_5 est à on.

$S_b = 1$ si S_2 est en position on et S_5 est à off.

- **Branche 3**

$S_c = 0$ si S_3 est en position off et S_6 est à on.

$S_c = 1$ si S_3 est en position on et S_6 est à off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{DC} - (S_a - S_b) \\ U_{bc} &= V_{DC} - (S_b - S_c) \\ U_{ca} &= V_{DC} - (S_c - S_a) \end{aligned} \quad (\text{II.94})$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$u_a + u_b + u_c = 0 \quad (\text{II.95})$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ u_b &= \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ u_c &= \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{aligned} \quad (\text{II.96})$$

D'où on obtient :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{V_{DC}}{3}(2.S_a - S_b - S_c) \\ u_b &= \frac{V_{DC}}{3}(2.S_b - S_a - S_c) \\ u_c &= \frac{V_{DC}}{3}(2.S_c - S_b - S_a) \end{aligned} \quad (\text{II.97})$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.98})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie [26].

II.4.2 Principe de la MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [9]. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante

procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur [12].

La (Fig. II.34) représente un onduleur triphasé de tension commandé par MLI. Celui-ci alimente une charge triphasée de type R L E à partir d'un générateur de tension continue.

En contrôlant les états des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur, on fixe les valeurs des tensions de sortie de l'onduleur U_{a0} , U_{b0} , et U_{c0} à $+0.5\mu_F$ ou $-0.5\mu_F$.

ou $\mu_F = 800$ V. L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions U_{ao} , U_{bo} , et U_{co} sur chaque période de commutation. Dans ce cas, les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques f_a , f_b et f_c qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire. A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tensions dont les valeurs moyenne forment elle aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas ci d'une modulation sinus triangle, par les phases du récepteur ne sont pas directement égales à celles fournies à la sortie de l'onduleur et se déduisent de celles-ci par la relation suivante, si on admet que la somme des tensions aux bornes des phases du récepteur est nulle :

Cette relation est valable tant au niveau des valeurs instantanées des tensions que de leurs valeurs moyennes sur une période MLI. Il suffit de prendre comme valeurs de référence pour $u_{ao} + u_{bo} + u_{co}$ les valeurs de référence souhaitées pour $u_a + u_b + u_c$ pour que ces tensions suivent en moyenne leurs références sur chaque période MLI.

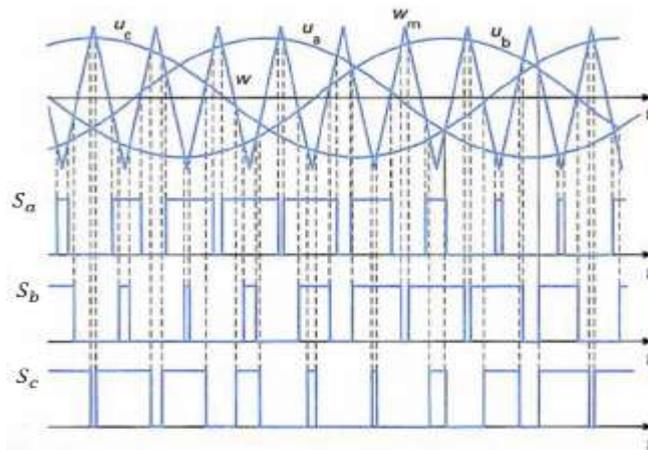


Fig. II.35 Principe de la MLI triangulo-sinusoïdale.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation (m) qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.99})$$

- Taux de modulation (r) qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p):

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (II.100)$$

Le choix d'un indice de modulation (m) multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation (r) varie suivant la référence imposée.

II.4.3 Résultats de simulation

Pour cette stratégie de commande, on visualise les tensions de phase u_a, u_b, u_c et son spectre d'harmoniques, pour une fréquence $f_s=50$ Hz et un rapport d'amplitude $r=0.85$, et cela pour une valeur de $m=21$. Les résultats de simulation sont représentés par les figures suivantes.

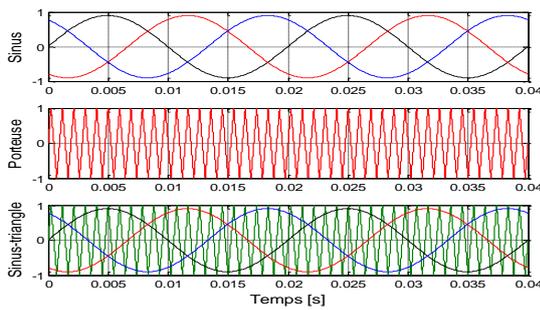


Fig. II.36 Principe de la MLI sinus triangle

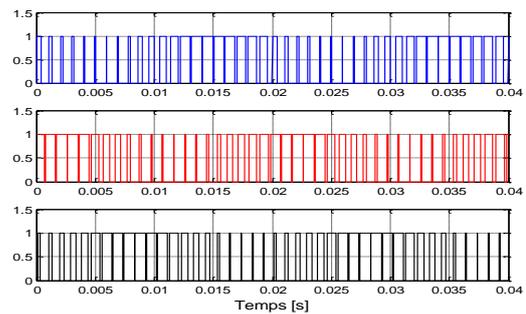


Fig. II.37 signes de commande de l'onduleur

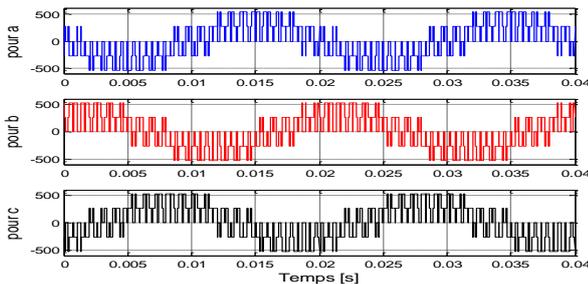


Fig. II.38 Tensions simples de l'onduleur

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles de système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la MADA.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, Au terme de ce survol effectué dans le domaine de l'état de l'art sur la MADA, l'on constate l'intérêt grandissant

accordé par les divers auteurs à cette machine, où chacun a essayé de l'étudier sous un aspect particulier. On remarque également que la majorité des sujets traités concernent le fonctionnement générateur avec une visée sur les applications éoliennes puis à l'étude la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Des résultats de simulation sont présentés.

Dans la dernière partie nous avons présenté le modèle de l'onduleur, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la commande vectorielle de la MADA afin d'optimiser la puissance délivrée au réseau électrique.

Chapitre III

Contrôle des puissances active et réactive de la MADA

III.1 Introduction

Les qualités de la machine à courant continu, résumées essentiellement dans le découplage naturel entre le flux et le couple, ont fait de cette machine et pendant longtemps, le meilleur moyen utilisé dans les entraînements électriques à vitesse variable.

Cependant, la présence du collecteur mécanique dont est dotée la machine à courant continu limite son emploi à des domaines où la vitesse et la puissance sont relativement réduites. Cette limitation a contraint les chercheurs à la remplacer par la machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné en effet, la machine à induction est de construction simple, robuste, supporte les surcharges et nécessite peu d'entretien, qualités que ne possède pas la machine à courant continu. En revanche, la commande de la machine à induction est difficile. Cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor. Par conséquent, toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux [18]. Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle.

Cette dernière a été proposée en 1971 par Blashke [18]. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Où bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

III.2 Principe de la commande vectorielle

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la (Fig. III.1).

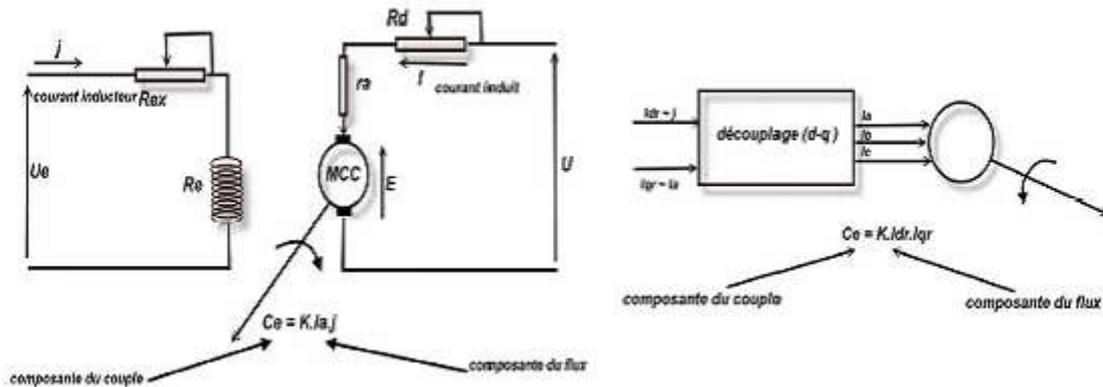


Fig. III.1 Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle de moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire, mais très importante de l'électromagnétisme. à savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale pour des intensités du courant et du champ donnés quand le vecteur courant sera perpendiculaire au vecteur champ.

Appliquée aux moteurs électriques, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courant et les vecteurs flux résultants. Si le principe est naturellement appliqué pour les MCC, ce n'est pas le cas pour les machines à courant alternatif; par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande par orientation de ces deux grandeurs. [17].

De nombreuses variétés ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer, suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

Dans ce travail, il sera exposé le développement de la commande vectorielle à flux statorique orienté de la MADA. Ainsi, comme il est montré dans la (Fig. III.2), le flux sera callé sur l'axe d et la tension du stator sur l'axe q, cette dernière contrainte est favorable pour disposer d'un modèle de commande simplifié.

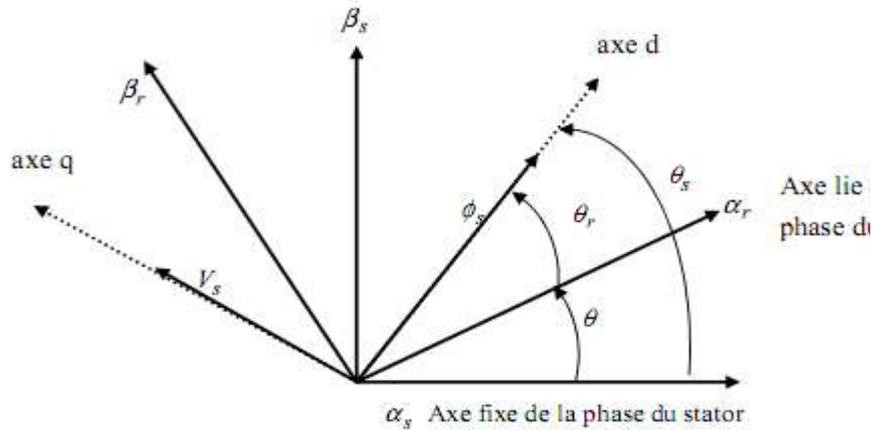


Fig. III.2 Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

Rappelons que l'expression du couple électromagnétique est donnée par :
Couple électromagnétique de la machine à courant continu

$$C_{em} = K \cdot \varphi_f \cdot i_a \quad (III.1)$$

Couple électromagnétique de la machine MADA que nous allons examiner :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} - \varphi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (III.2)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\varphi_s = \varphi_{ds} \Rightarrow \varphi_{qs} = 0 \quad (III.3)$$

Le couple électromagnétique s'écrit alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \varphi_{sd} \cdot i_{sq} \quad (III.4)$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple électromagnétique peut être contrôlé indépendamment du flux par action sur le courant i_{sq} , ce qui est l'objectif de la commande vectorielle.

III.3 Modèle de la MADA à flux statorique orienté

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine. [14]

Rappelons le système d'équations différentielles (II.88), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \varphi_{sq} \cdot \omega_s \\
 V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \varphi_{sd} \cdot \omega_s \\
 V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
 V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned}
 \tag{III.5}$$

Avec un flux statorique constant et orienté ($\varphi_s = \varphi_{ds}$ et $\varphi_{qs} = 0$).

Ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante [31]:

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} \\
 V_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \varphi_s \cdot \omega_s \\
 V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
 V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned}
 \tag{III.6}$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [15]:

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= 0 \\
 V_{sq} &= V_s = \varphi_s \cdot \omega_s \\
 V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \varphi_{rq} \cdot (\omega_s - \omega_r) \\
 V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \varphi_{rd} \cdot (\omega_s - \omega_r)
 \end{aligned}
 \tag{III.7}$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{ds} &= \varphi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\
 0 &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\
 \varphi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\
 \varphi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs}
 \end{aligned}
 \tag{III.8}$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{V_s}{\omega_s} \cdot i_{sq}
 \tag{III.9}$$

C_{em} : Le couple électromagnétique.

P : Le nombre de paires de pôles.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive.

Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

III.3.1 Expressions des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactive statoriques, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s &= V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s &= V_{qs} \cdot I_{ds} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

Les puissances active P_s et réactive Q_s sont donc fonction des courants statoriques I_{qs} et I_{ds} respectivement, sur lesquels nous n'avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} I_{ds} &= -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ I_{qs} &= -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans (III. 10), on trouve.

$$\begin{aligned} P_s &= -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s &= -V_s \cdot \frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

Il ressort de l'expression (III.13) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive est proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s}$ imposée par le réseau [19].

III.3.2 Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équations (III.8), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \varphi_{dr} &= L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{qr} &= L_r - \frac{M^2}{L_s} \cdot I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (III.7), on trouve [19]:

$$\begin{aligned} V_{rd} &= R_r \cdot I_{dr} + s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{rq} &= R_r \cdot I_{qr} + s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{aligned} \quad (III.15)$$

A partir des systèmes d'équations (III.13) et (III.15), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous :

Ou: g est le glissement de la machine.

s est le variable fréquentiel.

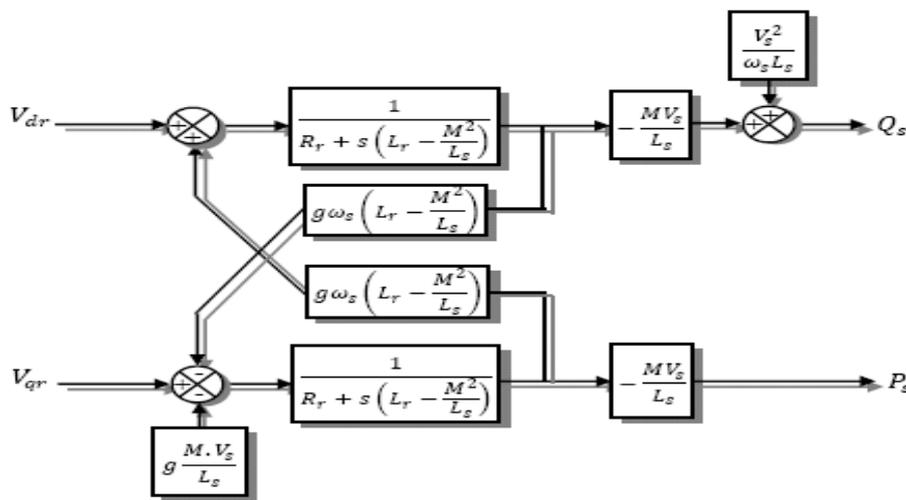


Fig. III.3 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance active pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

L'expression $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des

termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.

III.4 Contrôle indépendant des puissances active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

III.4.1 Commande directe

Si l'on observe les équations (III.13), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M \cdot V_s}{L_s}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (III.15) disparaissent en régime permanent [19]. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r \cdot I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} &= R_r \cdot I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'effet du terme de couplage $g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \frac{M \cdot V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Fig. III.4).

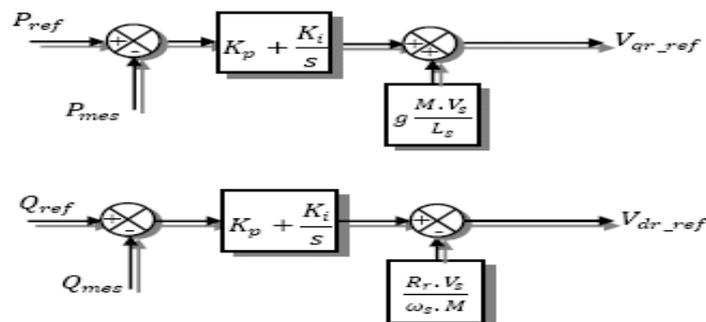


Fig. III.4 Schéma bloc de la commande directe.

III.4.2 Commande indirecte

III.4.2.1 Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir non plus les puissances mais

plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (III.13) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{aligned}
 I_{qr_ref} &= -\frac{L_s}{M \cdot V_s} \cdot P_{s_ref} \\
 I_{dr_ref} &= -\frac{L_s}{M \cdot V_s} Q_{s_ref} + \frac{V_s}{\omega_s \cdot M}
 \end{aligned}
 \tag{III.17}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

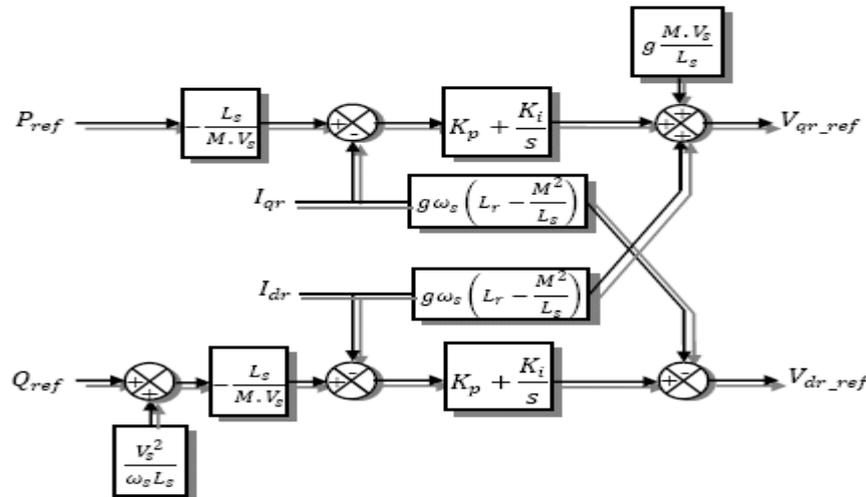


Fig. III.5 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

III.4.2.2 Commande en boucle fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante.

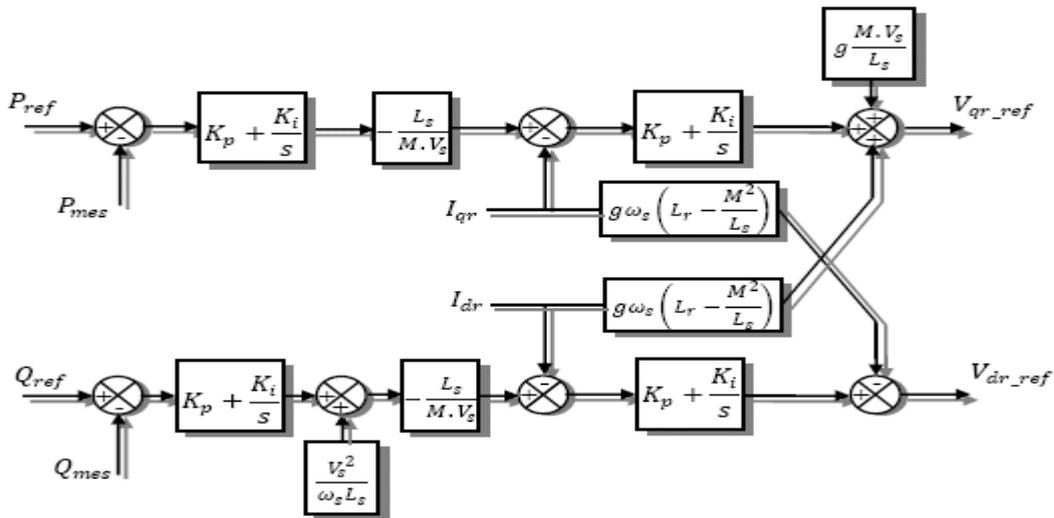


Fig. III.6 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers. Cette structure que nous allons traiter dans notre travail.

La synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux système de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans l'annexe.

III.5 Résultats de simulations

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la MADA obtenu et validé dans le chapitre II. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande en puissances d'une MADA de 300 kW entraînée à une vitesse fixe et pilotée au rotor par un onduleur de tension à deux niveaux.

III.5.1 Simulation du système sans onduleur

Ce paragraphe va permettre d'analyser les résultats obtenus par simulation, utilisé avec le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse (vérification de découplage) avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active et une puissance réactive Les figures ci-dessous montrent les

performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques appliquées à la MADA.

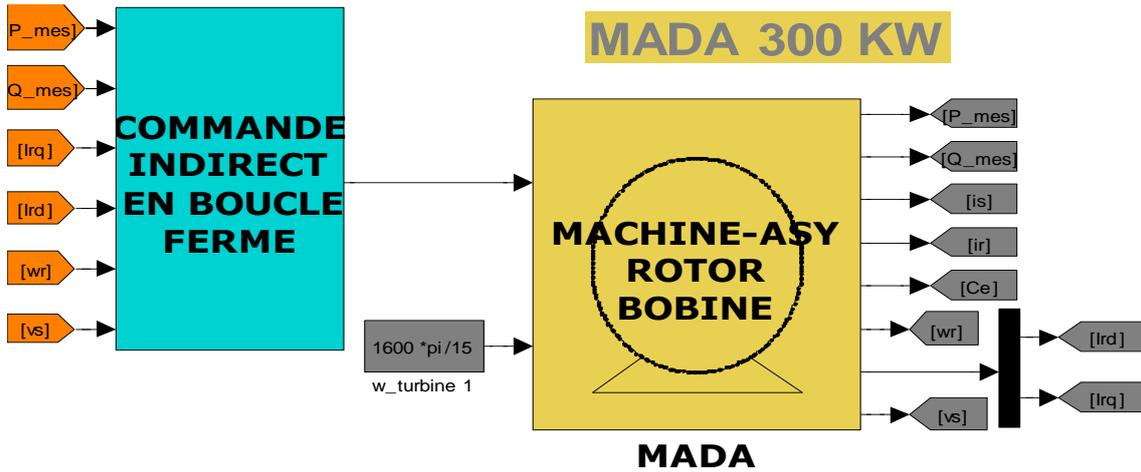


Fig. III.7 Schéma bloc du modèle sans onduleur

• Conditions de simulation

- ✓ Machine entraînée à une vitesse fixe 1600 tr/min.
- ✓ A (t= 0s) la machine est connectée à une source triphasée parfaite d'une tension simple efficace de 400V.
- ✓ A (t= 1s) un échelon sur la référence puissance active de référence (Pref passe de 0 à -300 KW).
- ✓ A (t= 1.5s) un échelon sur la référence de la puissance réactive de référence. (Qref passe de 0 à 200 KVAR).

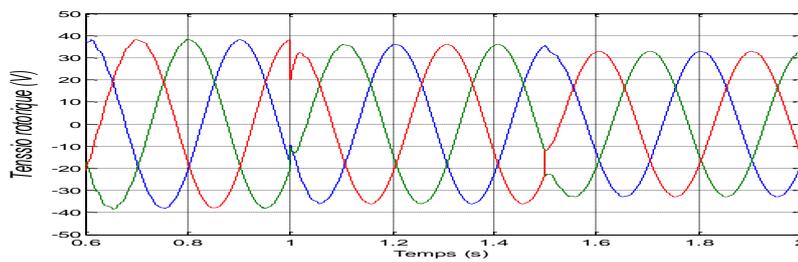


Fig. III.9 Tension rotorique.

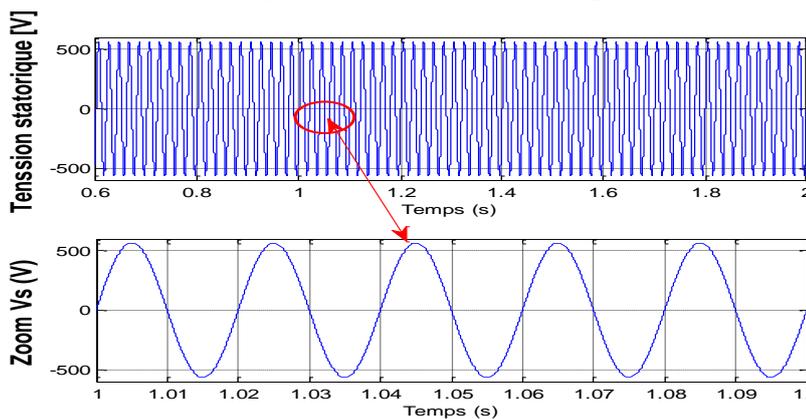


Fig. III.10 Tension statorique avec zoom

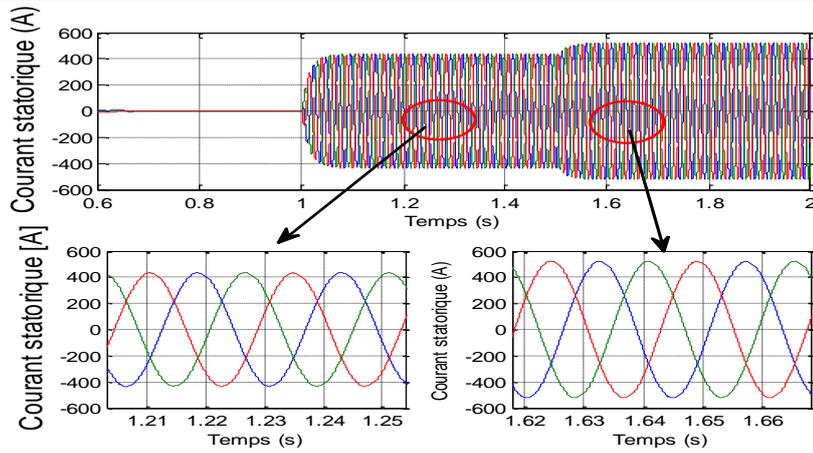


Fig. III.11 Courant statorique avec zoom

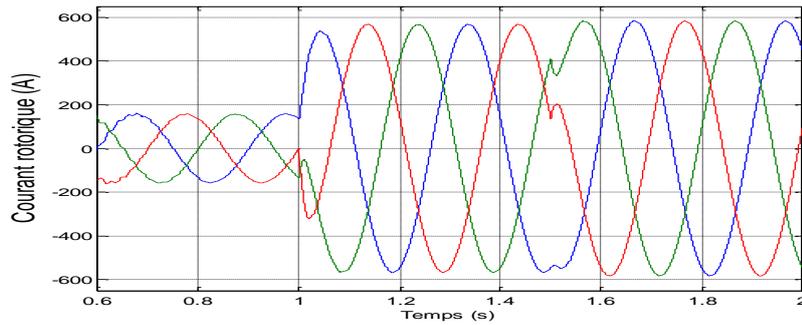


Fig. III.12 Courant rotorique (a, b, c)

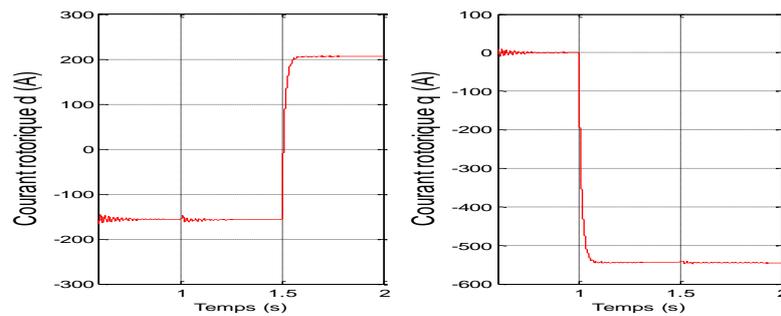


Fig. III.13 Courant rotorique (d, q)

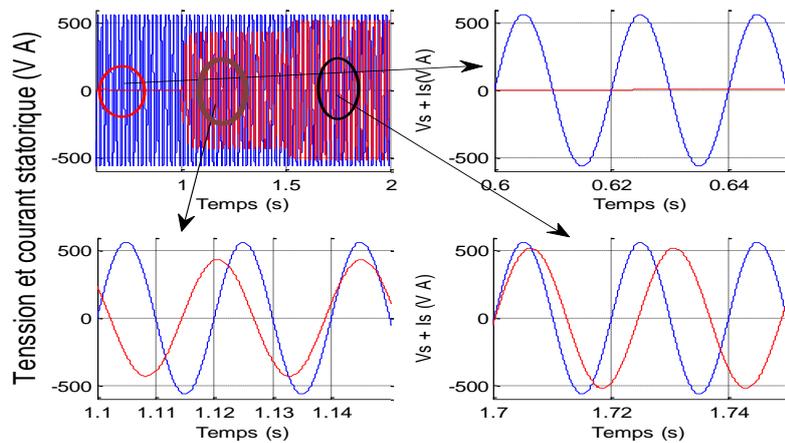


Fig. III.14 Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom

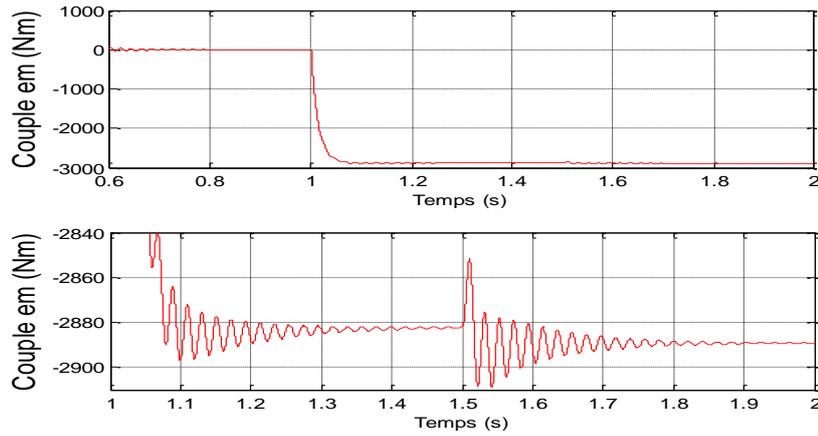


Fig. III.15 *Le couple électromagnétique*

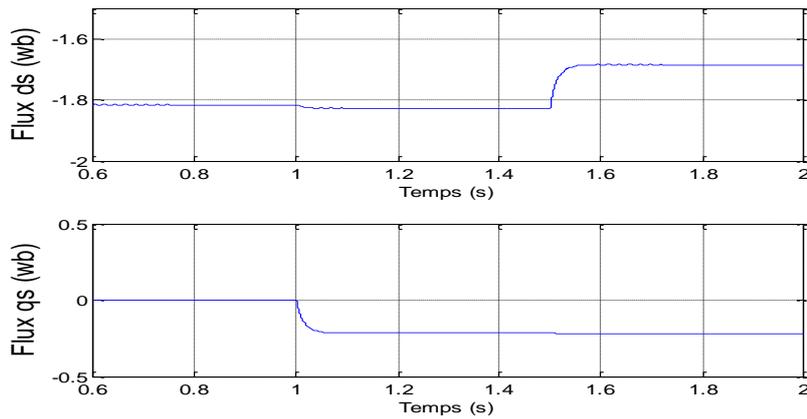


Fig. III.16 *Le flux rotorique selon l'axe d et q*

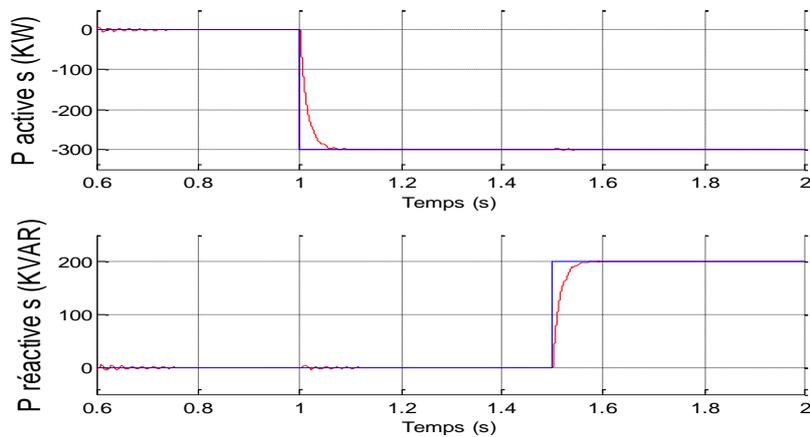


Fig. III.17 *Suivi des consignes de Puissance active statorique*

Fig. III.18 *Suivi des consignes de Puissance réactive statorique*

III.5.1.1 Interprétation des résultats

- Les résultats de simulation sont présentés par, les différentes courbes obtenues par la commande des puissances active et réactives générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances active et réactive du générateur ou encore celles du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique I_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe I_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.
- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.
- La puissance active du côté statorique est négative après l'instant $t=1s$ ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.
- La puissance réactive est nulle entre les instant $t=0s$ et $t=1.5s$, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire.
- On retrouve ainsi le découplage si avantageux des moteurs à courant continu.
- La fréquence des courants rotoriques vaut $gfs = 3.33$ Hz

Nous pouvons également observer la présence d'une erreur statique sur les deux axes ceci est dû au fait que dans ce mode de contrôle, la puissance n'est pas mesurée directement mais elle est plutôt reconstruite à partir de la mesure des courants rotoriques. Ce sont en fait ces mêmes courants qui sont asservis. Or les équations utilisées pour la reconstruction sont basées sur le modèle simplifié qui néglige la résistance R_s .

Cette technique nous a permis d'obtenir des courants triphasés statoriques parfaitement sinusoïdaux sans harmoniques, cela est illustré par la (fig. III.15) qui représente un courant et une tension d'une même phase statorique (phase a).

Les deux composantes du courant au rotor sont commandées par deux régulateurs PI donnant les références de la tension au rotor. Cette tension est ensuite commandée par une MLI.

III.5.2 Simulation du système avec onduleur

Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdal, avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -300KW$ à $t=1s$, et une puissance réactive à $t=1.5s$ pour deux fréquences de porteuse :

((A) $f_p=2$ KHz) et ((B) $f_p=5$ KHz).

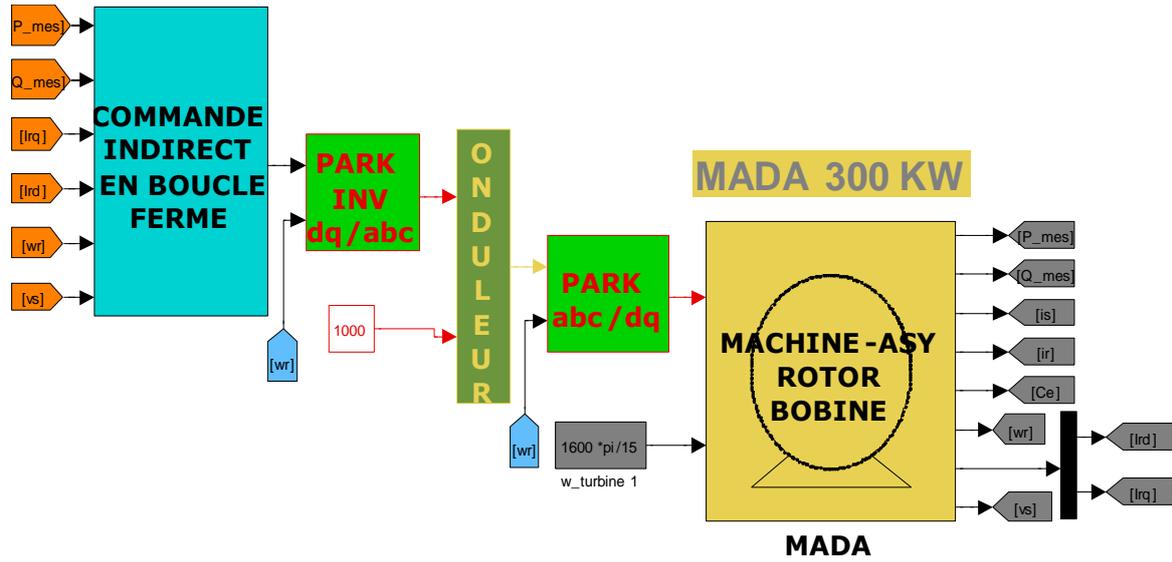


Fig. III.8 Schéma bloc du modèle avec onduleur

- $f_p=5$ KHz

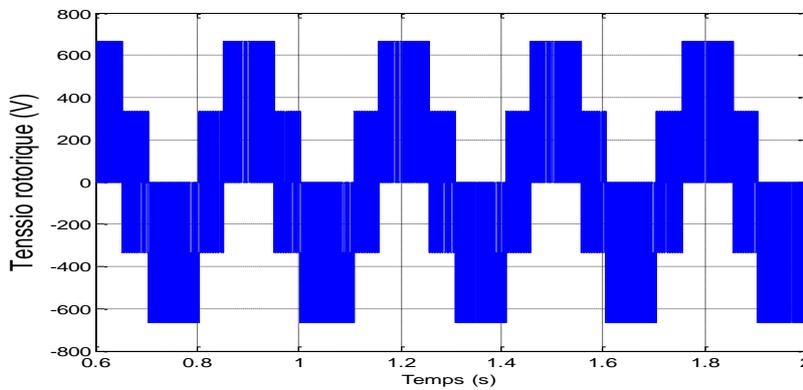


Fig. III.19 Tension rotorique ondulé

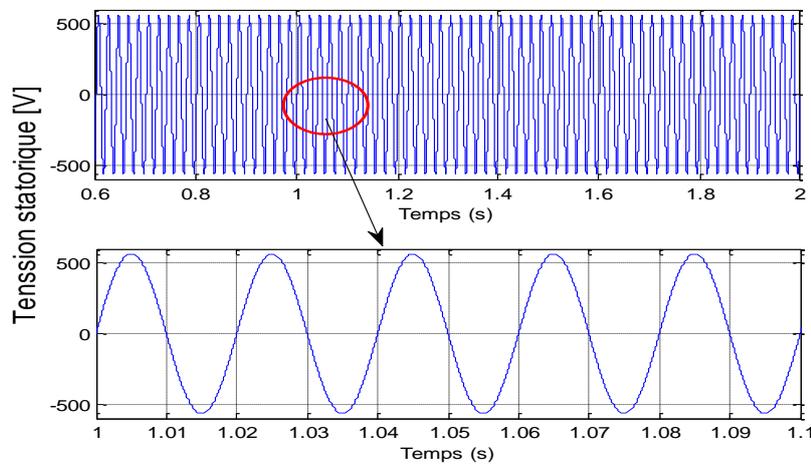


Fig. III.20 Tension statorique avec zoom

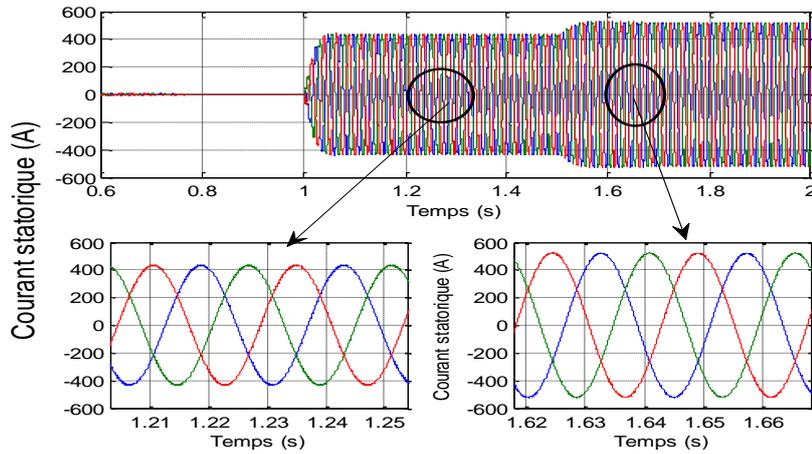


Fig. III.21 Courant statorique avec zoom

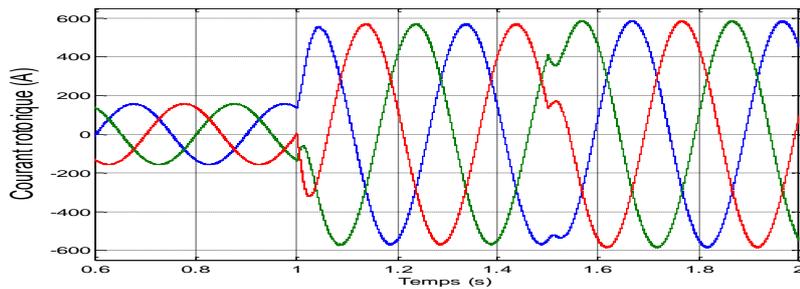


Fig. III.21 Courant rotorique (a, b, c)

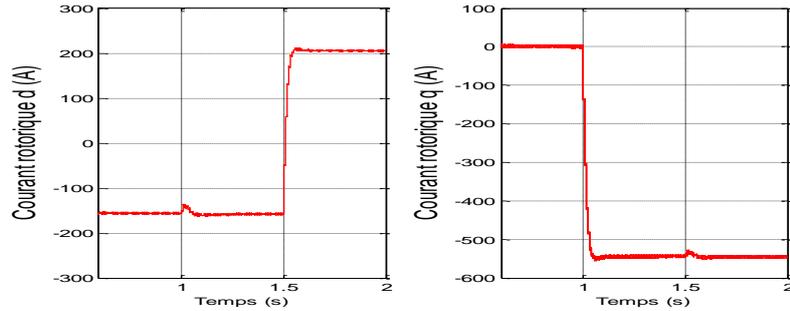


Fig. III.22 Courant rotorique (d, q)

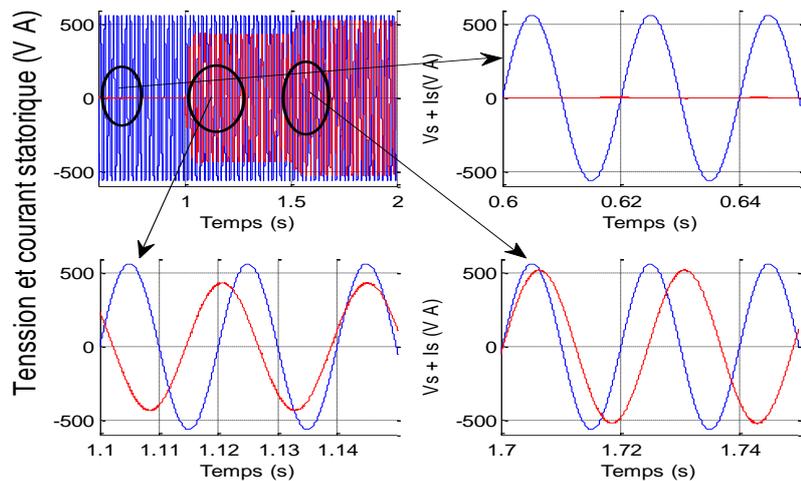


Fig. III.23 Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom

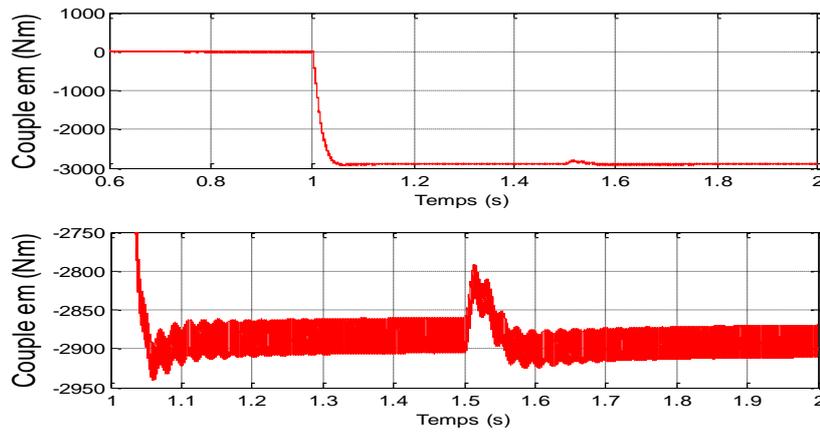


Fig. III.24 *Le couple électromagnétique*

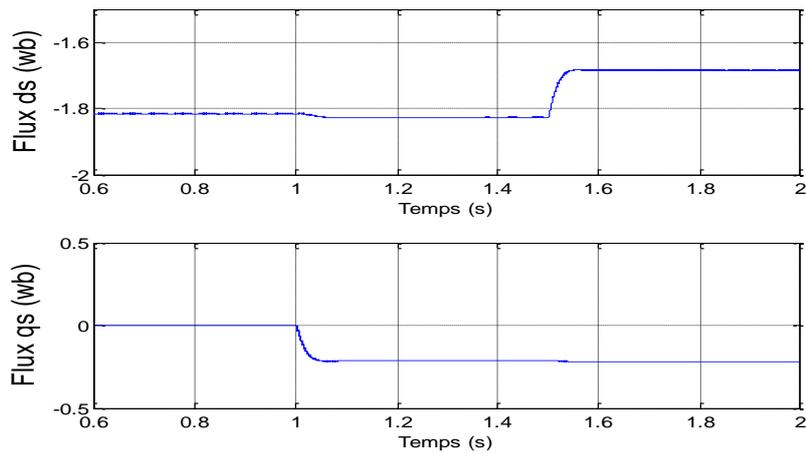


Fig. III.25 *Le flux rotorique selon l'axe d et q*

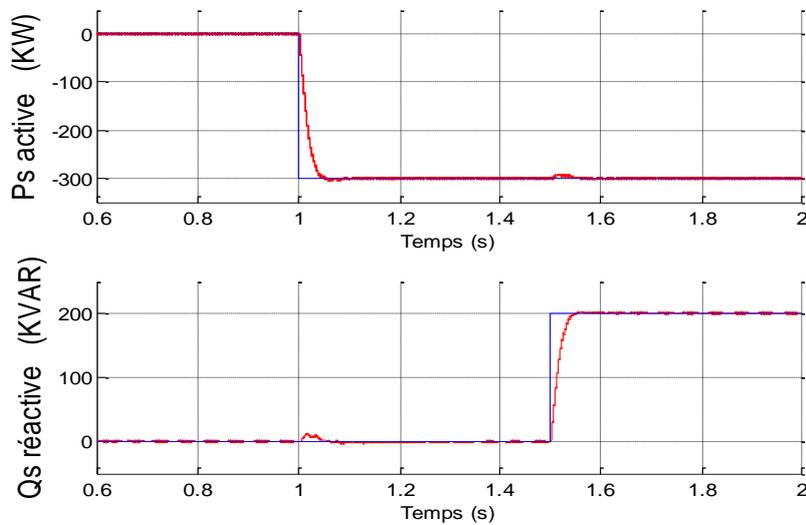


Fig. III.26 *Suivi des consignes de Puissance active statorique*
 Fig. III.27 *Suivi des consignes de Puissance réactive statorique*

- B) $f_p=2$ KHz

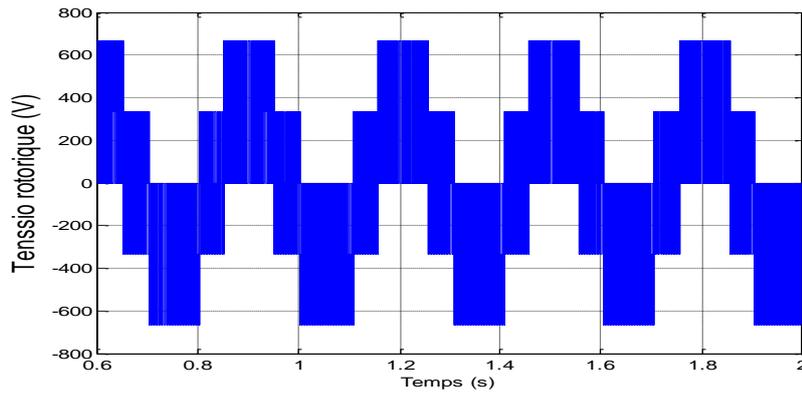


Fig. III.28 *Tension rotorique ondulé*

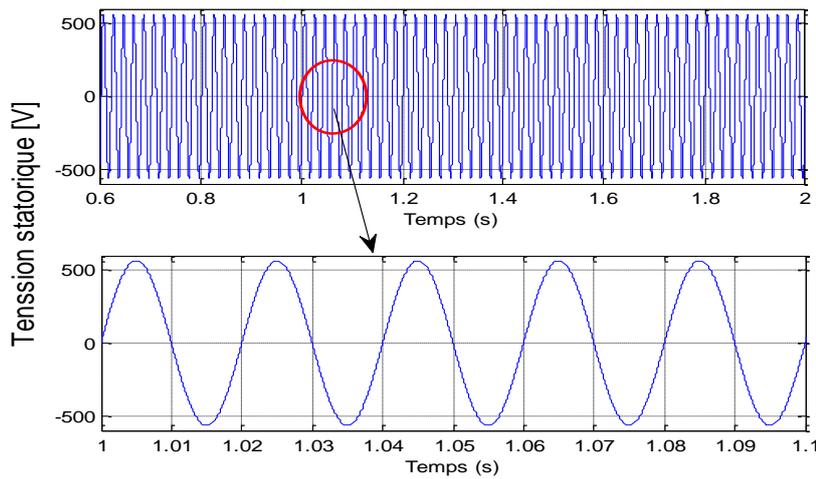


Fig. III.29 *Tension statorique avec zoom*

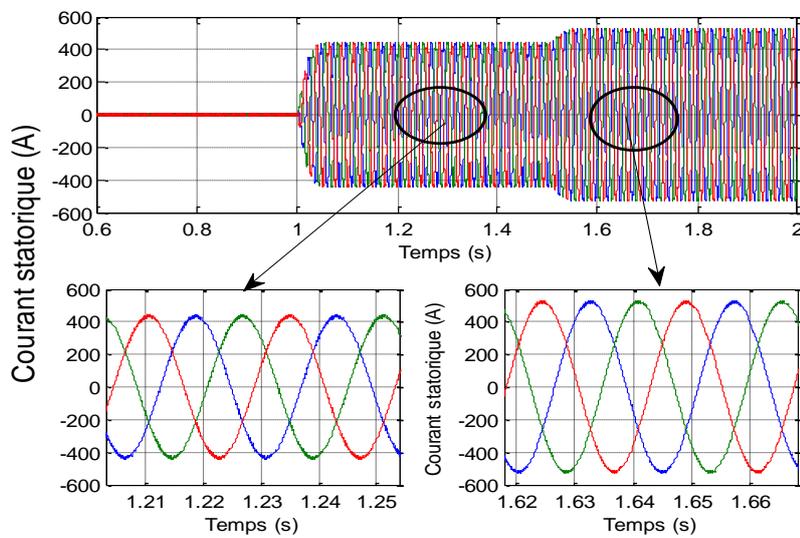


Fig. III.30 *Courant statorique avec zoom*

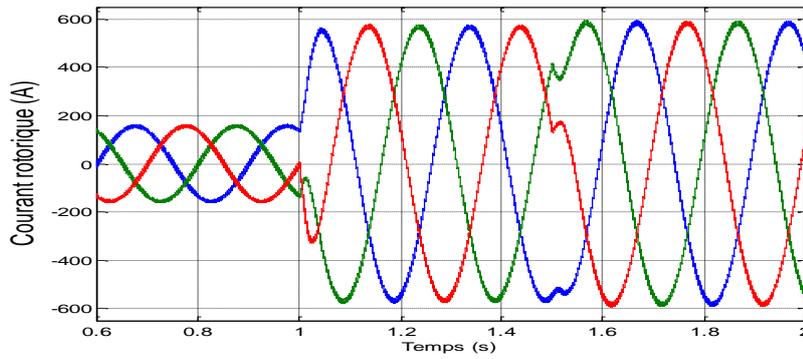


Fig. III.31 Courant rotorique (a, b, c)

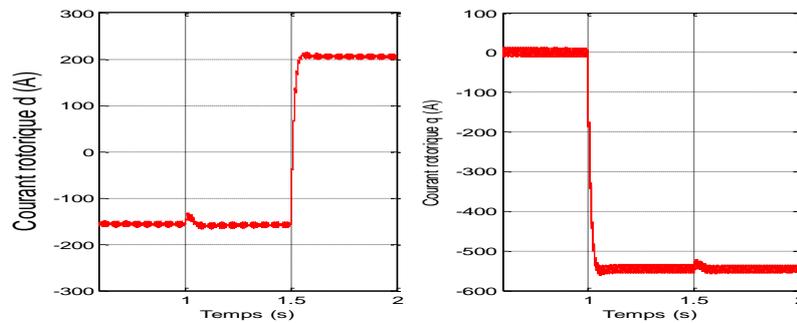


Fig. III.32 Courant rotorique (d, q)

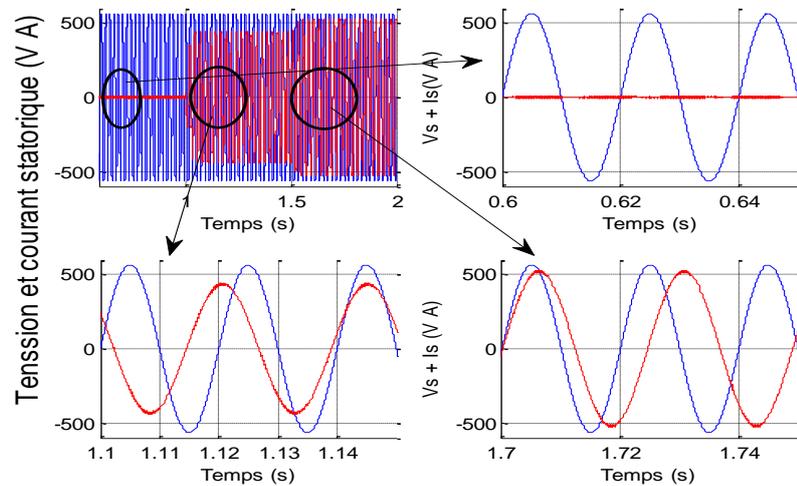


Fig. III.33 Courant et tension d'une phase statorique avec un zoom

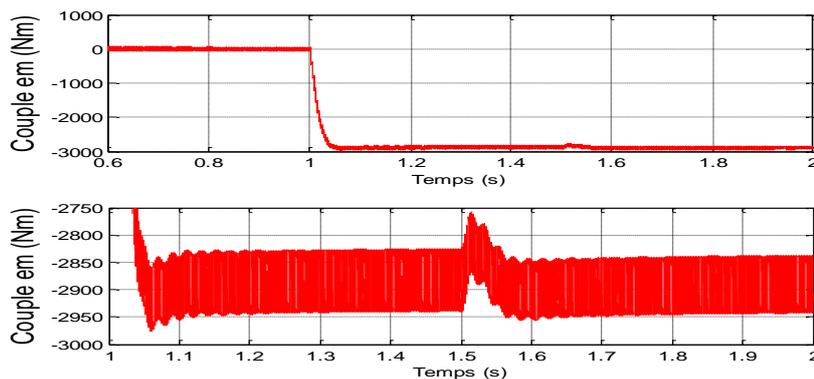


Fig. III.34 Le couple électromagnétique

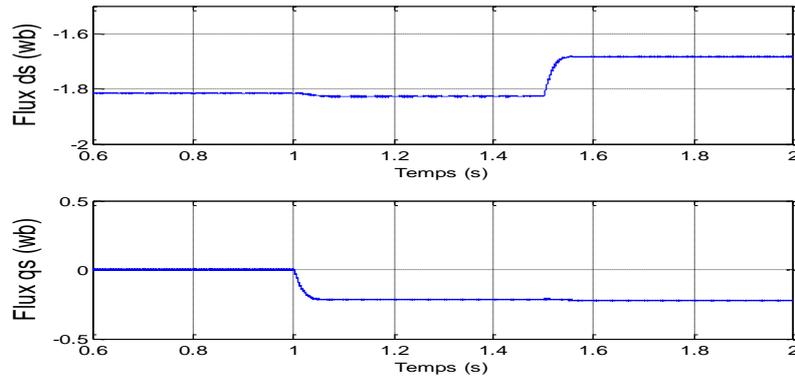


Fig. III.35 Le flux rotorique selon l'axe d et q

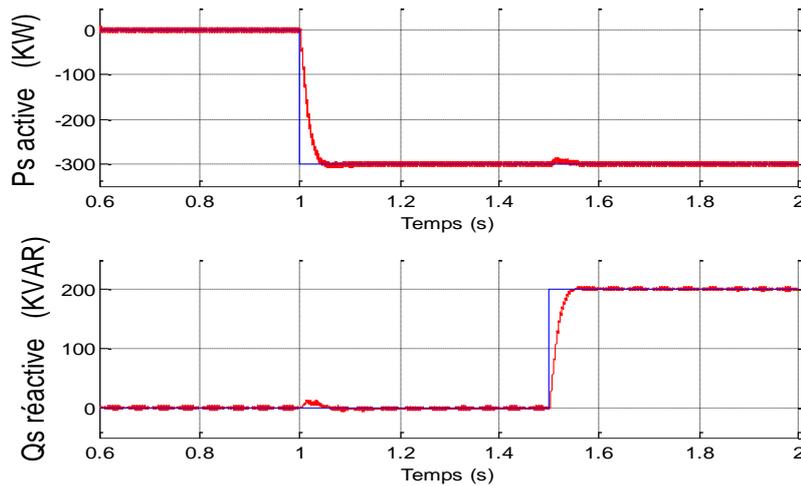


Fig. III.36 Suivi des consignes de Puissance active statorique

Fig. III.37 Suivi des consignes de Puissance réactive statorique

III.5.2.1 Interprétation des résultats

On peut remarquer que quelque soit l'alimentation de la machine avec ou sans onduleur les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes rotorique (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur l'autre.

Aussi, le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

Les résultats obtenus montrent que lorsque la machine fonctionne sans onduleur les courants triphasés statoriques sont parfaitement sinusoidaux sans harmoniques, contrairement à la machine fonctionnant avec un onduleur.

Les figures (A) et (B) montrent les variations des différentes grandeurs lorsque l'onduleur rotorique est pris en compte dans les simulations.

la tension obtenue à la sortie de l'onduleur à MLI fait apparaître clairement deux seuils correspondant à $1/3$ et $2/3$ de $1000V$ valeur de la tension du bus continu .

Les puissances actives et réactives et les courants i_{dr} et i_{qr} s'identifient à leurs références, de même pour le couple électromagnétique qui atteint au démarrage une valeur maximale de -34.1 K N.m .

La fréquence des courants rotoriques vaut $g.fs=3.33\text{Hz}$

Des faibles oscillations pour une fréquence de porteuse $f_p=5 \text{ KHz}$.

III.5.3 Les résultat de la chaine éolienne

Le teste de performance de la chaine éolienne est fait en considérant un vent de vitesse variable qui touche aux trois zones de fonctionnement de l'éolienne. La machine étant raccordée à un réseau de grande puissance d'une tension nominale efficace de 400 V et d'une fréquence de 50 Hz . Les résultats de simulation de toute la chaine éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

Le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a plusieurs valeurs Le coefficient de puissance est obtenu pour différent angles de calage qui nous donne un $\lambda_{opt} = 8.1$. On remarque que le Coefficient C_p atteint une valeur moyenne de 0.48 , on cherche à le garder au maximum possible dont le but de maximiser la production. Il varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

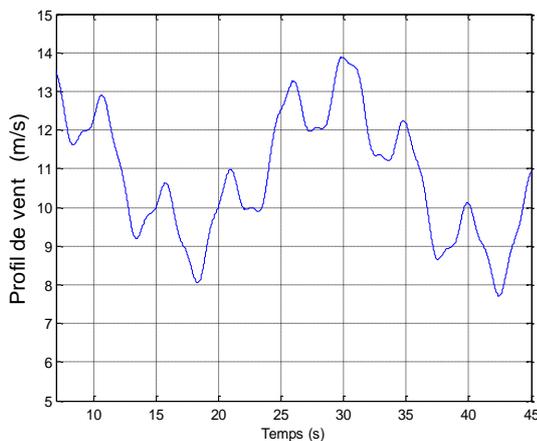


Fig. III.38 Profile du vent

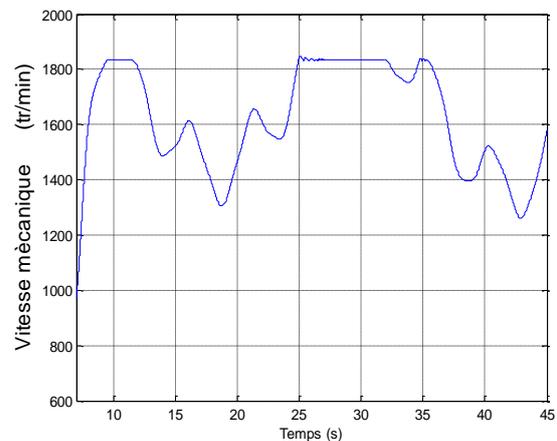


Fig. III.39 Vitesse mécanique

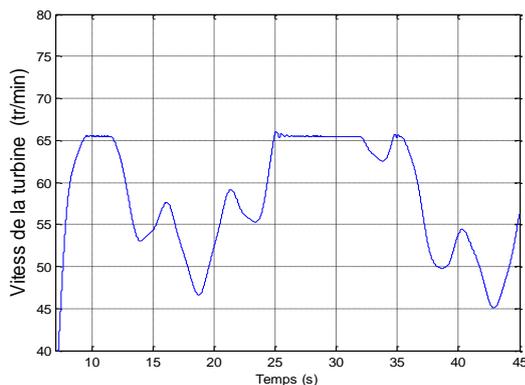


Fig. III.40 Vitesse de la turbine

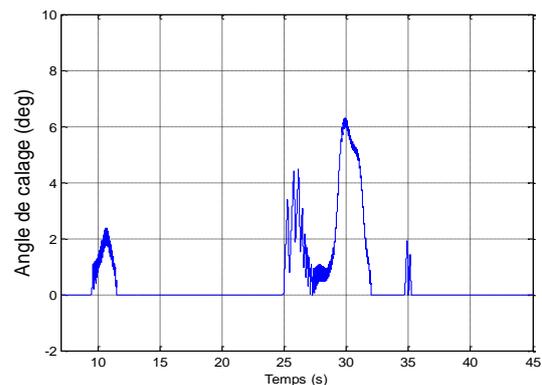


Fig. III.41 Angle de calage de pale

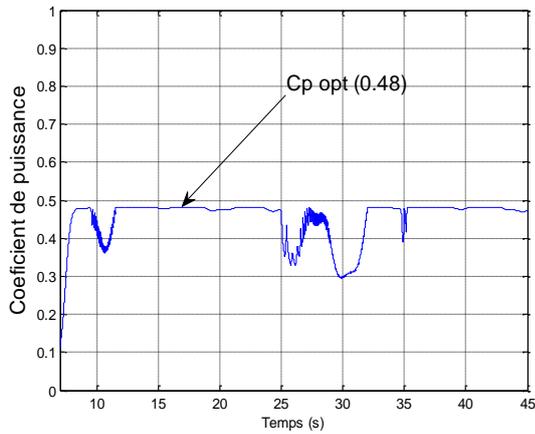


Fig. III.42 Coefficient de puissance

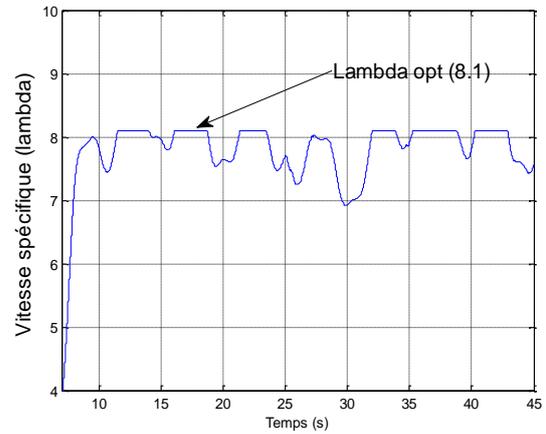


Fig. III.43 Vitesse spécifique TSR

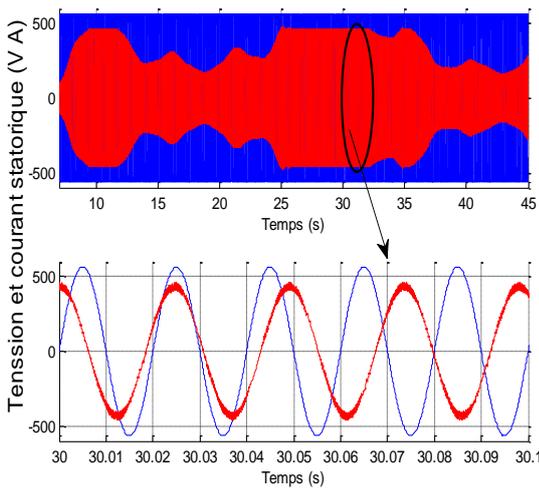


Fig. III.44 Tension et courant statorique avec zoom

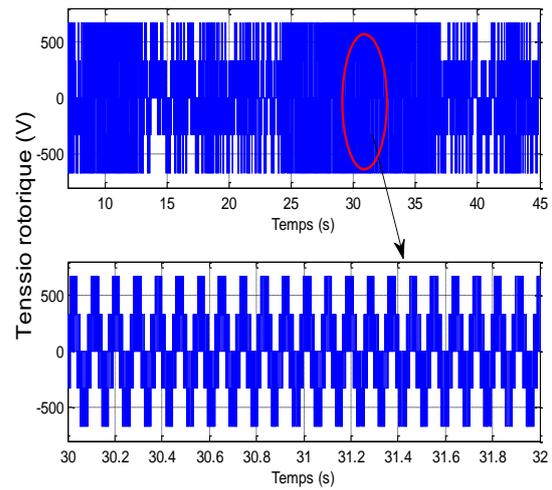


Fig. III.45 Tension rotorique ondulé avec zoom

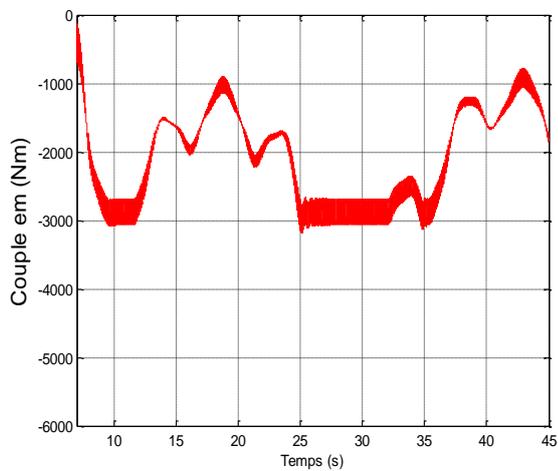


Fig. III.46 Couple em

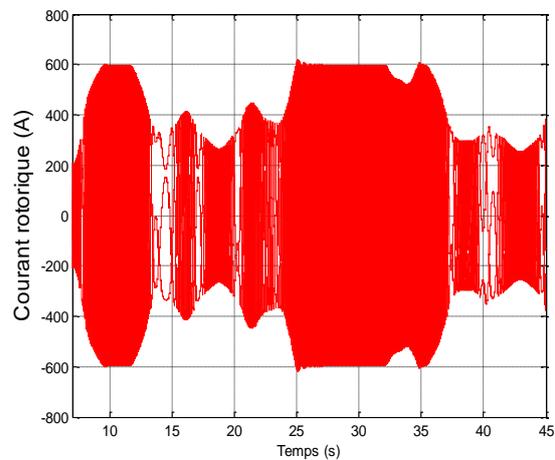


Fig. III.47 Courant rotorique

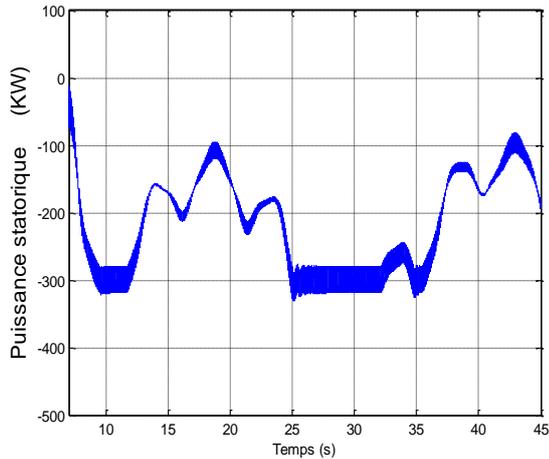


Fig. III.48 Puissances active statoriques

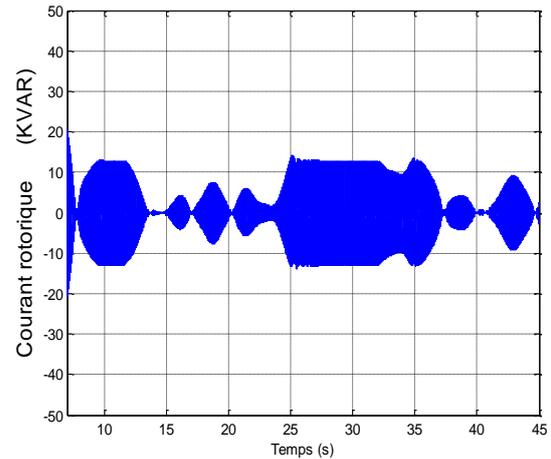


Fig. III.49 Puissances réactive statoriques

III.5.3.1 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par la simulation de l'ensemble Turbine-MADA-Convertisseurs confirment le bon fonctionnement de la chaîne et de son système de commande dans les trois zones de fonctionnement. En effet, pour les faibles vents, d'une vitesse inférieure à 10m/s, le système de commande assure l'optimisation de la puissance extraite en maintenant le coefficient de puissance de la turbine à sa valeur maximale (Fig. III.40). Pour les vents moyens et forts, le système de commande intervient pour maintenir la vitesse de rotation à sa valeur maximale (Fig.III.39). Si la puissance renvoyée au réseau par la MADA atteint sa valeur nominale le système d'orientation des pales agit pour protéger l'éolienne des surcharges en limitant la puissance convertie.

III.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux rotorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répondeuse. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux rotorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC. A la fin de ce chapitre on a présente les résultats de simulation dans le cas de l'association de l'onduleur avec la MADA dont le but d'obtenir une alimentation variable en tension et en fréquence à partir d'une source continu et cela pour deux fréquences de porteuse f_p différentes, cette dernière nous a permis de voir l'influence de f_p sur l'alimentation.

Des résultats de simulation ont été présentés dans le cas de l'association de la MADA à un système de conversion d'énergie et d'un convertisseur d'électronique de puissance. Ce dernier a permis d'effectuer une simulation dans des conditions proches

Chapitre IV

Détection des défauts rotoriques par l'analyse spectrale du courant statorique

IV-1 Introduction

C'est une évidence de constater que la commande des MADA devient de plus en plus complexe, cela est dû à la nature de cette dernière, mais aussi à la volonté de contrôler tous les paramètres et perturbations affectant la MADA. Dans cette dynamique s'est développée la discipline de la sûreté de fonctionnement et, plus particulièrement, l'une de ses composantes connue sous l'acronyme anglo-saxon FDI (Fault Detection and Isolation) Les techniques de FDI sont généralement basées sur l'estimation de l'état de fonctionnement de la MADA et l'analyse de cet état vis-à-vis d'états de référence.

La détection automatique des défaillances devient de plus en plus indispensable à cause de la faiblesse de l'opérateur humain (par sa nature); qui est une conséquence de la faiblesse de l'oubli, et parfois par la pression de l'environnement (bruits, chaleur, ... etc.). Lorsqu'une machine passe vers un nouveau mode de fonctionnement, la détection précoce de l'évolution vers ce mode non désiré permet d'anticiper le diagnostic et d'éviter les risques.

A cet effet, on s'intéresse obligatoirement au diagnostic automatique ; qui permet de détecter de façon précoce les anomalies qui représentent un des moyens sûrs pour contribuer à améliorer la productivité des différents secteurs Nous présenterons dans ce chapitre, l'analyse spectrale du courant statorique en utilisant la transformé de Fourier rapide (FFT) à fenêtre pour la surveillance d'une machine asynchrone à double alimentation. Nous montrerons comment cette méthode permet de déterminer la nature des défauts (circuit ouvert d'une phase rotorique ou statorique). Ainsi, l'apparition du défaut conduit à un dysfonctionnement du système éolien qui l'oblige ainsi à se déconnecter du réseau, en attendant une future opération de maintenance. De plus, si le défaut n'est pas détecté et compensé rapidement, il peut entraîner la destruction des convertisseurs [27].

IV.2 Attributs de la sûreté de fonctionnement

Les attributs de la sûreté de fonctionnement peuvent être résumés comme suit:

- **Disponibilité:** La disponibilité est l'aptitude d'un système à être en état d'accomplir la tâche ou la fonction pour laquelle il a été choisi, dans des conditions données et à un instant donné, c'est à dire, la capacité instantanée à rendre le service.
- **Fiabilité:** Continuité du service, ou l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps déterminé.
- **Efficacité :** est la capacité d'un système à réaliser correctement la tâche ou la fonction pour laquelle il a été choisi, lorsque les conditions de fonctionnement sont nominales.
- **Sécurité-innocuité (safety) :** non occurrence de défaillances a caractère catastrophique.
- **Maintenabilité:** facilité du retour à un état sans erreur après défaillance.
- **Sécurité-confidentialité (security):** non occurrence de défaillances causées par des fautes intentionnelles.

Ces qualités doivent être établies à l'origine de l'installation, mais aussi, être maintenues dans le temps.

IV.3 Terminologie propre au diagnostic :

IV.3.1 Défaut (Fault) : Tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence, lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. Ou n'importe quel état indésirable d'un composant ou d'un système. Un défaut n'implique pas nécessairement une défaillance.

La notion de défaut inclut celle de défaillance ; un défaut n'altère pas nécessairement le fonctionnement d'un système physique mais peut présager d'une défaillance à venir [28].

IV.3.2 Défaillance (Failure): Une défaillance définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées.

Les défauts incluent les défaillances mais la réciproque n'est pas vraie. Un système peut remplir sa fonction tout en présentant une anomalie de comportement. Par exemple, une machine électrotechnique peut produire un bruit anormal tout en entraînant correctement une charge, en supposant que telle soit sa fonction. Le bruit anormal est un défaut qui peut permettre de présager d'une défaillance à venir. La recherche de défauts est donc fondamentale en diagnostic [28].

Perte partielle ou totale des fonctionnalités du système qui le rend incapable de délivrer le service pour lequel il a été conçu.

On peut classifier les défaillances comme suit :

En fonction des causes :

- **Défaillance due à un mauvais emploi** : Défaillance imputable à la présence de contraintes dépassant les capacités prescrites.
- **Défaillance due à une faiblesse inhérente** : Défaillance imputable à une faiblesse inhérente à l'objet lorsqu'il est exposé à des contraintes n'excédant pas les capacités prescrites.

En fonction du degré :

- **La défaillance partielle** : Elle survient suite à un dysfonctionnement d'un élément ou sous-ensemble d'un équipement. La partie en cause présente une dérive de caractéristiques qui ne conduit pas à l'arrêt complet de l'appareil.
- **La défaillance complète** : C'est le cas où l'appareil ne répond plus à sa fonction première.

Ces défaillances peuvent survenir séparément ou quelques fois ensemble. On détermine aussi d'autres types de défaillance :

- ✓ **La défaillance intermittente** : défaillance d'un dispositif subsistant pendant une durée limitée, à la fin de laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir sa fonction requise, sans avoir été soumis à une action corrective externe quelconque. Une telle défaillance est répétitive.

En fonction des conséquences :

- ✓ **Défaillance mineure** : dans laquelle seule la commande est se paramétrée pour utiliser les degrés de liberté existant, elle ne provoque qu'un arrêt de production faible et aucune dégradation notable.
- ✓ **Défaillance majeure** : quand la préparation des ressources est nécessaire en préliminaire à leur utilisation pour l'exécution des opérations bloquées par la panne.
- ✓ **Défaillance moyenne** : nécessitant une remise en état ou une petite réparation.
- ✓ **Défaillance significative** : dans laquelle des ressources sont réaffectées pour exécuter les opérations bloquées par la panne.
- ✓ **Défaillance critique** : nécessite une intervention d'urgence.
- ✓ **Défaillance très critique** : nécessitant une grande intervention.
- ✓ **Défaillance catastrophique** : impliquant des problèmes de sécurité et/ou une production non-conforme.

En fonction de la vitesse d'apparition :

- **La défaillance soudaine** : Elle peut intervenir à n'importe quel moment et peut être due à des agents extérieurs tels que : la surtension sur le réseau d'alimentation, et la foudre. C'est une défaillance imprévisible même lorsque la maintenance préventive est respectée.
- **La défaillance progressive** : Elle est due suite à une négligence dans le processus d'entretien des équipements. Elle est prévisible si un examen antérieur est effectué. C'est le cas par exemple de la baisse du niveau de l'électrolyte dans une batterie d'accumulateurs.

En fonction de la vitesse d'apparition et du degré :

- ❖ **La défaillance catalectique** : C'est la combinaison d'une défaillance soudaine et d'une défaillance complète. Elle est soudaine et complète.
- ❖ **La défaillance par dégradation** : Elle est en même temps progressive et partielle. Elle survient après l'usure de pièces telles que les courroies et les roulements à billes.

.En fonction du taux de défaillance avec le temps :

- ✚ **Défaillance précoce** : ou défaillance en rodage, apparait dans la période de rodage qui se caractérise par un fort taux de défaillance.
- ✚ **Défaillance aléatoire** : représente la durée de vie utile, où le taux de défaillance est quasiment constant, et c'est la période la plus intéressante, puisque les défaillances sont entièrement aléatoires, c'est à dire dues entièrement au hasard. Le taux de défaillance sur cette période permet d'établir des prévisions sur la fiabilité, par le biais de la théorie des probabilités.
- ✚ **Défaillance par usure** : au delà de la durée de vie utile, vient la période d'usure qui se caractérise par l'augmentation progressive du taux de défaillance avec le temps suite aux vieillissements des dispositifs.

En fonction des caractéristiques externes des défaillances :

- **Défaillance statique** : le système produit un résultat non correct de manière permanente (aspects fonctionnels).
- **Défaillance dynamique** : le système a un régime transitoire pendant lequel le système produit un résultat faux puis atteint un régime permanent durant lequel les sorties sont correctes (aspects temporels).
- **Défaillance durable** : le système produit des résultats erronés de manière persistante.
- **Défaillance transitoire** : délai de réponse à un événement infini.
- **Défaillance cohérente ou incohérente** : suivant que la perception de la défaillance est identique pour les utilisateurs ou non.

IV.3.3 Panne (Break-down):

La panne est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir la fonction vitale. Il est clair que dès l'apparition d'une défaillance, caractérisée par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, on déclarera le dispositif en panne. Par conséquent, une panne résulte toujours d'une défaillance et on distingue les classes de pannes suivantes :

- ❖ **Panne de capteur** : dégradation d'une caractéristique des blocs de capteurs (biais, dérive,...) d'où la transmission des mesures erronées.
- ❖ **Panne de processus** : détérioration des paramètres : fuites, rupture des organes....
- ❖ **Panne d'actionneur** : fourniture de valeurs de commande erronées, et possibilité d'avoir une rupture ou un blocage d'actionneur.

Aussi, une panne peut être :

- ❖ **Panne intermittente** : panne d'un dispositif subsistant sur une durée déterminée et limitée. Après cette durée le dispositif est apte à assurer la fonction ou la mission pour laquelle il a été conçu sans avoir fait l'objet d'une action corrective.

En pratique, ce sont les défauts les plus difficiles à diagnostiquer.

- ❖ **Panne fugitive** : panne d'un dispositif qui est intermittente et difficilement observable. Ils sont extrêmement difficiles à diagnostiquer car leur apparition est de nature aléatoire.
- ❖ **Panne permanente** : panne d'un dispositif qui subsiste tant qu'une opération de maintenance corrective n'a pas été effectuée.
- ❖ **Panne latente ou cachée** : panne d'un dispositif qui existe mais qui n'a pas été détectée [28].

IV.3.4 Symptôme (Symptom):

Caractère distinctif d'un état fonctionnel anormal.

IV.3.5 Résidu (Résiduel) :

Souvent, lorsque le modèle comportemental de référence est analytique, les signaux porteurs de signes ou de symptômes sont appelés résidus parce qu'ils résultent d'une comparaison entre un comportement réel et un comportement de référence.

IV.3.6 Diagnostic :

Un diagnostic est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence disponible. Habituellement, le diagnostic est exprimé par les états des composants ou les états des relations de description du comportement [29].

IV.3.7 Perturbation :

Entrée du système physique qui n'est pas une commande. Autrement dit, c'est une entrée non contrôlée. La figure (IV.1) représente les anomalies suivant leur criticité. Il existe également une criticité croissante entre défaillance et panne. De la non conformité (ou anomalie) dans le cas d'une défaillance, on passe à une inaptitude à accomplir une fonction dans le cas d'une panne.

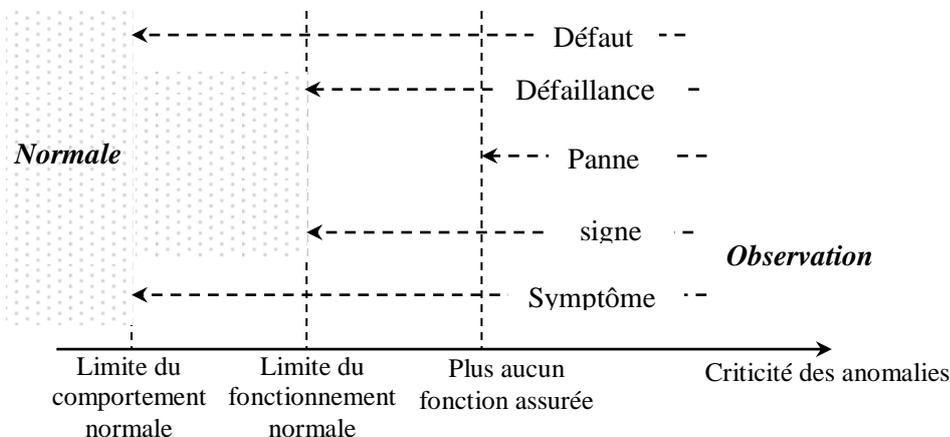


Fig. IV.1 Anomalies et Observations classées par criticité croissante

Ces notions sont illustrées à partir de l'exemple d'un moteur devant assurer une fonction de ventilation

IV.4 Détection et isolation de défauts (Système de surveillance) :

De nombreux dysfonctionnements peuvent altérer la sécurité, la fiabilité et la disponibilité d'un système. C'est pourquoi le but de la surveillance en ligne (détection, localisation et diagnostic des défaillances) est de déterminer, à partir des informations prélevées en temps réel, si le système fonctionne correctement ou présente des anomalies, appelées défaillances, susceptibles de compromettre la réalisation de sa mission.

IV.4.1 Les fonctions de la surveillance:

Un système de surveillance répond généralement à trois fonctions qui sont: [28]

IV.4.1.1 Détection :

Un test de détection (dit aussi test de cohérence ou test de consistance) a pour finalité de vérifier si un ensemble d'informations représentatives de l'état d'un système physique est cohérent avec la connaissance d'un comportement donné qui peut être normal ou anormal résultat de la comparaison produit un écart, appelé résidu. Cet écart sera comparé à des seuils fixés a priori. Si le seuil de la détection est trop petit, il peut y avoir des fausses alarmes. Si le seuil est trop grand, on aboutit à des manques à la détection. Les informations sont associées à des variables ; elles peuvent être des

observations qualitatives ou des mesures. Les connaissances utilisées peuvent être formalisées de nombreuses manières différentes : la nature d'un test de détection dépend fondamentalement du choix de formalisation.

IV.4.1.2 Diagnostic

On distingue classiquement trois étapes :

- **Localisation** : détermine-le sous système fonctionnel à l'origine de l'anomalie et progressivement affine cette détermination pour désigner l'organe ou dispositif élémentaire défectueux.
- **Identification** : détermine les causes qui ont engendré la défaillance constatée.
- **Explication** : justifie les conclusions du diagnostic.

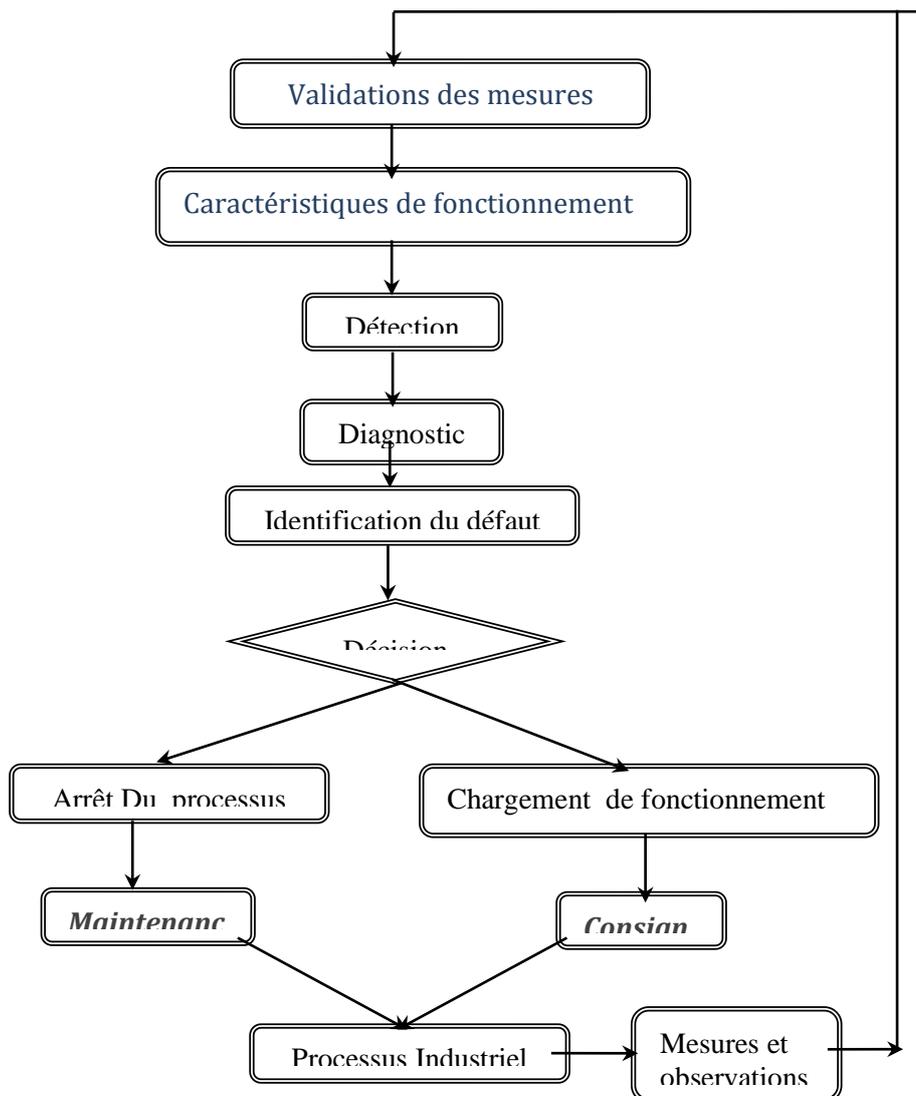


Fig. IV.2 Schéma général de diagnostic d'un processus

IV.4.1.3 La reprise :

Englobe la fonction de recouvrement et de décision, celle ci détermine un état accessible pour le retour au nouveau fonctionnement normal et les différentes actions correctives modifiant la configuration du procédé et de la commande.

IV.5 Types des défauts de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation peut présenter différents types de défauts qui peuvent être classifiés comme suit:

Les défauts du stator qui résultent d'un défaut dans un ou plusieurs enroulements de phase statorique, ou d'un mauvais raccordement des enroulements statoriques.

Les défauts rotoriques circuit ouvert d'une phase, court-circuit des spires des enroulements rotoriques.

Des irrégularités statiques et/ou dynamiques dans l'entrefer. Axe plié (similaire à l'excentricité dynamique) qui peut avoir comme conséquence une bande de frottement entre le rotor et le stator, endommageant sérieusement le stator et ses enroulements.

Les défauts statoriques ou d'armature, les défauts rotoriques, et les défauts liés aux excentricités sont les plus répandus et exigent, ainsi, une attention particulière. Ces défauts produisent un ou plusieurs des symptômes suivants :

1. Un déséquilibre des phases électriques (courants et tensions)
2. Fluctuations accrues de couple ;
3. Diminution du couple moyen ;
4. Augmentations des pertes et réduction d'efficacité ;
5. Echauffement excessif.

Pour détecter de tels défauts, plusieurs méthodes de diagnostic ont été développées impliquant plusieurs domaines scientifiques et technologiques. Elles peuvent être décrites comme suit [1] :

1. Surveillance du champ électromagnétique,
2. Mesures de la température,
3. Rayonnement infrarouge,
4. Surveillance du bruit et de vibration,
5. Analyse chimique,
6. Analyse spectrales,
7. Analyse de la signature du courant (MCSA).
8. Méthodes basées sur le modèle électrique de la machine, intelligence artificielle, et réseau de neurones. [29]

IV.5.1 Défauts du stator et rotor

Ces défauts sont habituellement liés à une dégradation de l'isolement. A un stade avancé, ces défauts pourront provoquer un court-circuit entre spires qui peut s'aggraver et évoluer vers un court-circuit phase-phase ou phase-terre. Ils contribuent à un déséquilibre des courants des trois phases et par conséquent à une dégradation du couple. Il est donc possible de détecter ces défauts en surveillant les composantes inverses et homopolaires du courant statorique [29].

Les spires court-circuitées dans les générateurs de puissance affectent le fonctionnement de la machine, provoquent des niveaux élevés de vibration; donc la détection précoce est importante. De même que le cas de défauts d'enroulements rotoriques, les courts circuits entre spires apparaissent en raison de contraintes mécaniques, électromagnétiques ou thermiques.

Normalement, la résistance des enroulements sur les pôles opposés est identique. La chaleur produite par l'effet Joule est distribuée d'une manière symétrique autour du rotor forgé. Si l'isolation entre les spires est endommagée de telle manière que deux ou plusieurs spires de l'enroulement soient court-circuitées, alors la résistance de l'enroulement endommagé diminue. Lorsque les pôles sont reliés en série, on a une dissymétrie des résistances et donc dissymétrie des températures rayonnées. Cette différence de température produit un gradient thermique dans le corps du rotor provoquant des vibrations. Le déséquilibre des forces magnétiques sur le rotor produit par la variation de la force magnétomotrice (FMM) de l'enroulement contribue à accroître les vibrations [29].

Un défaut d'isolation entre les spires conduit à éliminer une ou plusieurs spires d'un enroulement statorique ou rotorique. Cela peut avoir un effet minime mais il sera quantifié dans la distribution du flux dans l'entrefer [29].

Pour notre étude c'est un autre défaut classé dans la même catégorie est le "single-phasing" ou fonctionnement en monophasé. Dans ce cas, une ligne d'alimentation ou une phase d'enroulement est coupée, c'est ce qu'on appelle circuit-ouvert ou phase ouverte. Dans le cas d'un montage en étoile, la machine sera alimentée seulement à travers deux phases, donc l'équivalent d'un circuit monophasé.

IV.6 La surveillance de la machine asynchrone à double alimentation

IV.6.1 Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence des caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral [29].

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, les vibrations. Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal [29]. Dans notre cas, nous présentons La technique la plus répandue, à savoir l'analyse spectrale.

IV.6.1.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts au rotor des machines asynchrones à double alimentation, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone à double alimentation consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne statoriques), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique) [29].

Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur de courant ou de vibration. Cependant, elle nécessite une analyse manuelle par un expert en surveillance des machines électriques.

IV.6.2 Introduction au diagnostic par analyse spectrale

Historiquement, les méthodes de diagnostic furent développées pour la détection des défauts de capteurs et d'actionneurs par des schémas redondants. Cette approche par redondance matérielle a l'avantage d'isoler l'élément défectueux et d'assurer la continuité de l'exploitation. Ses inconvénients sont les coûts engendrés par la multiplication des éléments [29]. Le développement de l'outil informatique a permis l'émergence de méthodes permettant de s'affranchir en partie de la redondance matérielle. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques [30].

Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se trouvent bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant uniquement un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels.

IV.6.3 Analyse spectral du courant statorique par la FFT

Chaque défaut dans la MADA va donner naissance à une influence remarquable surtout sur le courant statorique par la modulation de son amplitude à la fréquence

K.f.s. Nous avons mis en évidence ce phénomène en visualisant le courant statorique en régime permanent à l'état sain des phases (abc), les Figures suivantes (IV.2), (IV.3) et (IV.4) indiquant le régime permanent du courant statorique des phases à l'état sain (abc).

IV.6.3.1 Résultats de simulation d'un fonctionnement sain

Nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles telles que les courants statorique et rotoriques, la puissance active statorique lorsque la MADA ne présente aucune défaillance.

La figure (IV.3), (IV.4), (IV.5) montre, l'évolution des courants de la MADA statoriques.

La figure (IV.6) montre, l'évolution de puissance active avec zoom statoriques.

La figure (IV.7) montre, l'évolution des courants de la MADA rotoriques.

La figure (IV.8) montre, la valeur efficace des courants rotoriques dans les phases (abc).

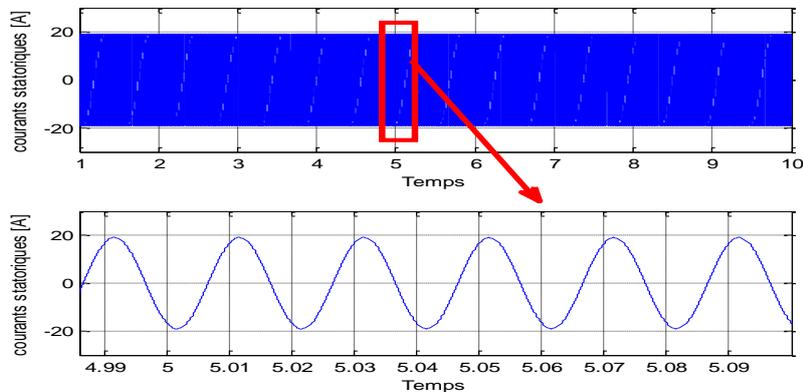


Fig. IV.3 Courant de phase statorique (a)

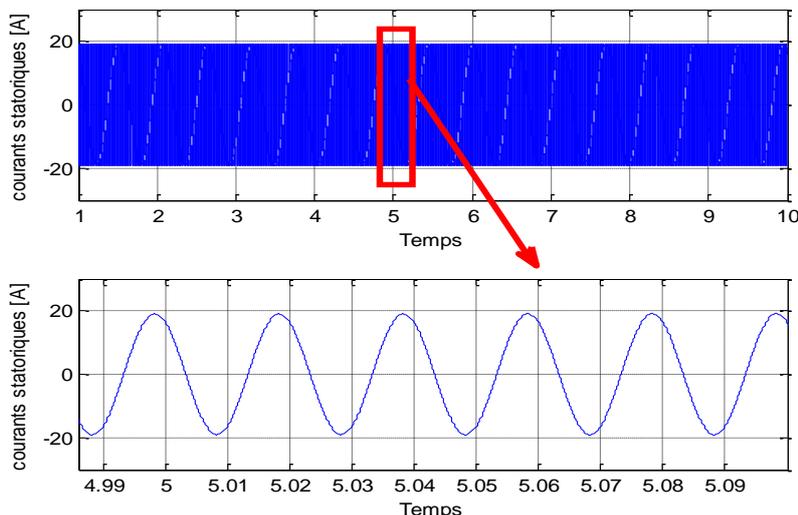


Fig. IV.4 Courant de phase statorique (b)

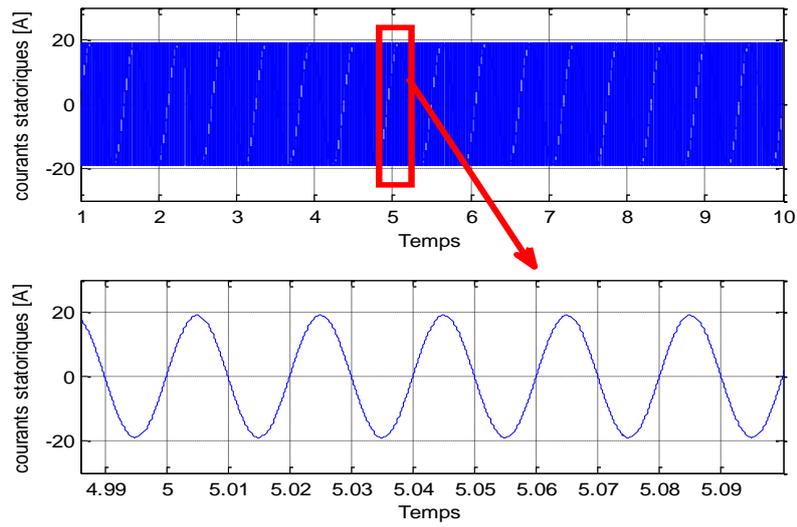


Fig. IV.5 Courant de phase statorique (c)

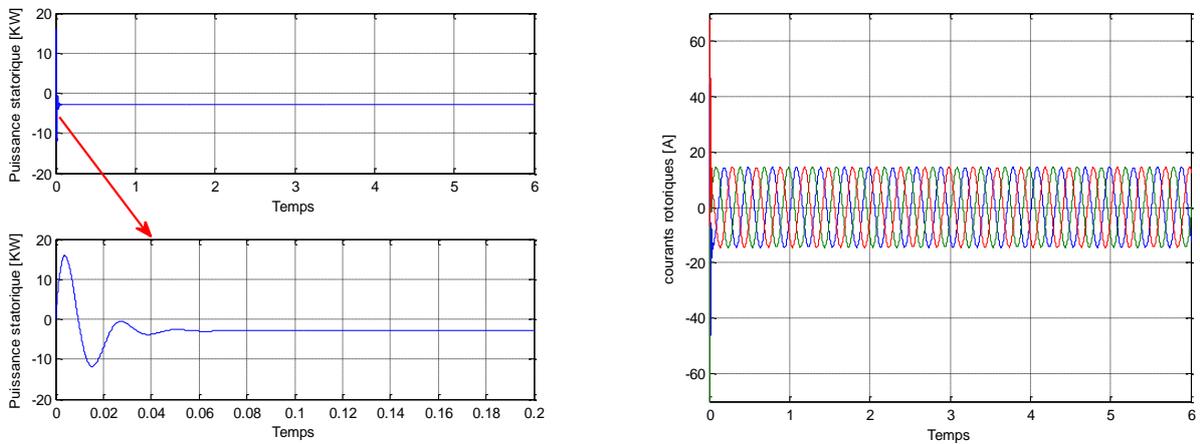


Fig. IV.6 Puissance statorique active

Fig. IV.7 Courants rotoriques (abc)

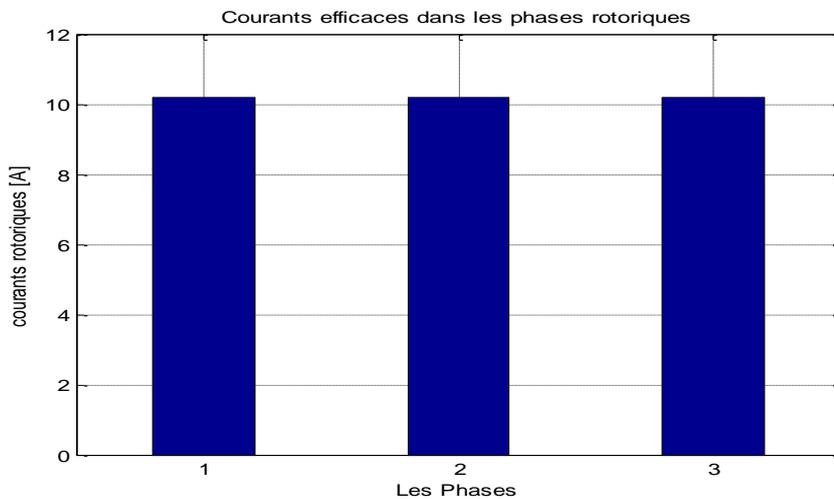


Fig. IV.8 Courants efficaces dans les phases rotoriques à l'état sain.

IV.6.3.2 Résultats de simulation d'un fonctionnement avec défaut

Les méthodes basées sur l'analyse spectrale des signaux offrent une issue pour le diagnostic de ce type de défaut.

❖ Circuit ouvert de la phase (a) rotorique

Dans un souci de simplicité nous avons utilisé la méthode d'augmentation de la résistance rotorique.

A l'instant $t = 4$ [s], nous simulons l'ouverture de la phase (a) du rotor en augmentant sa résistance de **1000 fois** (cette valeur a été choisie de sorte que le courant qui traverse la phase défaillante soit le plus proche possible de zéro).

Le courant dans cette phase diminue fortement et égale à 0 (**Fig. IV.9**), entraînant une diminution d'intensité importante dans les autres deux phases rotoriques (**Fig. IV.10**). Une ondulation de l'amplitude du courant de phase statorique et une augmentation de l'amplitude des oscillations de puissance active qui apparaissent avec l'ouverture de la phase rotorique (**Fig. IV.8** et (**Fig. IV. 11**).

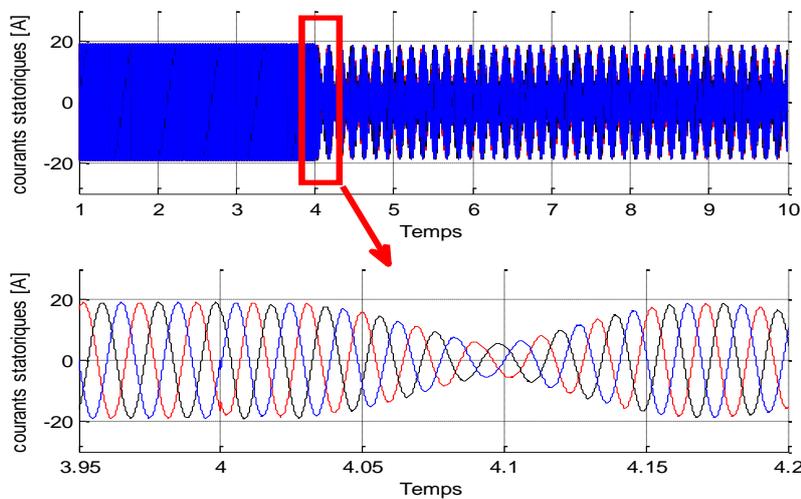


Fig. IV.8 Courants statoriques (abc) avec défaut

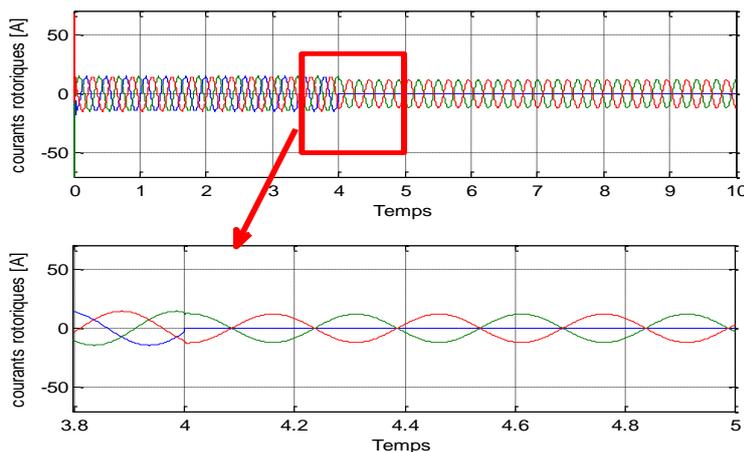


Fig. IV.9 Courants rotorique avec défaut

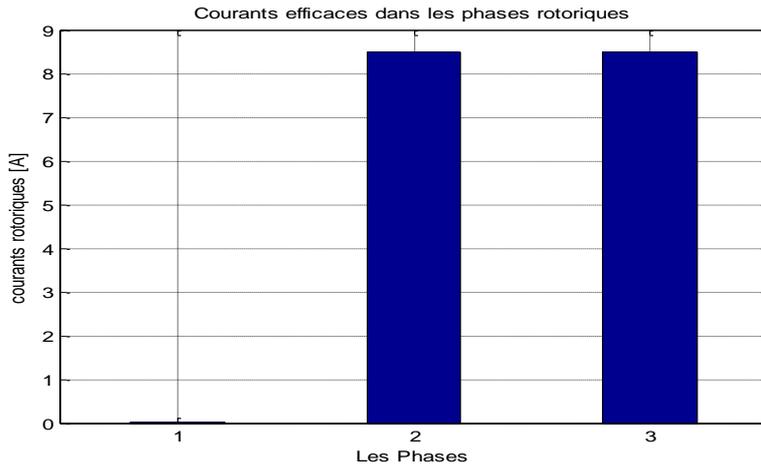


Fig. IV.10 Courants efficaces dans les phases rotorique avec une phase ouverte

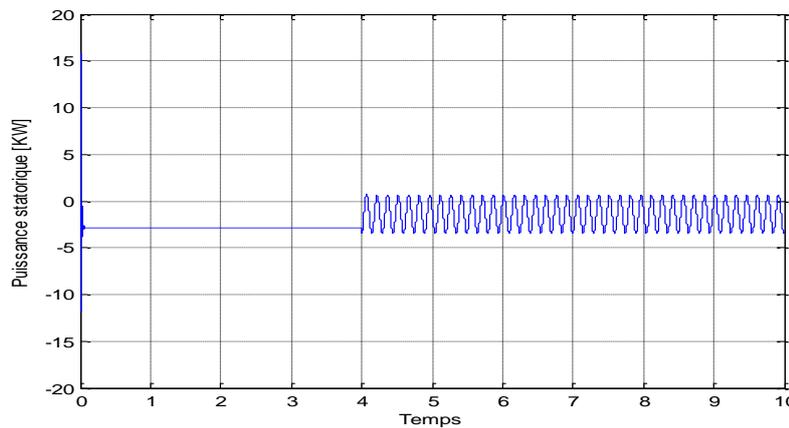


Fig. IV.11 Puissance active statorique phase a ouverte

❖ Circuit ouvert de la phase (b) rotorique

Pour mettre en évidence l'effet de position d'ouverture de la phase rotorique a, b, ou c, nous simulons l'ouverture de la phase b puis c à l'instant $t = 4$ [s].

Nous présentons sur les figures suivantes l'évolution temporelle des grandeurs de la MADA lorsque nous passons d'un fonctionnement sain à un fonctionnement défaillant (ouverture de la phase rotorique (b)).

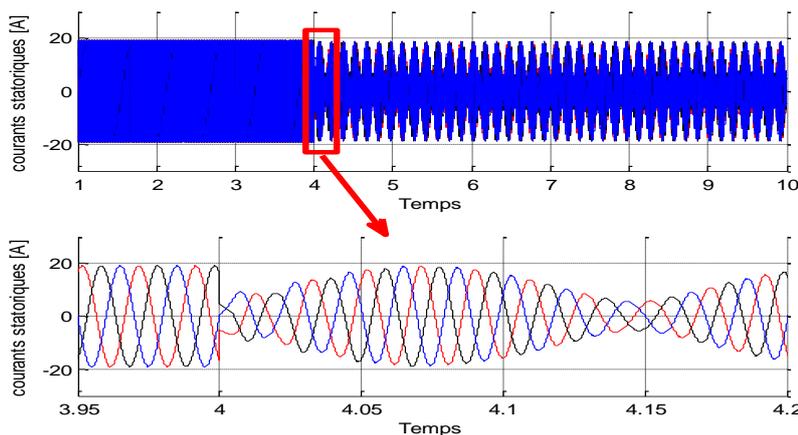


Fig. IV.12 Courants statoriques (abc) avec défaut (b) et avec zoom

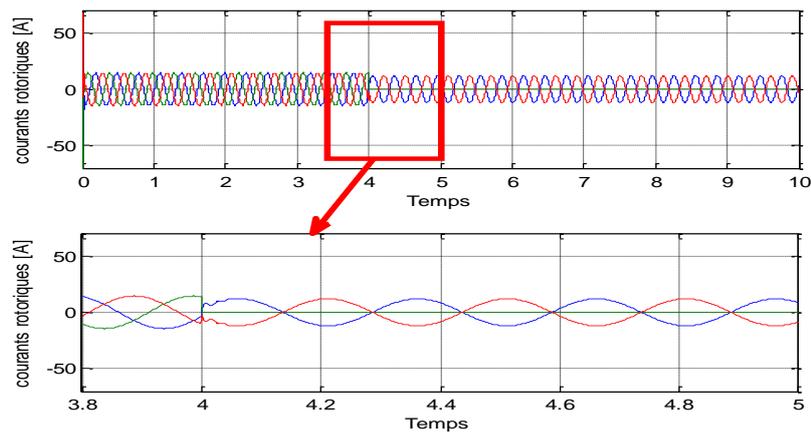


Fig. IV.13 Courants rotoriques avec ouverture de la phase b

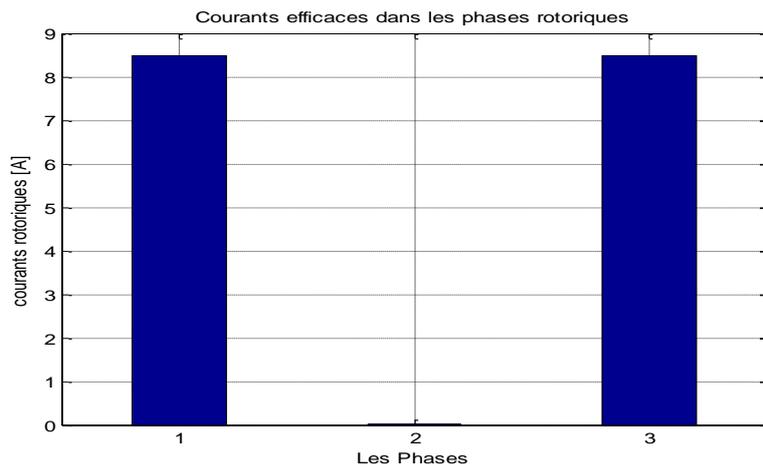


Fig. IV.14 Courants efficaces dans les phases rotorique avec une phase ouverte (b)

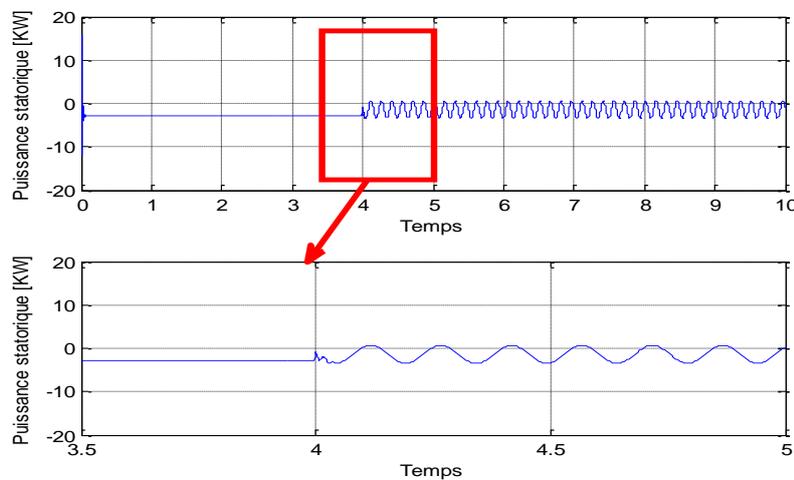


Fig. IV.15 Puissance active statorique avec défaut (b)

❖ Circuit ouvert de la phase (c) rotorique

Nous présentons sur les figures suivantes l'évolution temporelle des grandeurs de la MADA lorsque nous passons d'un fonctionnement sain à un fonctionnement défaillant (ouverture de la phase rotorique (c)).

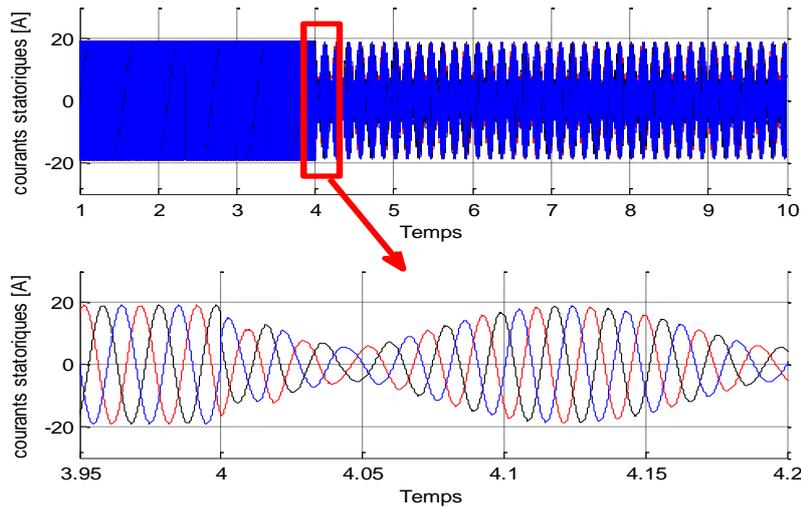


Fig. IV.16 Courants statoriques (abc) avec défaut (c) et avec zoom

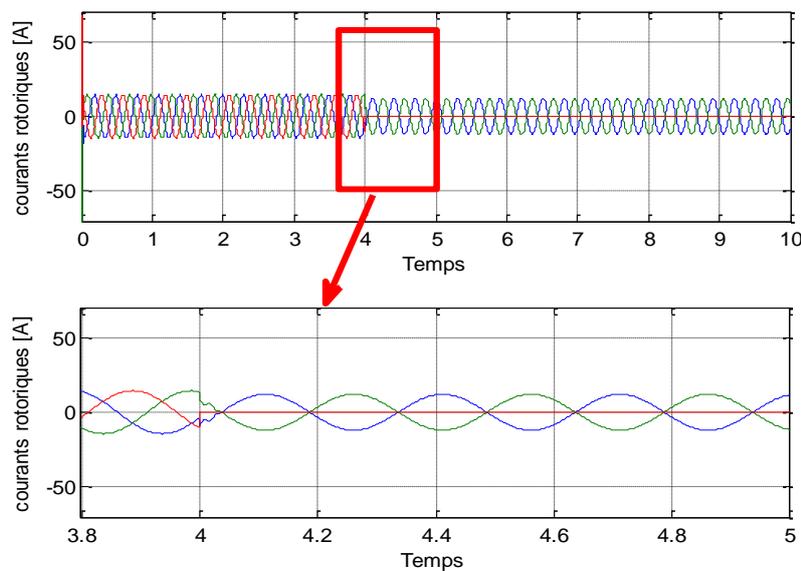


Fig. IV.17 Courants rotoriques avec ouverture de la phase (c)

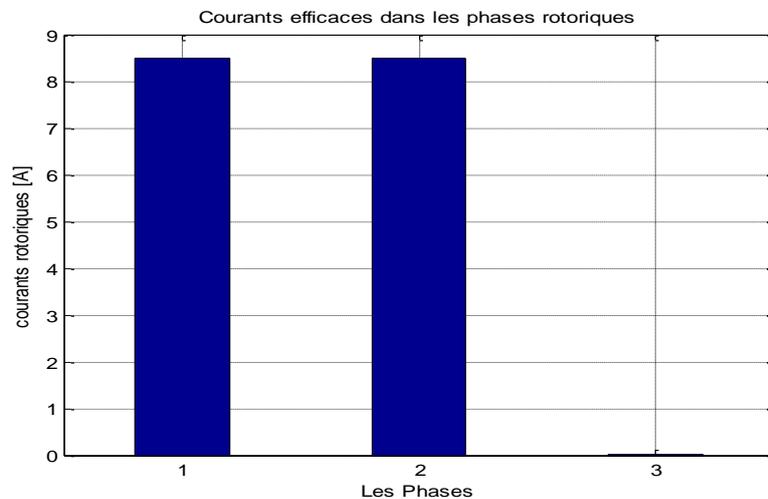


Fig. IV.18 Courants efficaces dans les phases rotorique avec une phase ouverte (c)

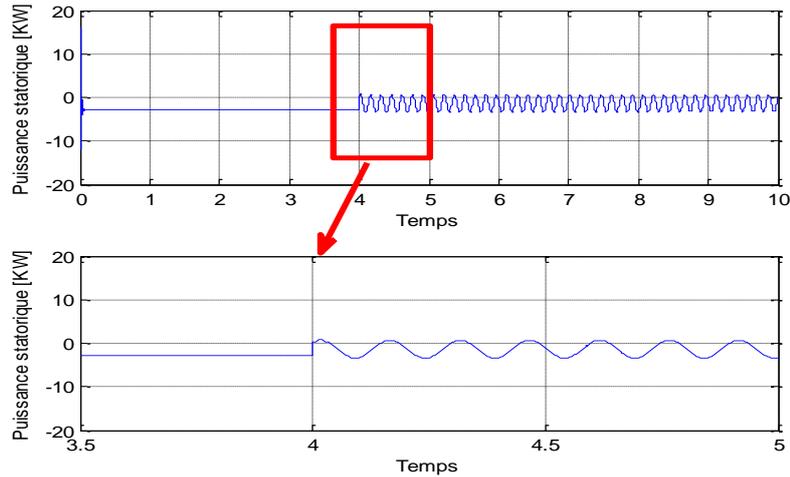


Fig. IV.19 Puissance active statorique avec défaut

L'analyse des figures précédent montre que l'influence du défaut soit l'ouverture (a), (b) ou (c) sur les performances de la précédente est le même soit sur les valeurs efficaces du courant rotoriques ou statoriques ou sur la puissance statorique.

IV.6.4 Résultat avec analyse spectral par FFT

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée, car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone à double alimentation.

L'objectif de cette partie consiste à choisir le meilleur signal pour le traiter entre les signaux de puissance, et du courant statorique.

❖ Etat sain

Les figures (IV.20), (IV.21), (IV.22) et (IV.23) représentent respectivement l'analyse spectrale des signaux du courant statorique phase (A), phase (B), phase (C) et de la puissance active en régime permanent dans l'état sain par la fenêtre de Hamming.

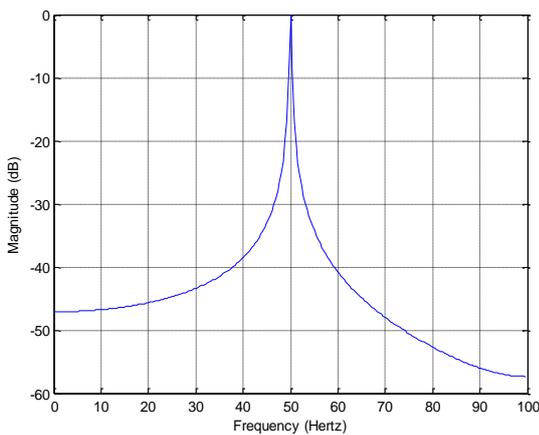


Fig. IV.20 l'analyse spectrale du courant statorique phase (A) sain

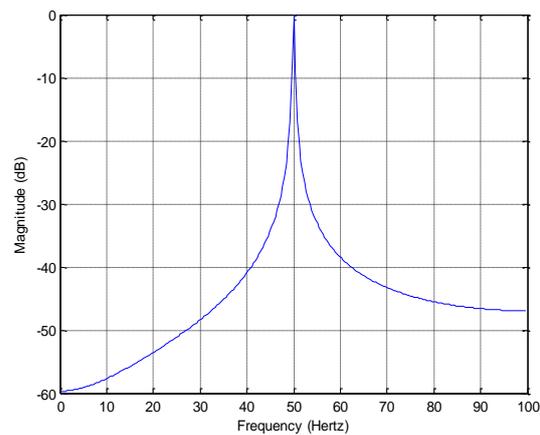


Fig. IV.21 l'analyse spectrale du courant statorique phase (B) sain

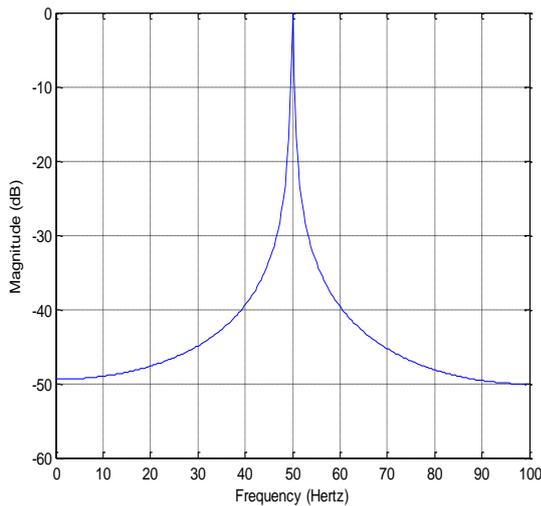


Fig. IV.22 l'analyse spectrale du courant statorique phase (C) sain

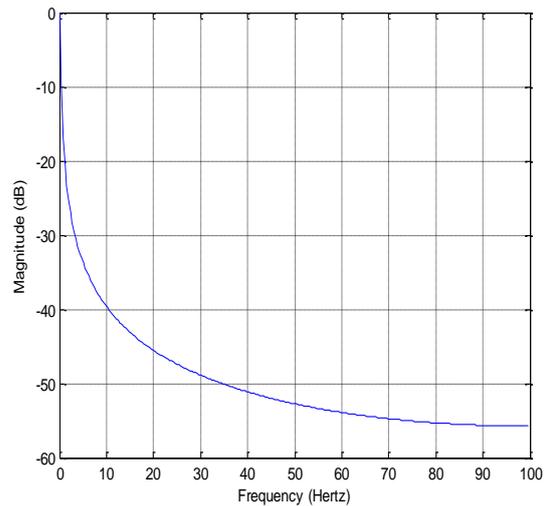


Fig. IV.23 l'analyse spectrale de puissance statorique sain

❖ Etat défaillant

Ouverture d'une phase rotorique

La visualisation des raies dans le courant statorique permet d'expliquer le défaut en évidence et d'obtenir plus d'informations sur le défaut. Nous présentons sur les figures suivantes, les spectres du courant statorique des trois phases à l'ouverture de la phase (a), phase (b) et la phase (c) du rotor et le spectre de la puissance active statorique.

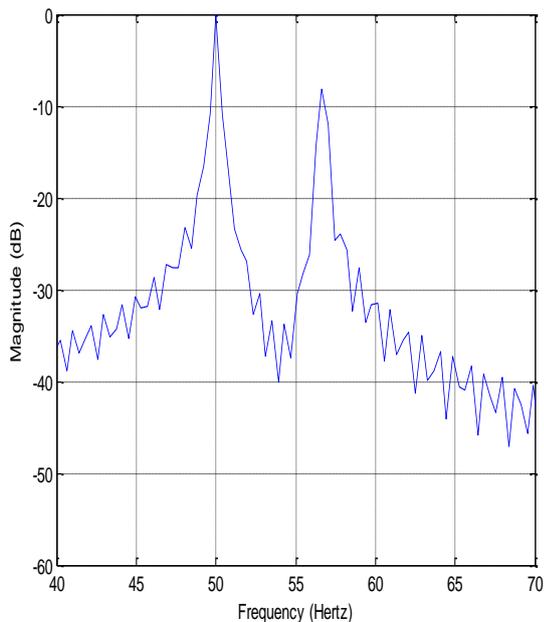


Fig. IV.24 l'analyse spectrale du courant statorique phase (A) défaut (a)

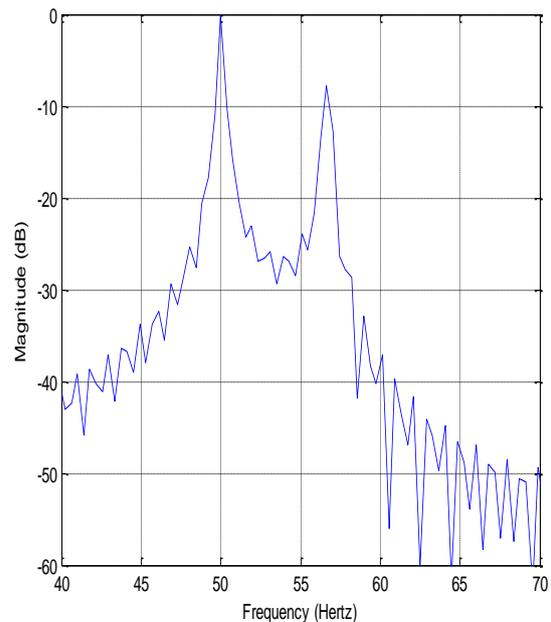


Fig. IV.25 l'analyse spectrale du courant statorique phase (B) défaut (a)

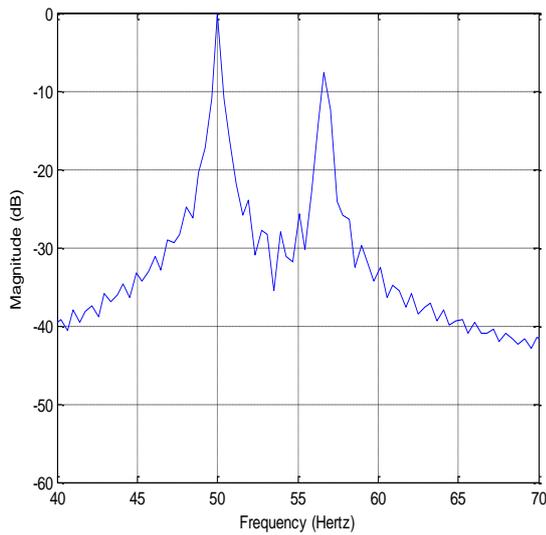


Fig. IV.26 l'analyse spectrale du courant statorique phase (C) défaut (a)

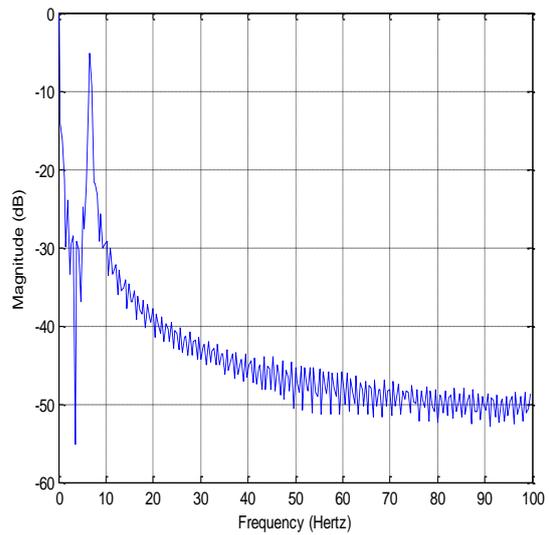


Fig. IV.27 l'analyse spectrale du puissance défaut (a)

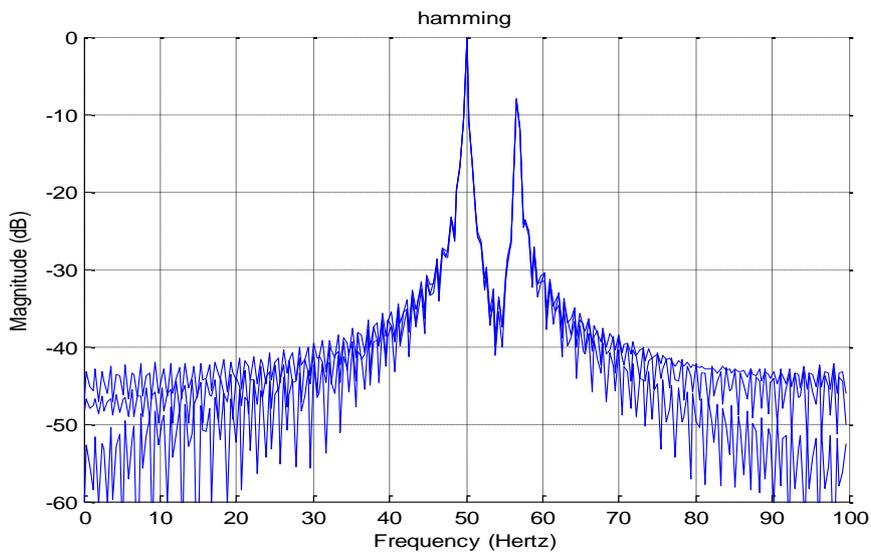


Fig. IV.28 l'analyse spectrale du courant statorique phase (A) (B) (C) défaut (a)

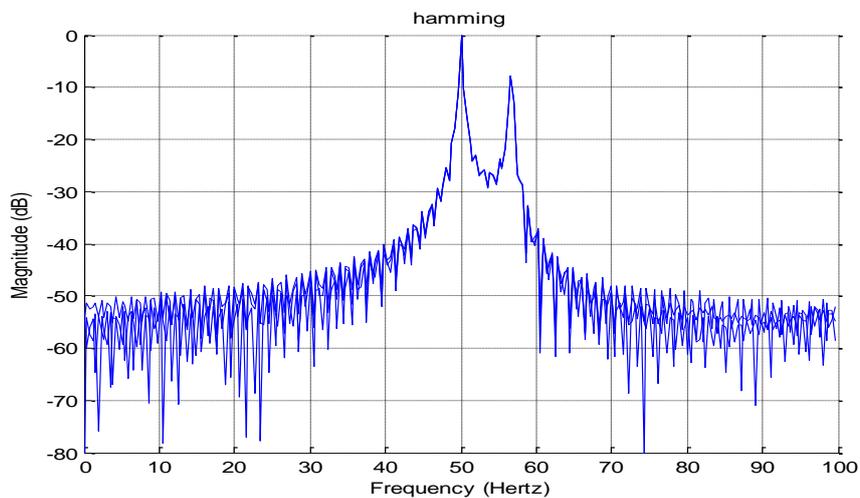


Fig. IV.29 l'analyse spectrale du courant statorique phase (A) (B) (C) défaut (b)

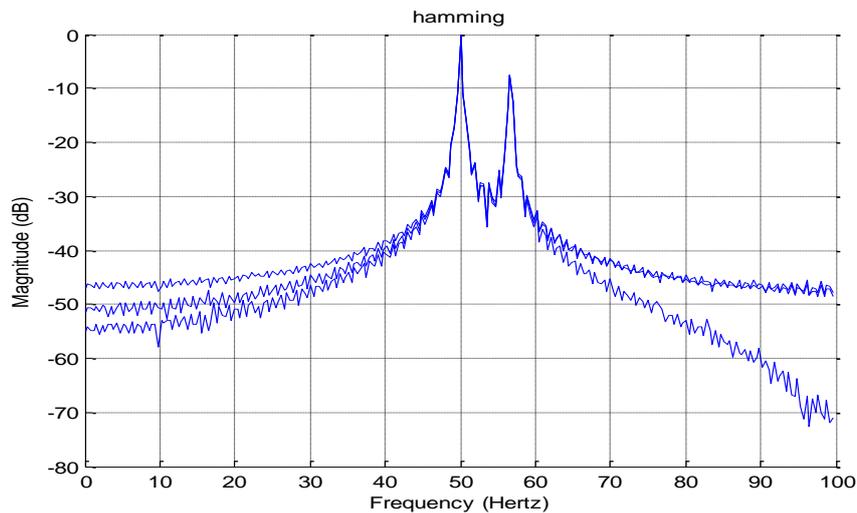


Fig. IV.30 *l'analyse spectrale du courant statorique phase (A) (B) (C) défaut (c)*

Interprétation des résultats

Chaque type de défaut laisse une signature sur le spectre du courant statorique qui se traduit par l'apparition des raies latérales autour de la fréquence fondamentale

On observe une grande augmentation de [-36 dB] jusqu'à [-8dB] sur la raie (56.64)Hz et des petites augmentation sur les raies autour du fondamentale. On remarque aussi, l'apparition des raies autour de fréquences [0 Hz à 100 Hz].

On conclut que l'amplitude de la raie [56.64], est le même pour l'ouverture de la phase (a) (b) ou (c) mais la différence sur les petites raies.

L'observation des figures (IV.28), (IV.29) et (IV.30) montre l'analyse du spectre des phases (A) (B) (C) du stator à l'ouverture des phases (a) (b) (c) du rotor

Donc, ce type de défaut se manifeste de la même façon soit pour l'ouverture (a), (b) ou (c) de la phase rotorique. Ce type de défaut est plus sévère

Conclusion

Nous avons brièvement rappelé quelques termes de diagnostic et de la sûreté de fonctionnement plus particulièrement relatif à la machine asynchrone à double alimentation. Nous avons également présenté une méthode couramment utilisée pour la surveillance de la machine asynchrone à double alimentation, en l'occurrence l'analyse spectrale des signaux électriques.

On a présenté dans ce chapitre les résultats de simulation d'une machine asynchrone à double alimentation pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants

On a trouvé que l'ouverture d'une phase rotorique provoque des oscillations dans la puissance active, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique. L'amplitude de ces oscillations augmente avec l'ouverture de la phase et leurs influences sont traitées.

Pour l'analyse spectrale on utilise la transformée de Fourier rapide (FFT), cette approche nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par l'ouverture des phases rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation.

Il s'est avéré que la surveillance de l'amplitude des composantes de fréquence (56.64 Hz), présente dans le spectre fréquentiel du courant statorique permet de détecter la présence d'un défaut au niveau de la phase rotorique de la machine asynchrone à double alimentation, comme il est prouvé dans les travaux de [6].

.

*“Rêves de grandes choses, cela te permettra
d'en faire au moins de toutes petites.”
... Jules Renard*

C o n c l u s i o n G é n é r a l e

L'évolution croissante des machines asynchrones et surtout à double alimentation dans les secteurs éoliens et industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté traite le diagnostic de défauts statoriques et rotoriques et plus particulièrement des court circuits des enroulements pouvant survenir au sein de la double alimentation des machines asynchrones.

Tout appareil ou systèmes fonctionnant dans un environnement électromagnétique, risque d'être dérangé par les perturbations électromagnétiques. La chaîne formée par l'association onduleur de tension- câble d'alimentation- MADA- turbine est exposée aux problèmes de perturbations. Ces dernières participent à la déformation des spectres de tension et de courant.

Les machines asynchrones à double alimentation nécessitent une détection rapide et précoce de leurs défaillances. Le travail présenté s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts de la MADA.

L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien a pu d'utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre les objectifs suivants :

- Assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne.
- Assurer la protection des différents composants du système éolien face aux éventuelles surcharges.
- Améliorer les performances du système éolien pour faciliter son intégration dans les réseaux électriques.
- Diagnostic des défauts de la MADA.

Afin d'atteindre ces objectifs et vu la complexité du système, nous avons étudié chaque partie du système séparément.

.Le mémoire présenté articule sur quatre chapitres :

Le **premier chapitre** nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types

d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite on a présenté les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Trois grandes familles de machines sont présentées. Les machines asynchrones, les machines synchrones et les machines à structure spéciale.

Il nous a permis également de comprendre le principe de la conversion aérodynamique de l'énergie éolienne ainsi que les différentes possibilités de réglage et de limitation de la puissance. La comparaison des différentes structures possible nous a permis de choisir la structure retenue pour notre étude à savoir la structure à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation

Dans le **deuxième chapitre**, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne. La première, qui représente la partie mécanique contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre. Nous avons ensuite établi les modèles de ces derniers. Et après nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/Simulink ont été présentés et discutés.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnant en génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de le simplifier. Ainsi, la modélisation et les résultats de simulation de la MADA ont été présentés et discutés. Dans la dernière partie, nous avons présenté le modèle de l'onduleur et son principe de fonctionnement, de même que la technique de commande MLI.

Le **troisième chapitre** est réservé au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans la quelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotoriques afin d'envisager un pilotage de la machine par le rotor au moyen d'un onduleur à deux niveaux. Suivant la prise en compte des couplages entre les axes ou non, trois méthodes ont été considérées. La comparaison des résultats de simulation de ces trois méthodes en termes de suivi de consigne et de robustesse a permis de dévoiler la méthode qui sera retenue.

Dans le **quatrième chapitre**, nous avons rappelé et cité quelques termes de la sûreté de fonctionnement et les différents défauts qui peuvent affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ainsi que leurs

origines. Puis, nous avons présenté un état de l'art d'une techniques de surveillance des machines asynchrones à double alimentation c'est l'analyse spectrale.

Ensuite nous avons traité cette technique utilisée récemment, à savoir dans l'ouverture d'une des phases rotoriques (a), (b) ou (c), la transformée de Fourier rapide (FFT) (Fast Fourier Transform) est exploitée pour l'étude et l'analyse spectrale du courant statorique et par conséquent de déterminer les composantes et les raies caractérisant les défauts rotoriques sur le courant statorique. Et nous avons montré l'influence d'ouverture de ces phases sur la machine. Nous avons trouvé que l'amplitude (56.64 Hz) et ses harmoniques augmentent après l'ouverture d'une phase. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut, comme nous avons déjà cité.

Le présent travail est loin d'être achevé.

En **perspectives**, plusieurs points peuvent être traités entre autres :

- Validation des résultats obtenus par des essais pratique.
- Diagnostic d'une même machine mais avec le modèle multi-spires (statoriques, rotoriques).
- Diagnostic d'une MADA avec un ou plusieurs défauts dus à la turbine et leurs influences sur la machine.

ANNEXE A

A.1. Théorie de betz

La théorie globale du générateur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz [21]. Betz suppose que le générateur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V et à l'infini en aval d'une vitesse v . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse v est nécessairement inférieure à V . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

Soit donc V la vitesse de l'air en amont, v celle en aval et V' celle au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne (comme présenté à la Figure A.1) et m la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation d'énergie cinétique de l'air ΔE est :

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V^2 - v^2) \quad (\text{A.1})$$

La puissance de l'éolienne P est alors :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V^2 - v^2) \quad (\text{A.2})$$

Avec : la densité de l'air

S la surface balayée par les pales de la turbine.

Par ailleurs, la force de l'air F sur l'éolienne est :

$$F = \rho \cdot S \cdot V' \cdot (V - v) \quad (\text{A.3})$$

D'où :

$$P = F \cdot V' = \rho \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V - v) \quad (\text{A.4})$$

En identifiant les équations A.2 et A.4, il vient :

$$V' = \frac{V+v}{2} \quad (\text{A.5})$$

Et donc :

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V^2 - v^2) \cdot (V + v) \quad (\text{A.6})$$

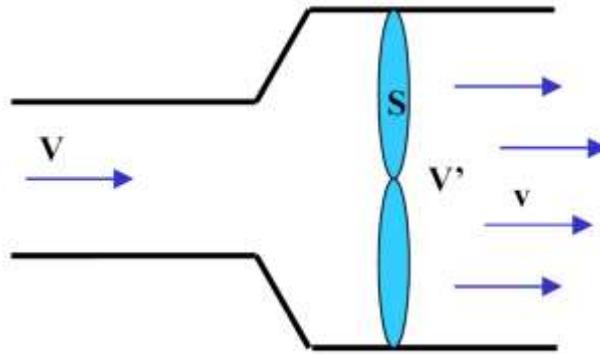


Figure A.1 théorie de Betz : schéma de principe.

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{dP}{dv}$ sera nulle, soit pour $v = \frac{V}{3}$.

La puissance est alors maximale et vaut :

$$P = P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{A.7})$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V = \frac{v}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont. On écrira en notant la vitesse du vent amont.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_v^3 \cdot C_p \quad (\text{A.8})$$

Où :

C_p : est le coefficient de puissance de l'éolienne, il dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

R : Est le rayon de la turbine.

ANNEXE B

B.1. Synthèse du régulateur PI

La stratégie de commande de DFIG utilise un régulateur proportionnel intégral *PI*. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance.

Le régulateur PI résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions [24]:

- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.
- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir.

Sa fonction de transfert est:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{B.1})$$

➤ Boucle des puissances

Le régulateur proportionnel intégral (PI), utiles pour commander le DFIM en génératrice est simple et rapide à mettre en œuvre tous en offrant des performances acceptables [11].c'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

La Figure B.1 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la Figure III.5.

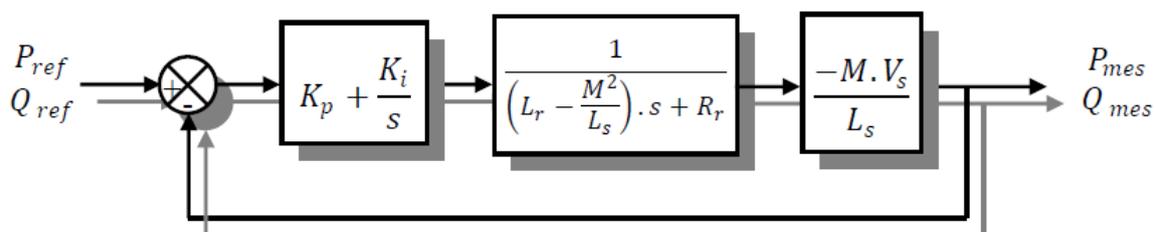


Figure B.1 Système régulé par un PI.

La fonction transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M.V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s + \frac{L_s.M}{L_s.(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (\text{B.2})$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert.

Cette méthode de synthèse sera utilisée pour la détermination des gains des différents régulateurs utilisés dans la commande de DFIG. Rappelons que la symétrie du système compensé nous permet de calculer un seul régulateur pour les deux axes pour les puissances et pour les courants.

Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s.R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (\text{B.3})$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{M.V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s} \quad (\text{B.4})$$

Ce qui nous donne boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{Avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M.V_s} \quad (\text{B.6})$$

Avec τ_r : le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de (10 ms), correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne ou les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'impose une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{M \cdot V_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \cdot R_r}{M \cdot V_s} \quad (\text{B.7})$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité ; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

Cette même méthode de synthèse de correcteurs sera appliquée pour déterminer les gains des correcteurs des autres types de commandes étudiées.

➤ *Boucle des courants*

Si on considère l'hypothèse d'un couplage entre l'axe direct et l'axe en quadrature négligeable pour la commande directe, et parfaitement compensé pour les commandes indirectes en boucle ouverte et en boucle fermée, ainsi que tous les termes de perturbation compensés on obtient le système corrigé de la figure ci-dessous.

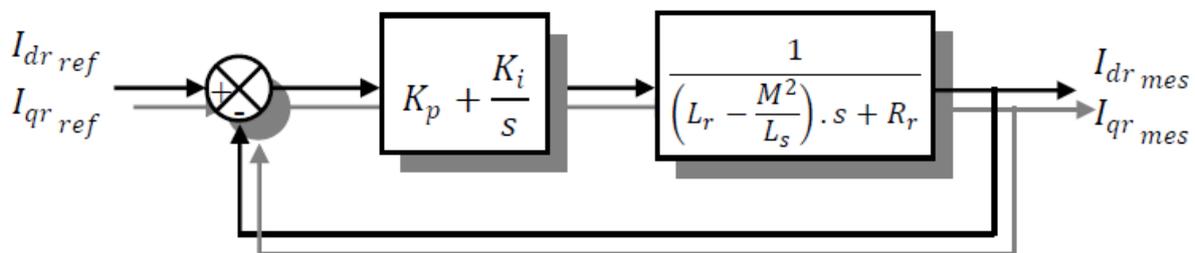


Figure B.2 Schéma de la régulation des courants rotorique.

B.2. Paramètres des régulateurs

En effectuant le calcul des gains des régulateurs suivant la méthode détaillée au début de cette annexe, on trouve les valeurs numériques, affinées pour obtenir les meilleures performances, suivantes :

Tableau B.1 : Gains des régulateurs utilisés

Méthode	Commande directe	Commande indirecte BO	Commande indirecte BF	
Grandeurs	Puissances	Courants	Courants	Puissances
K_p	4.3478 e - 005	0.0292	0.0658	0.5
K_i	4.4612 e - 004	0.3	0.375	75

ANNEXE C

C.1 Paramètre De La Turbine Eolienne [15]

Les paramètres de la turbine considérée dans notre étude sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau C.1 : Paramètre de la turbine éolienne

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale P_n	300 kW
Longueur d'une pale R	14 m
Inertie J	50 kg.m ²
Frottement visqueux f	7.10 ⁻³
Gain du multiplicateur de vitesse G	28
Coefficient de puissance maximal C_{pmax}	0.5483
Vitesse relative optimale λ_{opt}	6.396
Vitesse du vent nominale v_n	12 m/s
Vitesse du vent de démarrage v_{min}	3 m/s
Vitesse du vent de l'arrêt v_{max}	25 m/s

C.2 PARAMETRES DE DFIG [30]

La machine utilisée est une machine asynchrone à rotor bobiné d'une puissance de 300kW dont les paramètres sont donnés sur le tableau suivant :

Tableau C.2 : Paramètres de DFIG

Paramètre	Valeur numérique	
Puissance nominale P_N	4 kW	4 kW
Tension nominale V_N	220/380 V	400/690 V
Résistance statorique R_s	1.2	0.0063
Résistance rotorique R_r	1.8	0.0048
Inductance statorique L_s	0.1554	0.0118
Résistance rotorique L_r	0.1568	0.0116
Inductance magnétisante M	0.15	0.0115
Nombre de paires de pôles p	2	2

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dale E. Berg « Wind Energy Conversion». Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy 2007 by Taylor & Francis Group, LLC
- [2] S. EL AIMANI. « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.
- [3] WWEA « Rapport Mondial sur l'Énergie Eolienne 2009 », Fév. 2009, Allemagne.
- [4] SEMMAR Mohamed « L'énergie éolienne pour prévenir l'avenir sous un climat sain et propre » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Déc. 2008, p.8-9-10
- [5] F. PITIERS « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003
- [6] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [7] L. Abdelhamid « Contribution à l'étude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens » Thèse de magister, Université de Batna, 2008.
- [8] L. HAMANE « les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11.
- [9] N. Kasbadji Marzouk « Quel avenir pour l' Énergie Eolienne en Algérie ? , » Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7
- [10] E. HAU. « Wind turbines ». 2nd Ed Springer 2006.
- [12] N. LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.
- [11] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [13] N.MEKKAOUI « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèses de Magister, UNIV DE BATNA 2004.
- [14] A. BOYETTE. « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production d'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Nancy I 2006.
- [15] F. MERRAHI « Alimentation et Commande d'une machine Asynchrone à double alimentation application à l' énergie éolienne » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2007.
- [16] www.nordex-online.com
- [17] F. PITIERS « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [18] C. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne- Etude et Expérimentation → Thèse de doctorat, Université d'Oran Mohamed BOUDIAF, 2007.
- [19] L. KHETTACHE « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimenter » Thèse de Magister université de Batna,

2007.

- [20] **A.PETERSSON** «Analysis, Modeling and control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines » ISBN 91 -7291- 600-1Chalmers bibliotheca, Reproservice G'oteborg, Sweden 2005.
- [21] **ADEME** Département Energies Renouvelables « Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens » ADEME Editions, 2001, ISBN 2-86817-583-X
- [23] **Z. TIR** « Contribution à l'étude d'un aérogénérateur asynchrone en cascade» Thèse De Magister, ENP, Ferhat abbas, Sétif, 2010.
- [22] **Mukund R. Patel** «Wind and Solar Power Systems» Second Edition 2006 by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group.
- [24] **Thomas Ackermann** « Wind Power in Power Systems » John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chic ester, West Sussex PO19 8SQ, England
- [25] **F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ.** « Wind turbine control systems, principles, Modeling and Gain Scheduling Design ». Springer 2007.
- [26] **S. METATLA** ; « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » ; mémoire de magister, ENP, el Harrach 2009.
- [27] **Tahar ACHOUR Tahar ACHOUR** « Diagnostic de d'défauts 'électriques et m'mécaniques de la machine asynchrone `a simple cage d'ecureuil :Étude expérimentale Projet de fin d'études
- [28] **S. BACHIR** « Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique » Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Poitiers 2002
- [29] **Ali IBRAHIM** « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques » Thèse doctorat préparée au Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES, INGÉNIERIE, SANTÉ 2009
- [30] **S. Djurovic, S. Williamson** « Condition Monitoring Artifacts for Detecting Winding Faults in Wind Turbine DFIGs » IET Electric Power Applications May 2009 – impress, available online.