



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

« CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL OUED »
Institut Des Sciences Et Technologies Département D'électrotechnique

Mémoire De Fin D'étude

*Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État
En Électrotechnique*

Option : Réseaux Electriques

THÈME

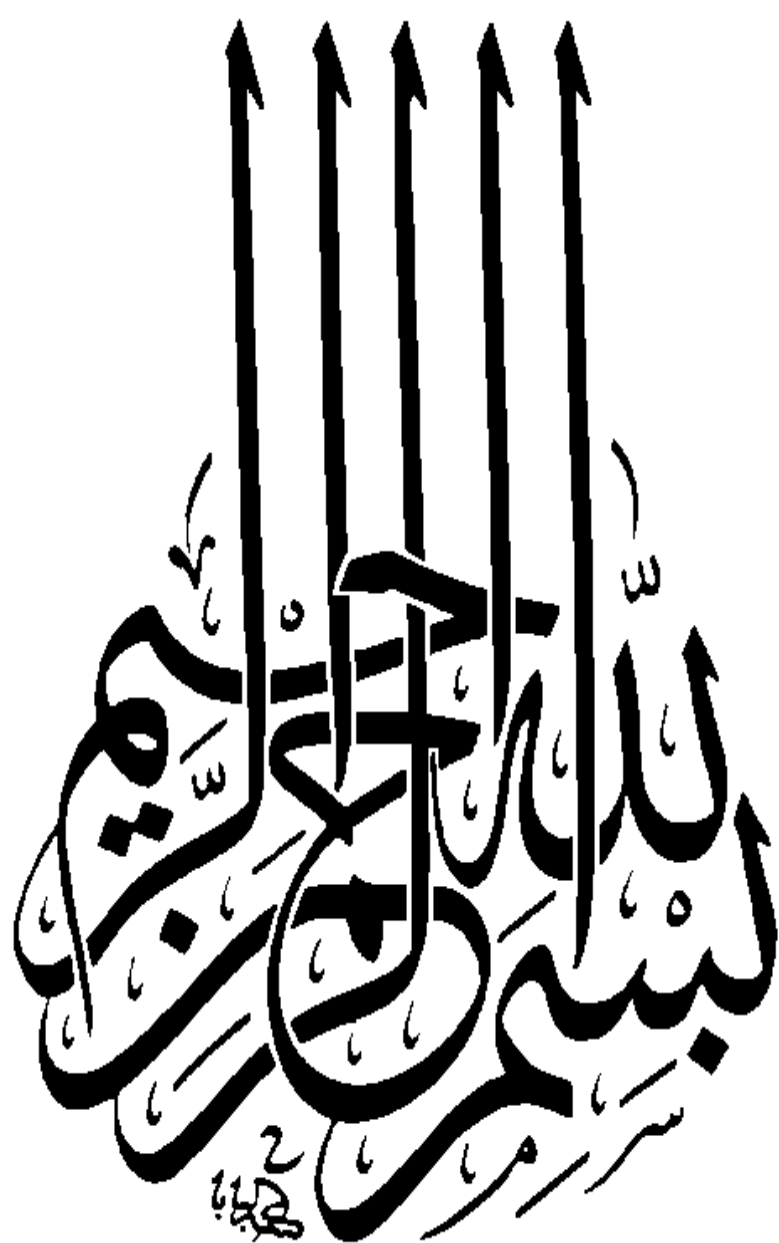
*Modélisation d'une Centrale
Éolienne*

Encadré par :

Dr. BENATTOUS Djilani

Présenté par :

**CHERIFE Hakima
SLIMANI Karimen
LAICHE Sara**



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَنُصْرَافِ الرَّبِّ وَالسَّحَابِ

الْمُسْكِرِينَ بَيْنَ السَّمَاءِ وَالْأَرْضِ

لَا بَاتَ لِقَوْمٍ بِعُقُلُونِ

حَقَّقَ اللَّهُ الْعَظِيمِ

Remerciements

*Avant tous, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous donne le courage
Et la patience pour réaliser ce travail, malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Prière et

*Salutation pour le plus honorable messager le maître de la création notre
prophète*

"Mohamed".

Nous commençons par notre promoteur

Monsieur Dr. BENATTOUS DJILANI

*Qui nous a donné l'occasion de travailler sur le sujet passionnant, et pour sa
confiance, tous ses conseils et critiques sur le plan scientifique qui nous permet
de bien orienter nos recherches.*

*Des remerciements vont également à tous ceux et celles qui nous ont apporté, de
près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la
concrétisation de ce travail, plus particulièrement*

B.ZEGUEB, Z.TIR, Y.LABBI, Y.BKEKR, ZALLOUMA, R.LABDANI et K.BAGOUZA .

*Enfin une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants du Faculté
des Sciences de l'Ingénieur d'EL-OUED, pour leurs efforts et leur
collaboration lors de notre cursus*

Particulièrement:

Dr. B.SAADALLAH, A.CHEMSSA, M.MOHAMMEDI, SARHOUD,

A.DJOKHRAB, R.ROUIHA, T.GUIA, Y.GAHRAR, M.HETTIRI, Dr. H.GUEDDA,

A.KHACHKHOUCHE, K.GEDIRI

Dr. T. LANEZ, Mr. N. ZAMAR, Mr. N.JDIDE.

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mon grand-père et ma grand-mère que dieu les garde.

A ma grand-mère que Dieu tout puissant l'accueille dans son vaste paradis

A mes frères et mes sœurs.

A ma famille.

A mes collègues : Sara, Karimen, Asma, Ibtissame, Hania, Madiha, Laila, Samia

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Cherif Hakima



Dédicace

*À mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la
patience,
le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans
eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui*

Mon père : SLIMANI Med Tayeb

Ma mère: DJERMOUN Fatiha

À mes très chers frères Abdel Karim, Abdel Hafid et Abdel Basset

À mes très chères sœurs Amani, Manar, Amira et Sahar

*À ma grand mère, mes oncles, mes tantes, leurs conjoints ainsi que leurs
enfants,*

À tous les membres de ma grande famille

*À tout les enseignants et les profs qui m'ont appris durant toutes mes
années d'étude et*

tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

À tous mes collègues de la promotion 2010 plus spécialement : "Sara,

Hakima, Ibtissem, Asma, Hania, Madiha, Semia et Laila"

À mes amies: Nesrine, Oihiba, Nasira, Abir, Zineb, Hadjer, Dauia,

Soumaïa, Nassima.....

À la mémoire de notre défunt collègue Hamdi Zin Abedine

Je dédie cet humble travail

Slamani Karimen



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A la mémoire de mon père défunt que j'adore

LAICHE SAID

que Dieu tout puissant l'accueille dans son vaste paradis.....

A ma mère avec toute mon affection.

A mes frères, sœurs, oncles, tantes, leurs conjoints ainsi que leurs enfants,

A tous les membres de ma grande famille.

A tout mes profs qu'ils m'ont appris durant toutes mes années d'étude.

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un
jour un ingénieur d'état en électrotechnique.*

*Et bien sûr à mes collègues : Hakima, Karimen, Asma, Ibtissame, Hania,
Madiha, Laila, Samia, qui m'ont accompagné pendant les cinq ans*

*A tous mes amis, surtout Dhaoia, Souade, Halima, Nojoud, Afaf,
Fatima, Nassima, Nesrine, ...*

A tous les habitants de TAGHZOUT.

Et enfin à tous ceux que j'aime et qui m'aiment (chaque un à son nom).

Laiche Sara


Sommaire

Introduction générale.....	1
I. Chapitre I :	
Généralités sur les systèmes éoliennes.	
I.1. Introduction	6
I.2. Vent	6
I.3. Définition de l'énergie éolienne	7
I.4. Principe	7
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	8
I.5.1. Avantages	9
I.5.2. Inconvénients	10
I.6. Différents types des turbines éoliennes	10
I.6.1. Turbines éoliennes à axe vertical	11
I.6.1.1. Type de Savonius	11
I.6.1.2. Type de Darrieus.....	11
I.6.2. Turbines éoliennes à axe horizontal	12
I.6.2.1. Éoliennes lentes	12
I.6.2.2. Éoliennes rapides	13
I.7. Architecture d'une éolienne à axe horizontal	14
- Principaux composants d'une éolienne	14
I.8. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	16
I.8.1. Loi de Betz	16
I.8.2. Production d'énergie mécanique	18
I.9. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	19
I.9.1. Système à décrochage aérodynamique "stall"	19
I.9.2. Système d'orientation des pales « <i>Pitch</i> »	19
I.10. Etat de l'art sur la conversion électromécanique	20
I.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone	20
I.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil	20
I.10.1.2. Machine asynchrone à double stator	22
I.10.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	22
I.10.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"	23
I.10.1.5. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"	24
I.10.1.5.1. MADA à énergie rotorique dissipée	24
I.10.1.5.2. MADA – structure de Kramer	25
I.10.1.5.3. MADA – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	25
I.10.1.5.4. MADA – structure de Scherbius convertisseurs MLI	26
I.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone	27
I.10.2.1. Machines synchrones à rotor bobiné	27

I.10.2.2.	Machines synchrones à aimants permanents	27
I.11.	Outil de travail "Simulation"	28
I.12.	Conclusion	29

II. Chapitre II :

Modélisation d'une turbine éolienne

II.1.	Introduction	31
II.2.	Modélisation du vent	31
II.3.	Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal	32
II.3.1.	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	32
II.3.2.	Modélisation de la turbine	34
II.3.3.	Modèle du multiplicateur	36
II.3.4.	Equation dynamique de l'arbre	37
II.4.	Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK	38
II.5.	Stratégie de commande de la turbine	39
II.6.	Maximisation de la puissance extraite	40
II.6.1.	Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	40
II.7.	Résultats de Simulation et interprétations.....	43
II.8.	Conclusion	46

III.chapitre III :

Modélisation et Simulation de La MADA.

III.1.	Introduction	48
III.2.	Construction d'un Machine Asynchrone à Double Alimentation	48
III.3.	Principe de fonctionnement	49
III.4.	Fonctionnement à vitesse variable	51
III.4.1.	Fonctionnement Moteur	51
III.4.2.	Fonctionnement génératrice	51
III.5.	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	52
III.5.1.	Hypothèses simplificatrice	52
III.5.2.	Représentation de la MADA dans repère triphasé (<i>abc</i>)	53
III.5.3.	Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)	54
III.5.4.	Choix du référentiel	55
III.5.4.1.	Référentiel lié au stator	55
III.5.4.2.	Référentiel lié au rotor	55
III.5.4.3.	Référentiel lié au champ tournant	55
III.5.5.	Représentation de la MADA dans repère biphasé (<i>dq</i>)	56
III.5.6.	Equations électriques sous forme matricielle	57
III.5.7.	Expression de la puissance active et réactive	58
III.5.8.	Expression du couple électromagnétique	58
III.6.	Résultats de la Simulation	59

III.7.	Conclusion	63
 IV. Chapitre IV :		
Commande des puissance active et réactive de la MADA		
IV.1.	Introduction.....	65
IV.2.	Commande vectorielle de la MADA.....	65
IV.3.	Schéma Bloc Simplifie De La MADA.....	68
IV.4.	Types de commande	69
IV.4.1.	Commande directe.....	69
IV.4.1.1.	Synthèse des régulateurs.....	69
IV.4.2.	Commande indirecte.....	71
IV.4.2.1.	Commande indirecte en boucle ouverte.....	71
IV.4.2.2.	Commande indirecte en boucle fermée.....	72
IV.5.	Convertisseur MLI	72
IV.5.1.	Onduleur a deux niveaux	73
IV.5.2.	Stratégie de commande MLI.....	74
IV.5.3.	Algorithme de commande.....	75
IV.6.	Schéma de simulation	76
IV.7.	Résultats de la simulation.....	77
IV.8.	Interprétation des résultats	87
IV.9.	Conclusion.....	88
 V. Chapitre V :		
Intégration de l'aérogénérateur.		
V.1.	Introduction	90
V.2.	Système de la chaîne globale	90
V.3.	Schéma de Simulation	92
V.4.	Résultats de Simulation et Interprétation.....	93
V.5.	Conclusion	97
 Conclusion générale.....		98
 BIBLIOGRAPHIE		101
 Annexe		104

Tableau des Figures

Figure. I.1	: La naissance du vent.	7
Figure. I.2	: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	8
Figure. I.3	: Eolienne type Savonius.	11
Figure. I.4	: Eolienne type Darrieus.	12
Figure. I.5	: Eolienne de pompage - Mauritanie 'Éolienne lentes'.	13
Figure. I.6	: Éolienne à axe horizontal 'rapide'.	13
Figure. I.7	: Principaux composant d'une éolienne.	14
Figure. I.8	: Nacelle.	15
Figure. I.9	: Tube de courant autour d'une éolienne.	16
Figure. I.10	: Coefficient de puissance.	17
Figure. I.11	: Coefficient de puissance pour déférent type éolienne.	17
Figure. I.12	: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné. ...	18
Figure. I.13	: Flux d'air sur un profil de pale "stall"	19
Figure. I.14	: Variation de l'angle de calage d'une pale	20
Figure. I.15	: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple	20
Figure. I.16	: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.	21
Figure. I.17	: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.	21
Figure. I.18	: Machine asynchrone à double stator.	22
Figure. I.19	: Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur.	23
Figure. I.20	: Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"	23
Figure. I.21	: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.	23
Figure. I.22	: Machine asynchrone à rotor bobiné	24
Figure. I.23	: Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	25
Figure. I.24	: Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer	25
Figure. I.25	: Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	26
Figure. I.26	: Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	27
Figure. II.1	: Schéma de la turbine éolienne..	31
Figure. II.2	: Système mécanique de l'éolienne.	33
Figure. II.3	: Modèle mécanique simplifié de la turbine.	34
Figure. II.4	: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ	36
Figure. II.5	: Modèle d'une turbine éolienne.	37

Figure. II.6 :	Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne	37
Figure. II.7 :	Modèle en bloc de la turbine.	38
Figure. II.8 :	Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.	39
Figure. II.9 :	Stratégies de commande de la turbine	40
Figure. II.10 :	a. Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.	41
	b. Modèle de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse en MATLAB/SIMULINK.	41
Figure. II.11 :	Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK.	42
Figure. II.12 :	Modèle éclaté de la turbine éolienne.	43
Figure. II.13 :	Profil du vent et la vitesse du rotor.	44
Figure. II.14 :	Coefficient de puissance avec un zoom.	44
Figure. II.15 :	Vitesse mécanique.	45
Figure. II.16 :	Couple et Puissance électrique produite.	45
Figure.III.1 :	Stator et le rotor circuit électrique d'une machine à induction.	48
Figure.III.2 :	Machine à induction à rotor bobiné.	50
Figure.III.3 :	Différents modes de fonctionnement de la MADA.	51
Figure.III.4 :	Passage du triphasé au biphasé et l'inverse	54
Figure.III.5 :	Schéma bloque de la modèle de MADA.	59
Figure.III.6 :	Courbe du courant statorique avec zoom.	60
Figure.III.7 :	Courbe du courant rotorique avec zoom	60
Figure.III.8 :	Courbe de la tension statorique avec zoom.	61
Figure.III.9 :	Courbe de la tension rotorique avec zoom	61
Figure.III.10 :	Courbe de la puissance active statorique avec zoom.	62
Figure.III.11 :	Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom.	62
Figure.III.12 :	Courbe de la couple avec zoom.	63
Figure. IV.1 :	Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA.	65
Figure. IV.2 :	Orientation de la tension et de flux statorique	66
Figure. IV.3 :	Schéma bloc de la MADA sous les contraintes du flux et de la tension orientés.	68
Figure. IV.4 :	Schéma de principe de la commande directe.	69
Figure. IV.5 :	Schéma bloc d'un système régulé par un PI.	70
Figure. IV.6 :	Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte	71
Figure. IV.7 :	Schéma de la commande indirecte en boucle fermé.	72
Figure. IV.8 :	Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur ML.	73
Figure. IV.9 :	Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.	73
Figure.IV.10 :	Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse.	75
Figure.IV.11 :	Tensions rotorique à travers l'onduleur (La tensions ondulée)	76
Figure.IV.12 :	Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA avec onduleur.	76
Figure.IV.13 :	Flux d'orientation rotorique direct et quadrature (d,q) (Sans Onduleur)	78

Figure.IV.14 :	Puissance active et réactive avec référence (Sans Onduleur).	79
Figure.IV.15 :	Courbes de courant statorique et rotorique biphasée (Sans Onduleur)	80
Figure.IV.16 :	Courbes de courant statorique et rotorique triphasée (Sans Onduleur)	81
Figure.IV.17 :	Courants rotorique direct et quadrature (d,q) suivi les référence avec le zoom (Sans Onduleur).	82
Figure.IV.18 :	Puissance active et réactive avec référence (Avec Onduleur)	83
Figure.IV.19 :	Courbes de courant statorique et rotorique biphasée (Avec Onduleur)	84
Figure.IV.20 :	Courbes de courant statorique et rotorique triphasée (Avec Onduleur)	85
Figure.IV.21 :	Courants rotorique direct & quadrature (d,q)suivi les référence avec le zoom (Avec Onduleur)	86
Figure. V.1 :	a. L'aérogénérateur.	90
	b. Structure de la chaîne globale.	91
Figure. V.2 :	Modèle de la chaine éolienne avec la Command en MATLAB/SIMULINK.	92
Figure .V.3 :	Profil du vent appliqué	93
Figure. V.4 :	Coefficient de puissance de la turbine.	94
Figure. V.5 :	Vitesse de rotor (rd/s)	94
Figure. V.6 :	Puissance active statorique et sa référence	95
Figure. V.7 :	Erreur sur le suivie de la consigne de la puissance statorique	95
Figure. V.8 :	Puissance réactive généré par <i>MADA</i>	96
Figure. V.9 :	Courant statorique avec Zoom	96
Figure. V.10 :	Courant rotorique avec Zoom.	97

Notations

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
P	Densité de l'air à 15°C
m	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω_s	La 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	Rapport de multiplication
$J_{turbine}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g(kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J(kg.m^2)$	Moment d'inertie totale
$J_{pale}(kg.m^2)$	Moment d'inertie de pale
$J_h(kg.m^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
Kb	Elasticité de pale
Kh	Elasticité de l'arbre

Dh	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur
Dg	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
f	Coefficient de frottement visqueux
Db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E[J]$	L'énergie cinétique
$E_v[J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer}[N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}[N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}[N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em}[N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em_ref}[N.m]$	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé}[N.m]$	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_{coord}	Angle coordonnée
$E_r [V]$	f e m au rotor
$E_s [V]$	f e m au stator
ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)
ω_s	Pulsation électrique statorique
ω_r	Pulsation électrique rotorique
ω_m	La pulsation mécanique de la machine
N_r	Le nombre de spires de bobinage rotorique
N_s	Le nombre de spires de bobinage statorique
$S_s[VA]$	La puissance apparente au stator
$S_r[VA]$	La puissance apparente au rotor
$P_s[W]$	La puissance active au stator
$P_r[W]$	La puissance active au rotor

$Q_s[VAR]$	La puissance réactive au stator
$Q_r[VAR]$	La 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
$V [V]$	Tension
$I [A]$	Courant
$\varphi [Wb]$	Flux
$M [H]$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)
$l_s [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du stator
$l_r [H]$	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
$M_s[H]$	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
$M_r[H]$	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

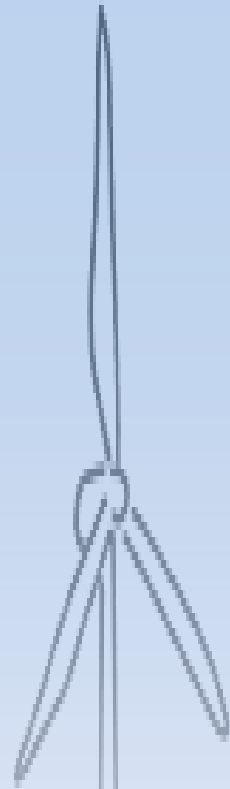
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d,q
s	Opérateur dérivé de Laplace
p	Nombre de paire de pole de la MADA
P_m	Puissance mécanique
f_r	Fréquence de rotor
f_s	Fréquence de stator
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI
τ_r	Temps de réponse du système

Sigles utilisés

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
FTBO	Fonction de Transfer en Boucle Ouvert
FTBF	Fonction de Transfer en Boucle Fermée
PI	Proportionnel - Intégrale

Introduction

générale



Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours.

Pour subir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il ya principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales en améliorant respectivement leur productivité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion nucléaire des noyaux atomiques, qui éventuellement, pourraient êtres une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des prometteuses avec un taux de croissance mondial très élevé. Pourtant oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude sur les différentes parties de centrale éolienne c'est à dire l'étude de la chaîne de conversion éolienne et a travers les différents types des turbines et les machines utilisées dans un système éolien. Pour donner un bon rendement au réseau électrique, on a choisi la turbine axe horizontale rapide et la machine asynchrone à double alimentation **MADA** en anglais «*doubly fed induction*

machine DFIM », cette machine peut être fonctionnée à vitesse variable, donc possibilité de fournir de l'énergie quelque soit la vitesse de vent. Ce travail est structuré en cinq chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la conversion éolienne. Dans cette partie, nous présentons une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure pour en terminer par choisir la structure qui sera étudiée.

Dans le deuxième chapitre seront abordées ; par la modélisation de la turbine. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour ensuite valider son modèle et présente les résultats par la simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK, L'élaboration d'une commande adéquate pour le captage maximum de puissance disponible.

Dans Le troisième chapitre, on présentera construction de la MADA, son principe de fonctionnement, ses variantes de fonctionnement. Ainsi l'étude de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation permettra de simuler son modèle pour le mode générateur.

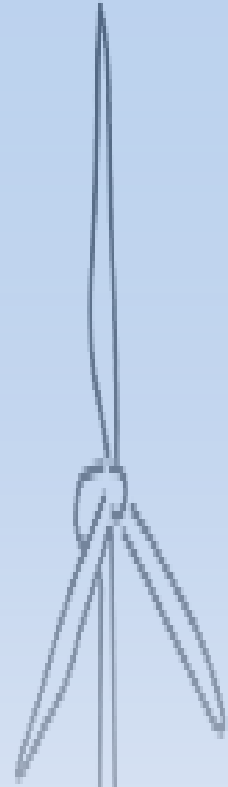
Le quatrième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe. Le stator de la MADA est alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé à MLI, commandé par la stratégie triangulo-

sinusoïdale. L'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés

Dans le cinquième chapitre, qui représentera la partie principale de cette étude, on envisage de traité (étude et simulation) toute la chaîne de conversion éolienne : turbine, la génératrice, et l'onduleur qui leur sont associés. Ainsi, les résultats de simulation seront présentés et interprétés.

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

Généralités
sur
les systèmes
éoliens



Chapitre I

I.1. Introduction

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est maintenant largement utilisée [BEN_08].

Depuis l'antiquité, des moulins à vent convertissent le vent en énergie mécanique pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre le métal ou les fibres et pomper de l'eau. Ils seront introduits en Europe par l'Espagne, grâce aux Maures. Il faudra attendre Zénobe Gramme et sa dynamo en 1869 pour que le moulin puisse donner naissance à l'éolienne.

En 1888, Charles F. Brush est le premier à avoir construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs. La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Les recherches les plus intenses actuellement sur l'utilisation du vent portent sur les éoliennes afin d'augmenter leur rendement en prise sur le vent, résistance aux fluctuations, rendement en production électrique et la meilleure détermination des corridors de vent.

Ce chapitre est une description générale sur l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateur (éoliennes à axe vertical, et éoliennes à axe horizontal) et en cite les générateurs les plus utilisées.

Avant d'entrer dans les détails de notre mémoire, nous allons parler brièvement de la principale source de l'énergie éolienne.

I.2. Vent

Le vent naît sous l'effet des différences de températures et de pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil (Figure. I.1.A). Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (Figure. I.1.B). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé (Figure. I.1.C), ce qui crée un déplacement des particules de l'air (Figure. I.1.D) et c'est en capturant leur énergie cinétique que les éoliennes se mettent à fonctionner.

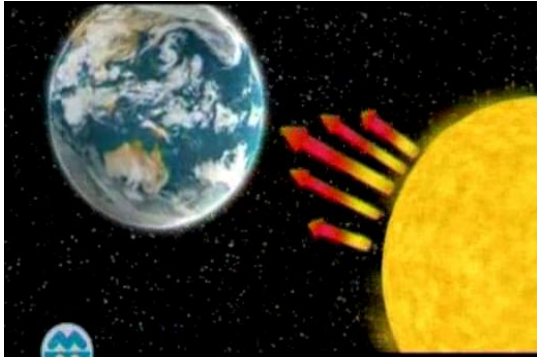


Figure. I.1. A

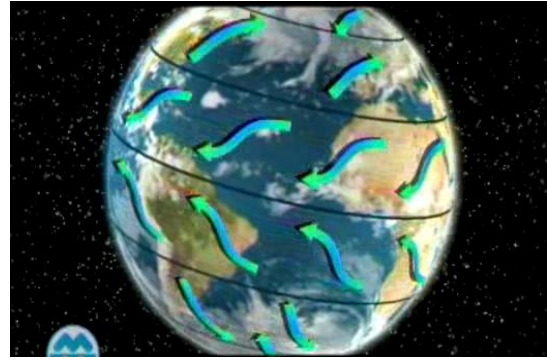


Figure. I.1. B

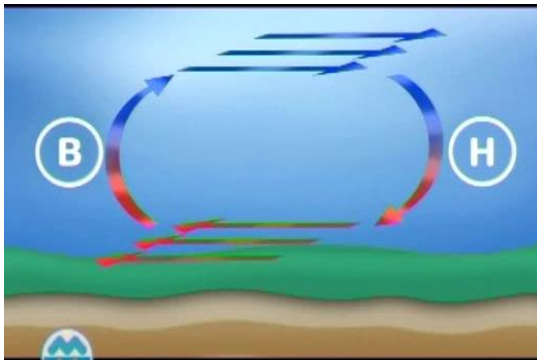


Figure. I.1. C



Figure. I.1. D

Figure. I.1 La naissance du vent

I.3. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [POI_03] (Figure. I.2).

I.4. Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ✓ Au niveau de la **turbine** (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- ✓ Au niveau de la **génératrice**, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [LAV_05].

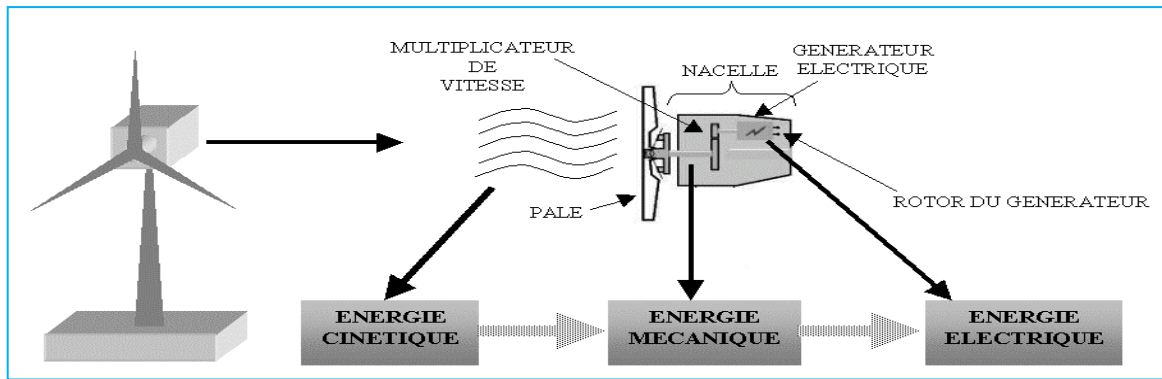


Figure. I.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [POI_03].

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale :

1. Éoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
2. Éoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
3. Éoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW [POI_03].

I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'utilisation de l'énergie éolienne est fortement liée aux avantages de cette énergie. Afin de palier toute frein à son développement nous devrions étudier les éventuels inconvénients.

I.5.1. Avantages

– L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- La concentration du CO₂ est augmentée de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais ils ont par exemple annoncé qu'il provoquera une augmentation de niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

– L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂ :

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

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque comme l'énergie nucléaire et ne produit aucun déchets radioactifs ;

- Les éoliennes en fonctionnement sont facile a arrêté, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et nucléaires ;

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales ;

- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent en énergie dans ces pays pour se développer.

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà ;

- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

I.5.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif ;
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines ;
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée ;
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés ;
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire [MER_07].

I.6. Différents types des turbines éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice:

- les turbines à axe horizontal
- les turbines à axe vertical [ABD_07].

I.6.1. Turbines éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [POI_03] (**Le type Savonius, Le type Darrieus**).

I.6.1.1. Type Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925)

Il est constitué de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques qui sont décalés l'un par rapport à l'autre. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, est peu bruyant.

Il démarre à de faibles vitesses de vent voisines de 2 à 3 m/s et présente un couple élevé quoique variant de façon au cours de la rotation.



Figure. I.3 Turbine éolienne type Savonius

I.6.1.2. Type Darrieus

Inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique (figure. I.4).

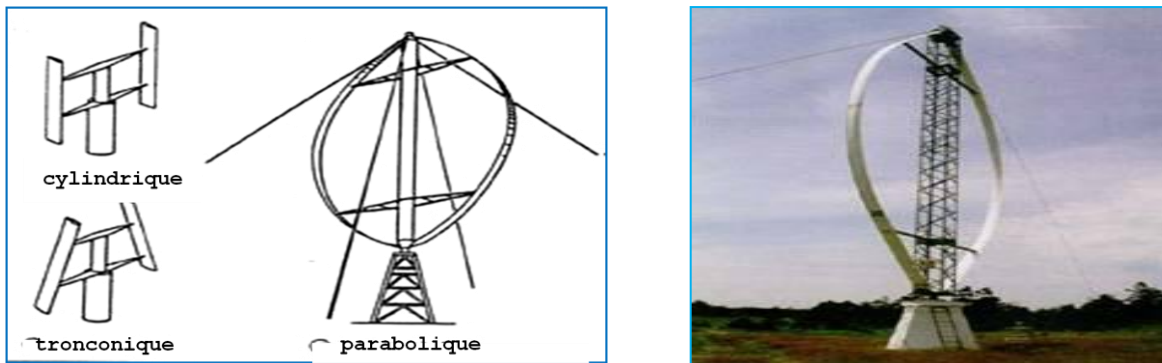


Figure. I.4 Turbine éolienne type Darrieus

Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celui des haubans [KHE_07].

I.6.2. Turbines éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation [POI_03].

I.6.2.1. Turbines éoliennes à axe horizontal lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [SOU_07].



Figure. I.5 Turbine éolienne de pompage - Mauritanie 'lente'

I.6.2.2. Turbines éoliennes à axe horizontal rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [SOU_07].



Figure. I.6 Turbine éolienne à axe horizontal 'rapide'

Notre étude se focalise sur les éoliennes rapides ou nous essayerons de donner une description du modèle global.

I.7. Architecture d'une éolienne à axe horizontal

❖ Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties: les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

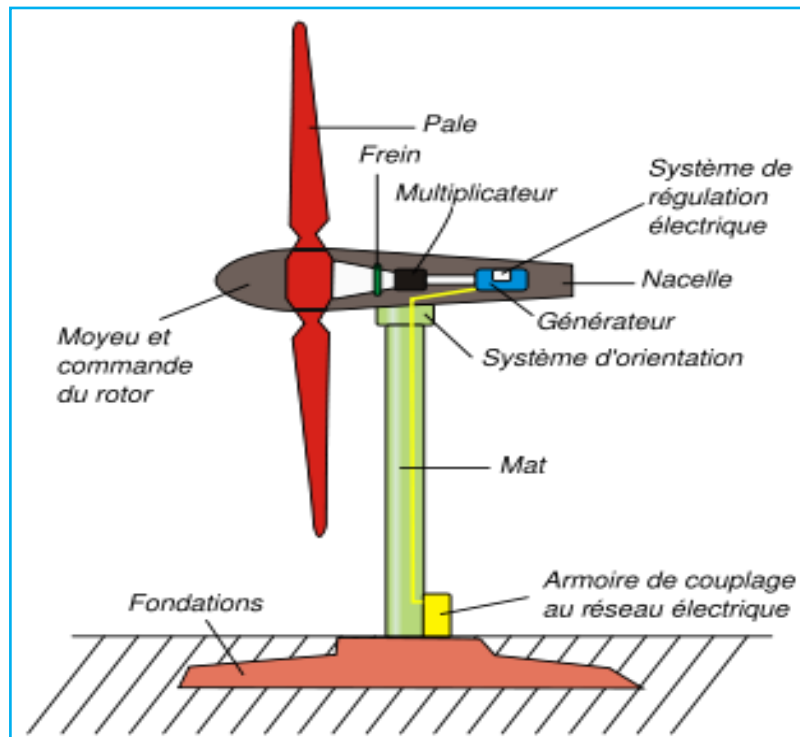


Figure. I.7 Principaux composants d'une éolienne.

- **La tour** (mât) est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m).
- **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les

systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

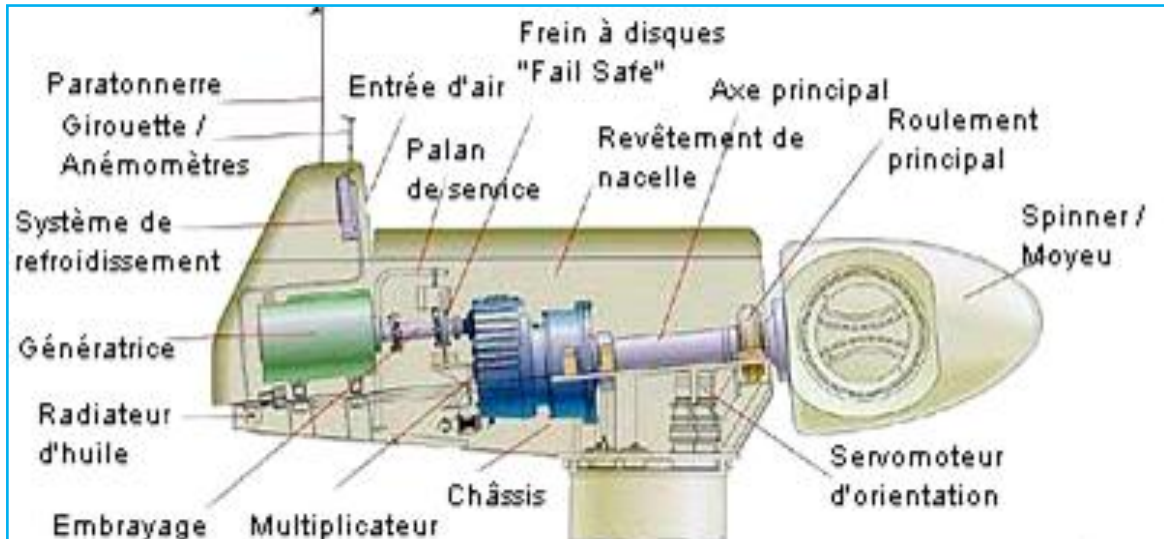


Figure. I.8 Nacelle

- **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (Actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [POI_03].

I.8. Énergie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

- **Loi de Betz**

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 1.8 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

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

$$P_{aér} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (I.1):

$$P_{aér} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$

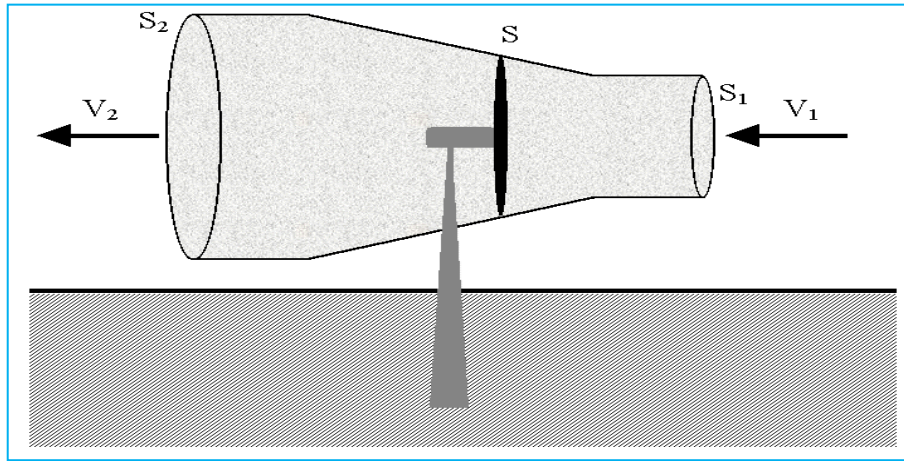


Figure. I.9 Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

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

$$\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (I.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure.1.10), on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{a\grave{e}r}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [POI_03].

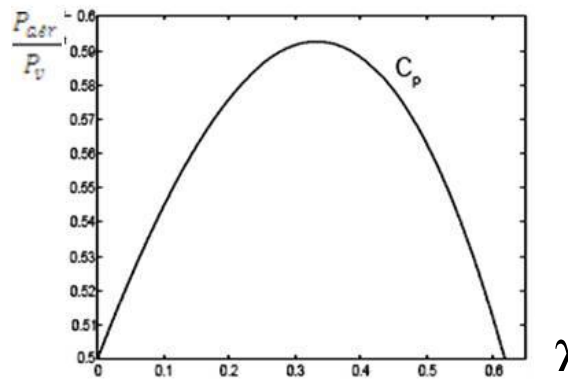


Figure. I.10 Coefficient de puissance

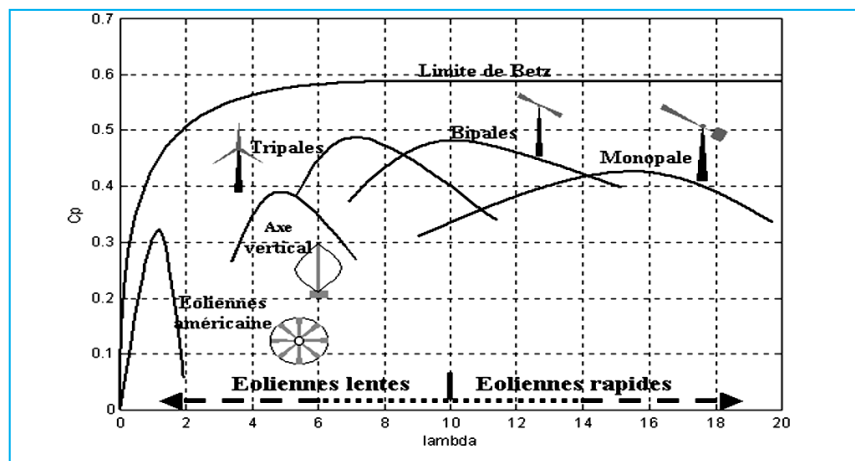


Figure. I.11 Coefficient de puissance pour différents types éoliennes

❖ Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.1), (I.4) et (I.5), la puissance mécanique $P_{a\grave{e}r}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{a\grave{e}r} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (I.6)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (\text{I.7})$$

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R: rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K, la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{aér} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_2}{K \cdot V_1} \right) \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{I.8})$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure. I.12).

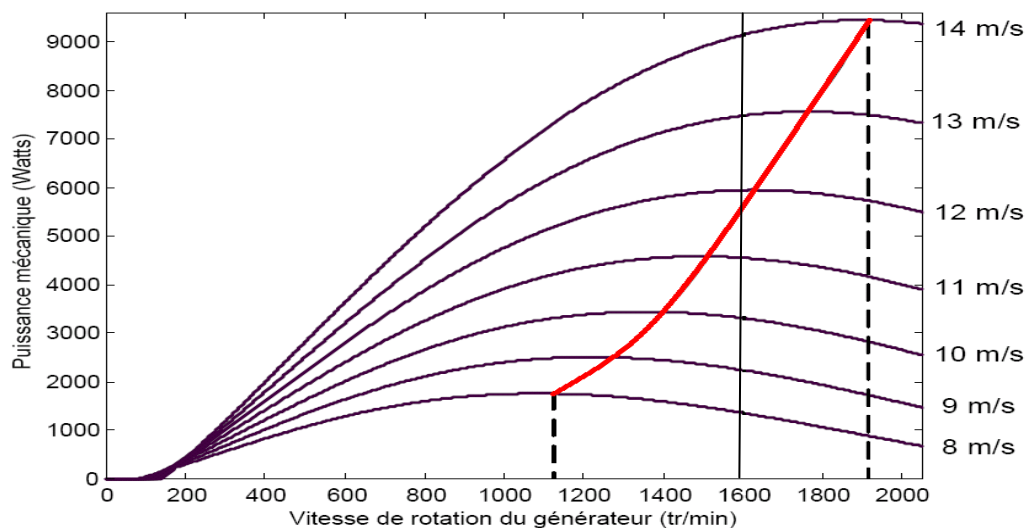


Figure. I.12 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure.I.12) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [POI_03].

I.9. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne Principe

La vitesse de rotation des pales de l'aérogénérateur ne doit pas dépasser une vitesse maximale car cela pourrait endommager le dispositif de conversion. Différentes méthodes de régulation de la vitesse existent, parmi lesquelles certaines sont basées sur le principe de

l'orientation des pales, d'autres sont plus simples et utilisent le principe de décrochage aérodynamique afin de réguler la vitesse [BEN_08].

I.9.1. Système à décrochage aérodynamique "Stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessite une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure. I.13) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [POI_03].

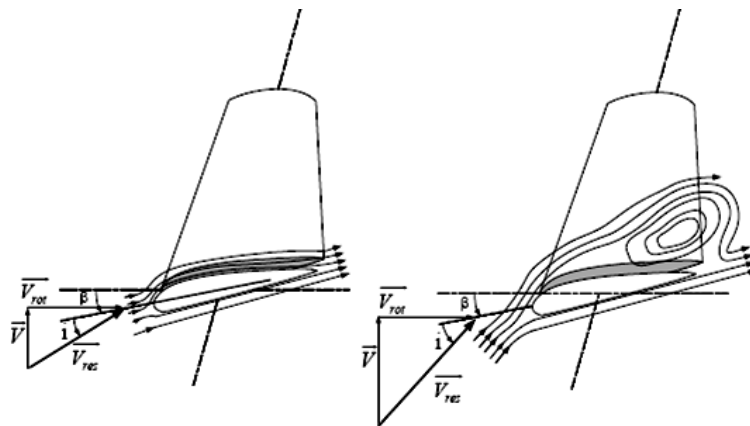


Figure. I.13 Flux d'air sur un profil de pale " Stall"

I.9.2. Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure. I.14) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure. I.15) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur [BEN_08].

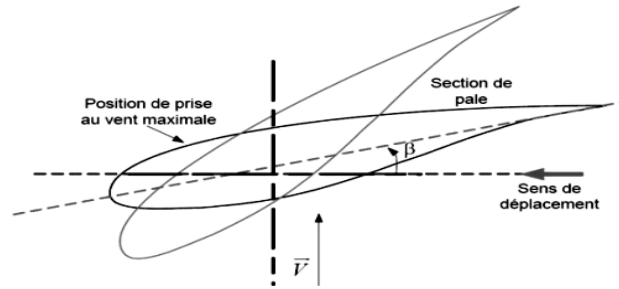


Figure. I.14 Variation de l'angle de calage d'une pale

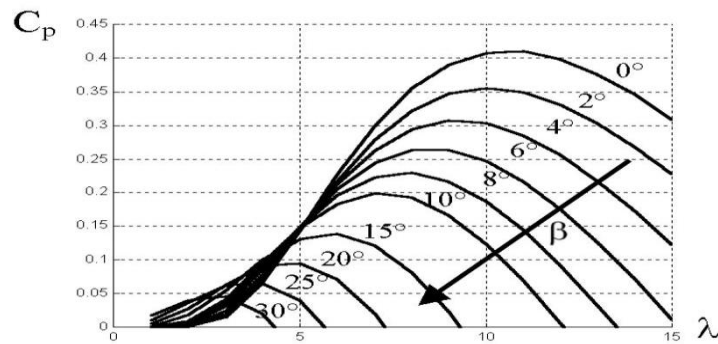


Figure. I.15 Flux d'air sur un profil de pale " Stall "

I.10. État de l'art sur la conversion électromécanique

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement ou indirectement au réseau.

I.10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [POI_03].

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500tr/mn$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [AIM_04] (figure. I.16).

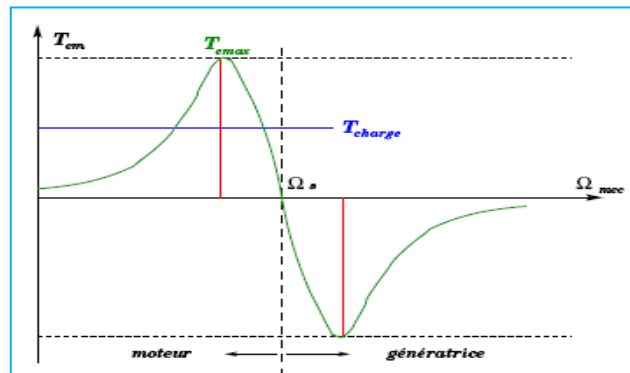


Figure. I.16 Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure. I.17 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [POI_03].

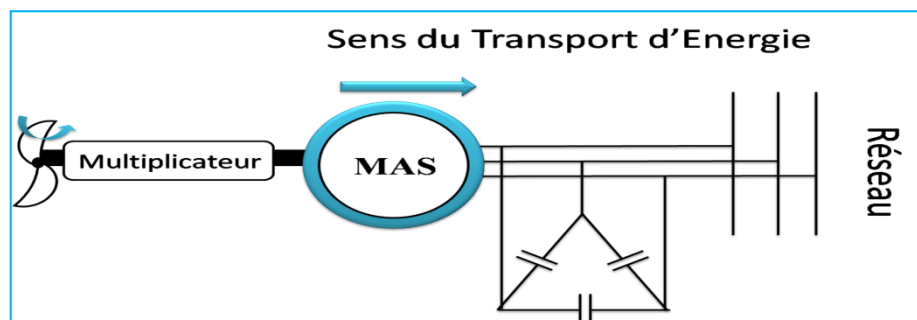


Figure. I.17 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

I.10.1.2. Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure. 1.18) :

- Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

- Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

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 [POI_03].

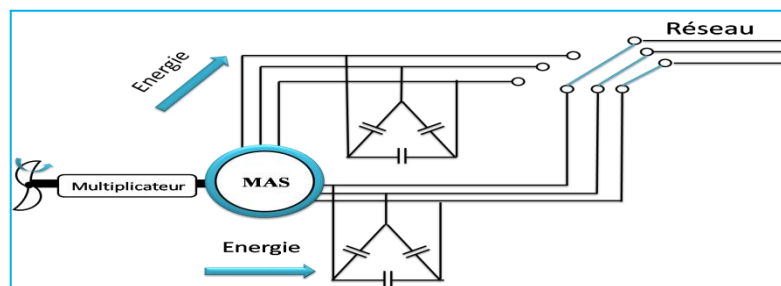


Figure. I.18 Machine asynchrone à double stator

I.10.1.3. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la Figure. 1.19. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire [POI_03].

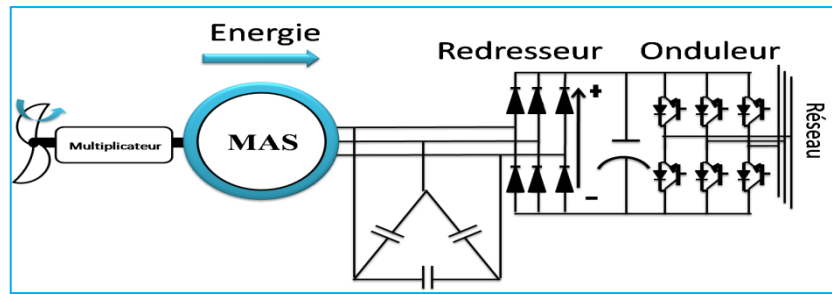


Figure. I.19 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.10.1.4. Machine asynchrone à double alimentation type "brushless"

Cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine. Le rotor possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste : il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques (Figure. I.20) [POI_03].



Figure. I.20 Schéma développé d'un rotor à cage classique et d'un rotor de machine asynchrone "brushless"

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable à l'instar du dispositif de la (Figure. I.20). En revanche, le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Figure. I.21) [POI_03].

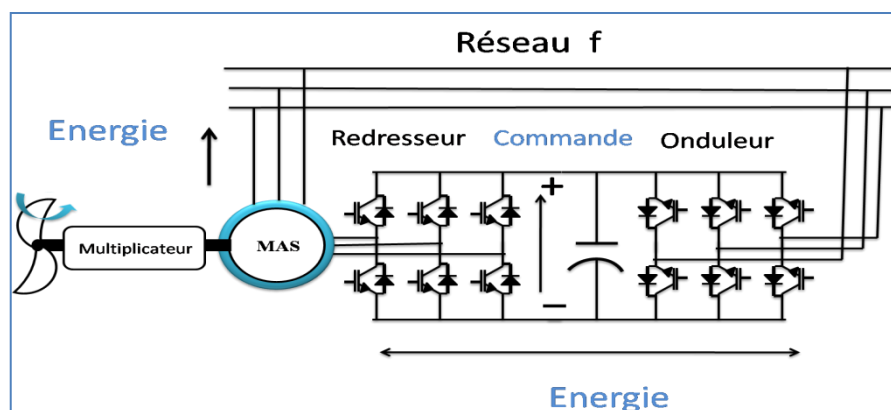


Figure. I.21 Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

I.10.1.5. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants.

Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre 'III' de ce mémoire.



Figure. I.22 Machine asynchrone à rotor bobiné

I.10.1.5.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure. I.23, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO.

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [POI_03].

La variation de la vitesse limitée à environ 10% autour de la vitesse de synchronisme par le changement de la résistance rotor.

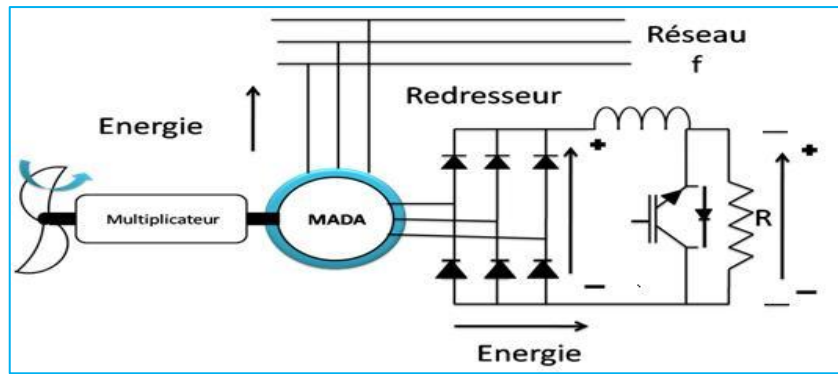


Figure. I.23 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

I.10.1.5.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure. I.24) [POI_03].

L'inconvénient de cette structure est que l'asservissement de la vitesse de la machine n'est pas possible. En plus, l'onduleur triphasé utilisé injecte des courants harmoniques qui sont préjudiciables pour la durée de vie des appareillages électriques raccordés sur le réseau. [MER_07]

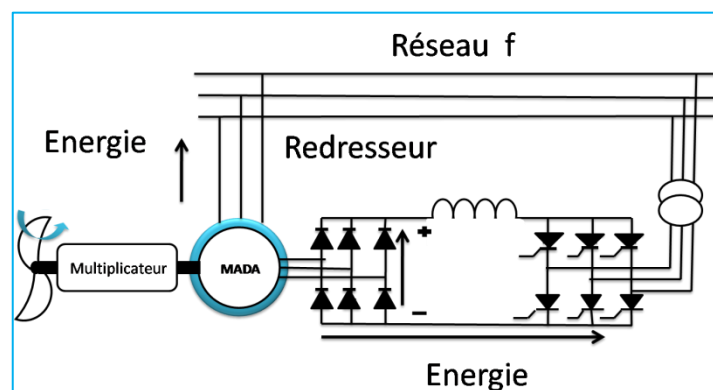


Figure. I.24 Machine Asynchrone à Double Alimentation – structure de Kramer

I.10.1.5.3. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacé par un cycloconvertisseur (Figure. I.25), l'ensemble est alors appelé structure de *Scherbius*.

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure. 1.24. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone) [POI_03].

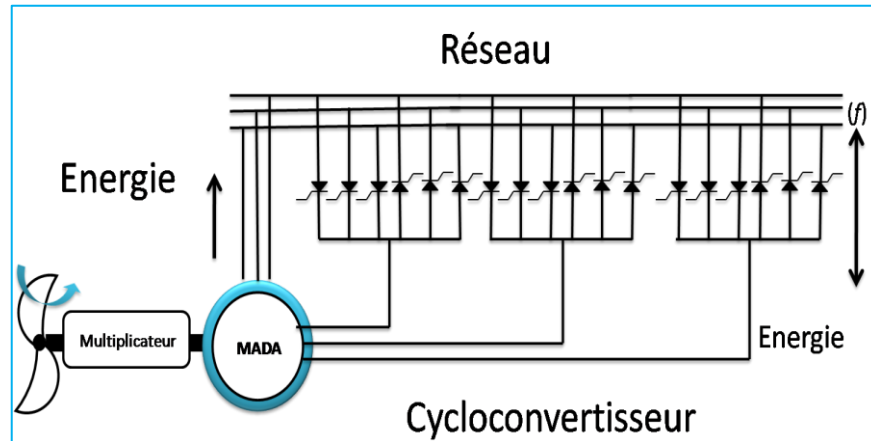


Figure. I.25 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

I.10.1.5.4. Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration (Figure. 1.26) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

Un tel dispositif a l'avantage de fonctionner à vitesse variable en faisant intervenir un convertisseur de faible puissance. Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme [POI_03].

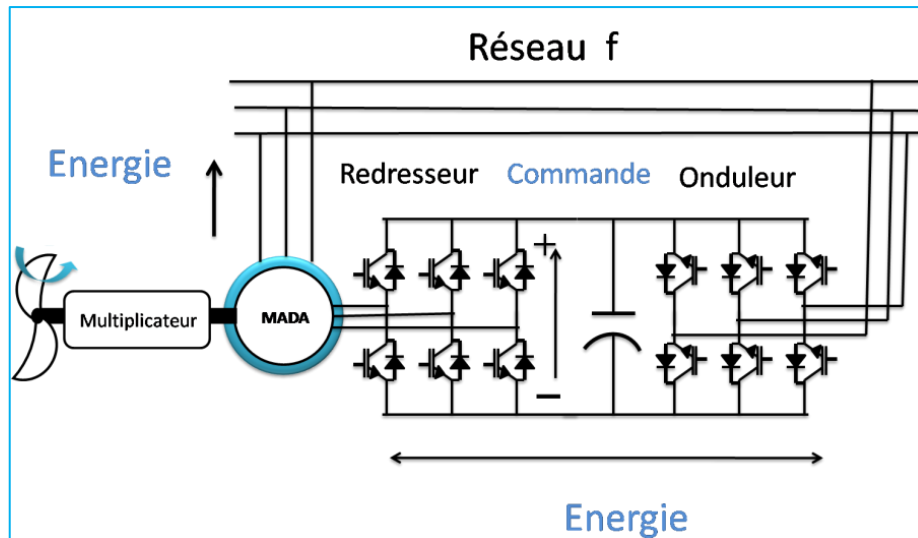


Figure. I.26 Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

I.10.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité [MEK_04].

I.10.2.1. Machines synchrones à rotor bobiné : font appel, le plus souvent, à une excitatrice associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant. Le rotor peut être à pôles lisses ou saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. Pour certaines applications à forte puissance et à grande vitesse (30 MV et 30 000 tr/min par exemple), on utilise un rotor cylindrique massif. Mais il est possible de s'affranchir de l'application à grande vitesse en utilisant une machine synchrone à aimants permanents basses vitesses à grand nombre de paires de pôles [MEK_04].

I.10.2.2. Machines synchrones à aimants permanents : Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la MAS. Le convertisseur de

fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation [MEK_04].

I.11. Outil de travail "Simulation"

Comme on l'a vu auparavant, l'évolution de la technologie de l'énergie éolienne s'est fortement accélérée ces dernières années. La simulation numérique comme outil de conception de nouveaux produits a considérablement contribué à cette accélération. Cet outil informatique permet d'optimiser le fonctionnement et la conception de nouveaux produits ou services. En effet, cette façon de faire évite les nombreux problèmes rencontrés lorsqu'on travaille avec un système réel. Des essais sur le système réel sont évidemment nécessaires, mais ils sont beaucoup moins longs si ce même système a été auparavant testé et optimisé à l'aide d'un simulateur numérique. Ainsi, ce dernier permet de réduire le cycle de conception d'éléments innovants. La difficulté réside dans la modélisation numérique du système que l'on veut modéliser. Une fois cette tâche ardue réalisée, tout le reste devient beaucoup plus simple.

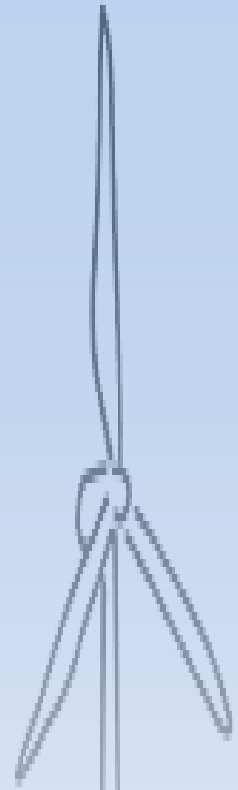
Le simulateur numérique élaboré ici sur Matlab/Simulink est modulaire, ce qui permet d'étudier les différentes composantes de l'éolienne séparément. Cela dit, il est très important d'étudier le système éolien dans son ensemble car les éléments sont interdépendants. Selon les caractéristiques de l'éolienne examinée, les modules sont assemblés différemment. Si on veut par exemple étudier des fluctuations de la puissance électrique dont la constante de temps est de l'ordre de la seconde, il est inutile de modéliser les dynamiques plus rapides, telles que celles des convertisseurs, qui n'influencent pas ces fluctuations à la sortie [CAM_03].

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble sur les différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, et après un rappel des notions nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (loi de Betz), nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine (type axe horizontale) ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Enfin on présente les différents générateurs le plus utilisé pour produire de l'électricité dans le monde.

Dans le chapitre suivant, nous allons examiner la modélisation de la turbine à axe horizontale qui est utilisé dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Modélisation d'une turbine éolienne



Chapitre II

II.1. Introduction:

Comme on l'a vu auparavant, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, leur faible rendement aérodynamique, ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique produite, les ont écartées du marché

Alors, dans ce chapitre, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal tri-pales (figure. II.1). Tous les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles ainsi que les lois de commande associées et est bien adapté à la simulation des phénomènes de nature mécanique et électromécanique étudiés ici. [ROG_04], [CAM_03]

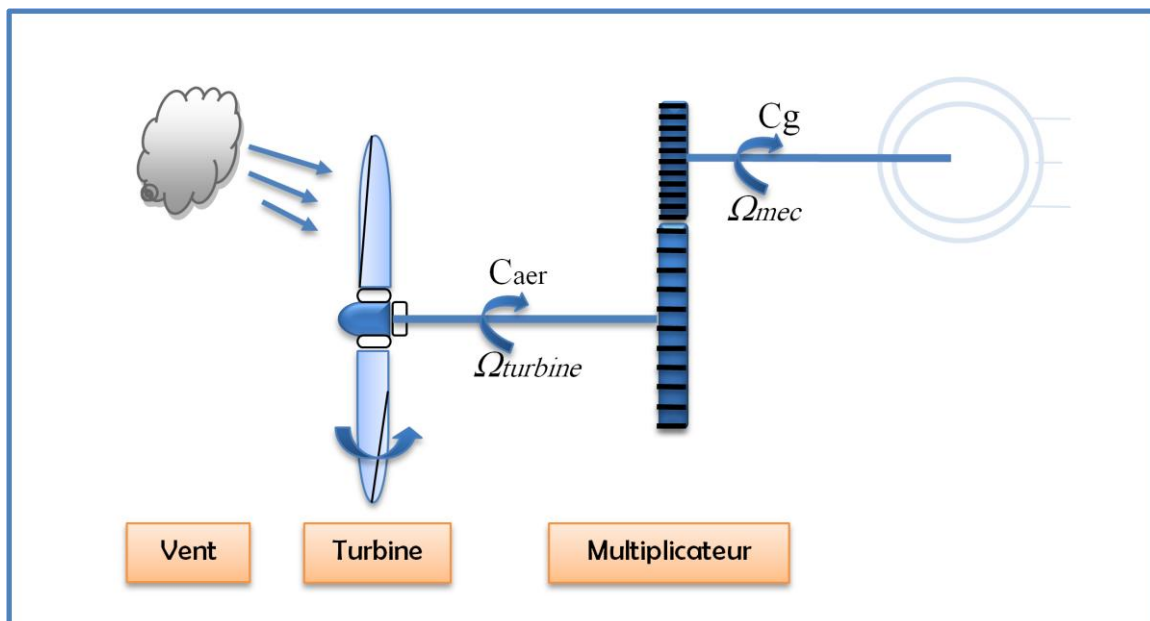


Figure. II.1 Schéma de la turbine éolienne

II.2. Modélisation du vent

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical

n'a pas d'importance du point de vue de la turbine éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur de vitesse évolue dans le plan horizontal. Les turbines à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$v(t) = f(t)$$

Elle sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques:

$$v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \quad (\text{II.1})$$

Nous prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation suivante de vent

$$v(t) = 6.5 + 0.02\sin(0.1047t) + 0.2\sin(0.2665t) + 0.1\sin(1.2930t) + 0.02\sin(3.6645t) \quad (\text{II.2})$$

II.3. Modélisation d'une turbine éolienne à axe horizontal

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple éolien appliquée sur l'arbre lent de l'éolienne.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes [BEN_08]:

- La turbine.
- Le multiplicateur.
- L'arbre.

II.3.1. Hypothèse simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$, relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure II.2).

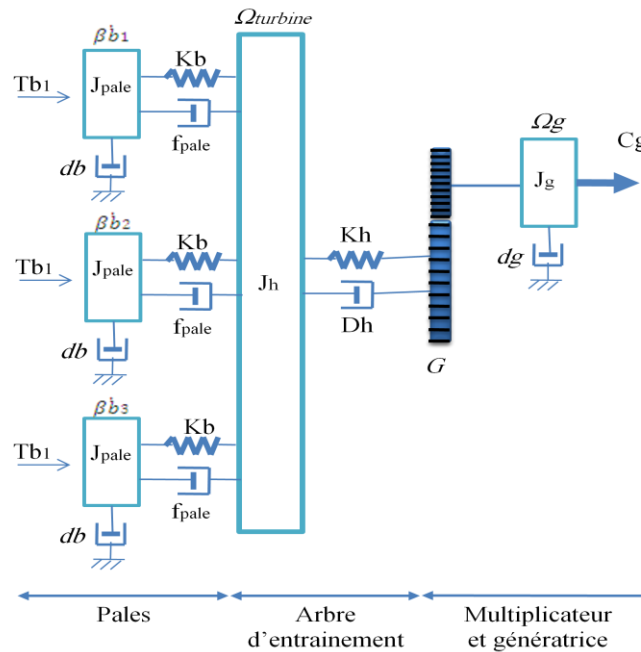


Figure. II.2 Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité Kb
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1$, $\dot{\beta}b_2$, $\dot{\beta}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1 , Tb_2 , Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) alors on peut considérer

l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérise par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement de la cote de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.3) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée. [AIM_04]

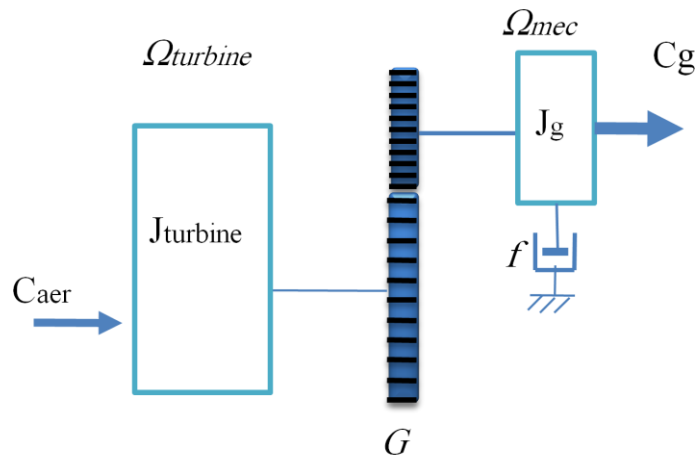


Figure. II.3 Modèle mécanique simplifié de la turbine

II.3.2. Modélisation de la turbine :

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure II.1).

L'énergie cinétique d'une masse d'air m (ρV) qui se déplace avec la vitesse v , est:

$$E_v = \frac{1}{2} m v^2 \quad (II.3)$$

On connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique [LAV_05]

$$P_v = \frac{dE}{dt} \quad (II.4)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S ($S = \pi R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance du vent ou puissance éolienne instantanée serait alors :

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho V v^2 \right] \quad (II.5)$$

$$P_v = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \rho (S \cdot x) v^2 \right] = \frac{1}{2} \rho \left(S \cdot \frac{dx}{dt} \right) v^2 \quad (\text{II.6})$$

$\frac{dx}{dt}$: la vitesse de vent v

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.7})$$

Où

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg.m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- v est la vitesse du vent.

En réalité, le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\beta, \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.8})$$

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$). Il dépend de la caractéristique de la turbine. [AIM_04]

Ce coefficient varie avec l'angle d'orientation des pales (β) et le ratio de vitesse (λ)

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \Omega_{\text{turbine}}}{v} \quad (\text{II.9})$$

Où Ω_{turbine} est la vitesse de la turbine.

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{\text{turbine}}} = C_p \frac{1}{2} \rho S v^3 \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (\text{II.10})$$

❖ Coefficient de puissance C_p :

Généralement le coefficient C_p présente par des graphiques. Le coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre, qui est généralement fourni par le fabricant et peuvent être utilisées, pour définir une approximation mathématique. En effet, celle-ci a été développée dans la littérature pour calculer le coefficient C_p . La modélisation peut se faire avec une approximation polynomiale d'ordre N

$$C_p(\lambda) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \lambda_i \quad (\text{II.11})$$

Dans ce sens. Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 KW, d'où, le coefficient C_p est donné par la formule suivante [MEK_04]:

$$C_p = 7.95633\lambda^5 \cdot 10^{-5} - 17.375\lambda^4 \cdot 10^{-4} + 9.86\lambda^3 \cdot 10^{-3} - 9.4\lambda^2 \cdot 10^{-3} + 6.38\lambda \cdot 10^{-2} + 0.001 \quad (\text{II.12})$$

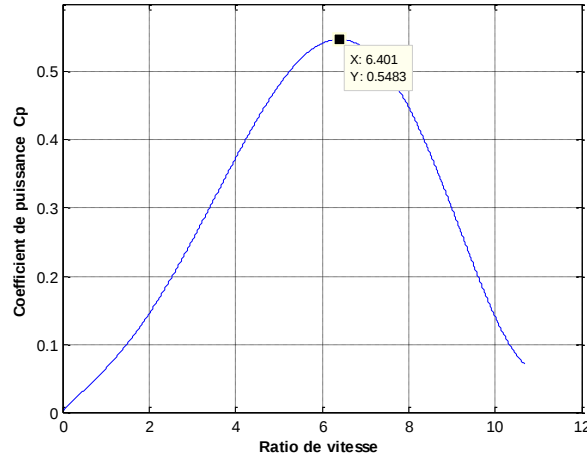


Figure. II.4 Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

On peut remarquer sur la (Figure. II.4) que le coefficient de puissance passe par un maximum pour une valeur particulière du rapport de vitesse que l'on appelle λ_{opt} . Pour laquelle on a coefficient de puissance C_p maximale, et par voie de conséquence une puissance captée maximale. Il est alors possible d'élaborer des lois de commande qui permettent de capter la puissance maximale quelque soit la vitesse du vent jusqu'à la puissance nominale de la génératrice où la puissance extraite est limitée à cette valeur. [DAV_07]

La valeur maximale du coefficient C_p est 0,548 correspond à $\lambda = 6,4$.

II.3.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure II.1).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{c_{aer}}{G} \quad (\text{II.13})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.14})$$

II.3.4. Equation dynamique de l'arbre [AIM_04]

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et 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.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.15)$$

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. 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 :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.16)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît 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

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f : $C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec}$

En prenant en compte l'inertie et les frottements de paliers la voilure peut être présentée comme dans la figure. II.5

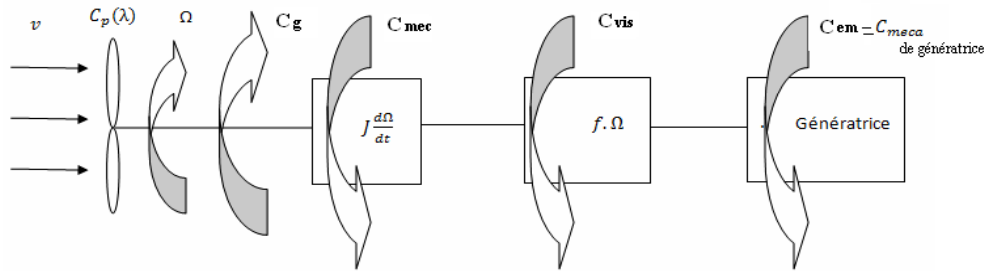


Figure. II.5 Modèle d'une turbine éolienne

L'équivalent électrique d'un tel système inertiel est présenté dans la figure. II.6.

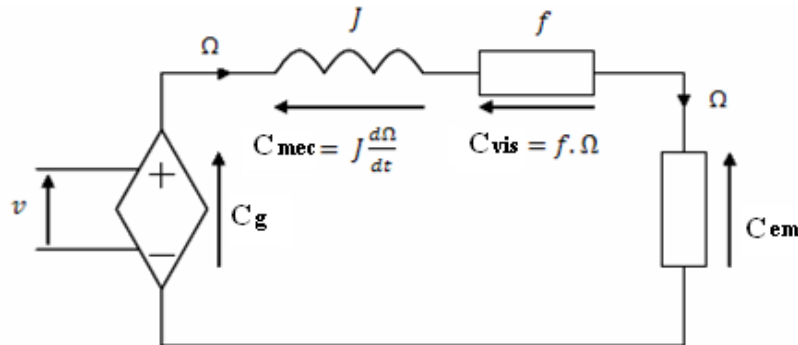


Figure. II.6 Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

$$C_g - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.17)$$

D'où en transfer de LAPLACE on peut obtenir la vitesse :

$$\Omega_{mec} = \frac{1}{Js+f} (C_g - C_{em}) \quad (II.18)$$

II.4. Modèle de la turbine en MATLAB/SIMULINK :

Le modèle de la turbine se déduit aisément de les équations dessus et est représenté sur la Figure. II.7, Figure. II.8

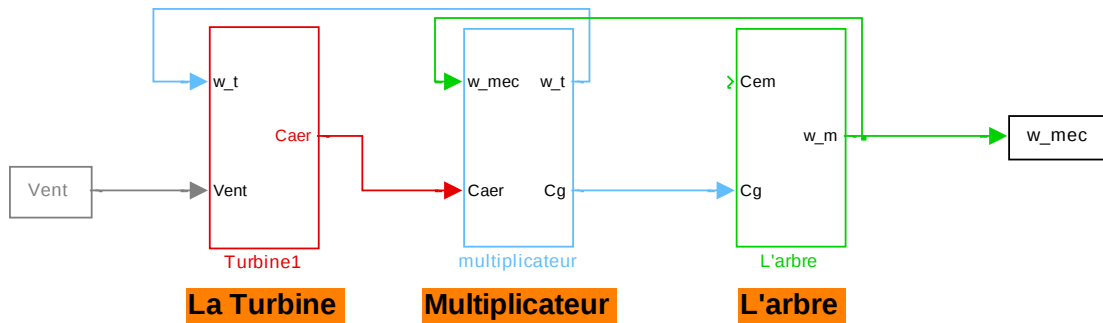


Figure. II.7 Modèle en bloc de la turbine

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme une perturbation.

II.5. Stratégie de commande de la turbine:

Comme il est illustré sur la figure. II.8, on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

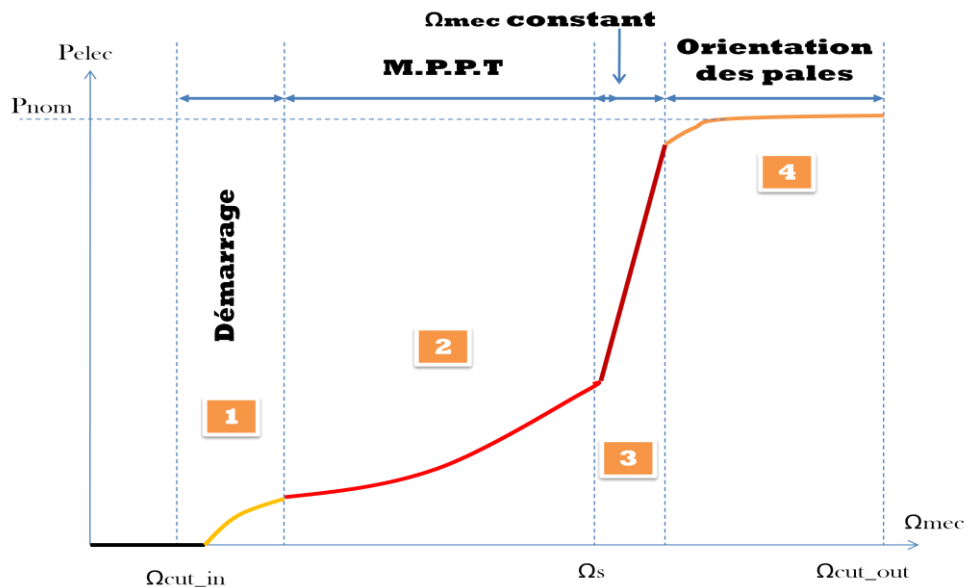


Figure. II.8 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

-Zone1 : A partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire à l'entraînement de l'aérogénérateur l'éolienne commence à tourner ;

-Zone2 : A partir d'une certaine vitesse seuil de la génératrice (correspondant à un glissement de 30%), un algorithme de commande permettant l'extraction du maximum de puissance du vent (MPPT) est appliqué. On maintient l'angle de calage à sa valeur minimale qui correspond au maximum du coefficient de puissance ;

-Zone3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone la puissance atteint jusqu'à 90% de sa valeur nominale ;

-Zone4 : arrivée à la puissance nominale, la vitesse doit être limitée, c'est la phase où intervient la limitation de vitesse par orientation des pales (angle de calage), c'est le «Pitch Control ». [MER_07], [AIM_04].

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

II.6. Maximisation de la puissance extraite:

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe de MPPT. On distingue deux structures de commande [MER_07]:

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

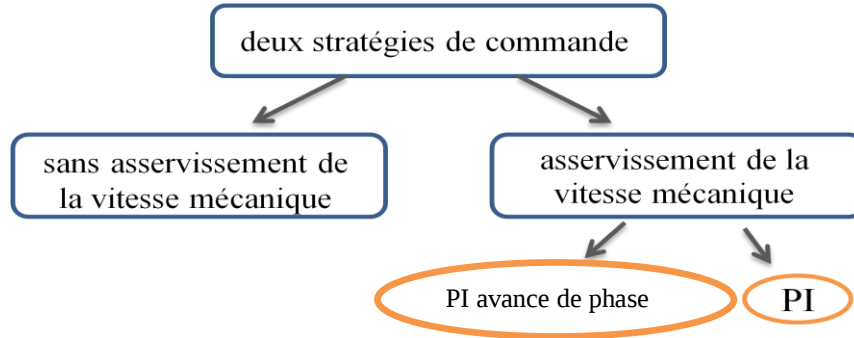


Figure. II.9 Stratégies de commande de la turbine

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit donc à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [MER_07], [AIM_04].

II.6.1. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.19)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux, on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (II.20)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient

$$C_{aer} = C_p \frac{1}{2} \rho S \frac{1}{\Omega_{turbine_estimée}} v^3_{estimée} \quad (II.21)$$

Avec:

$$v_{\text{estimée}} = \frac{\Omega_{\text{turbine_estimée}} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{II.22})$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{cp \text{ max}}$, qui correspond au maximum du coefficient de puissance $C_{p \text{ max}}$ et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \frac{C_p}{\lambda^3 C_{p \text{ max}}} \Omega_{\text{mec}}^2 \quad (\text{II.23})$$

La figure. II.10.a, figure. II.10.b représente le schéma bloc et le modèle de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

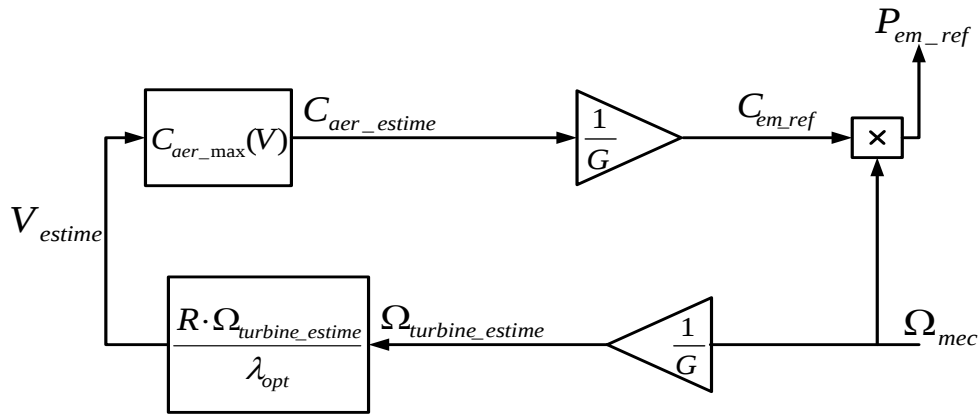


Figure. II.10.a Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

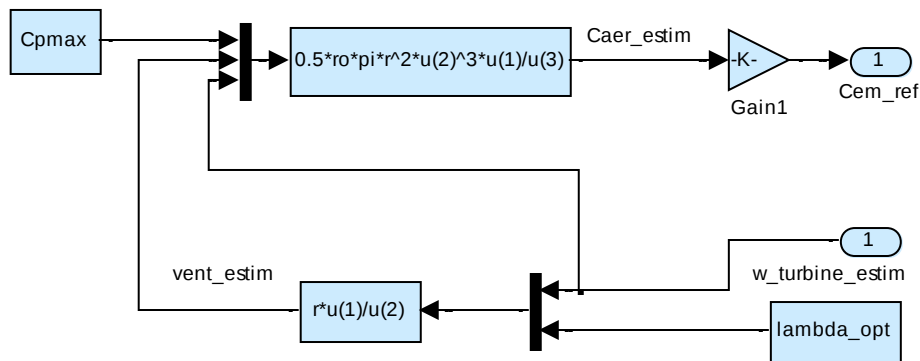


Figure. II.10.b Modèle de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse en MATLAB/SIMULINK

II.7. Résultats de Simulation et interprétations

Nous présenterons la Simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les Simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Cet environnement nous permet de développer les schémas blocs de régulation et de les associer aux modèles de machine

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice mais simplement observer le couple produit à la sortie du multiplicateur en fonction de l'évolution du vent. Pour ce faire, Nous avons besoin de la valeur du couple électromagnétique de multiplicateur, couple qui serait imposée par la génératrice en fonction de la puissance qu'elle produit.

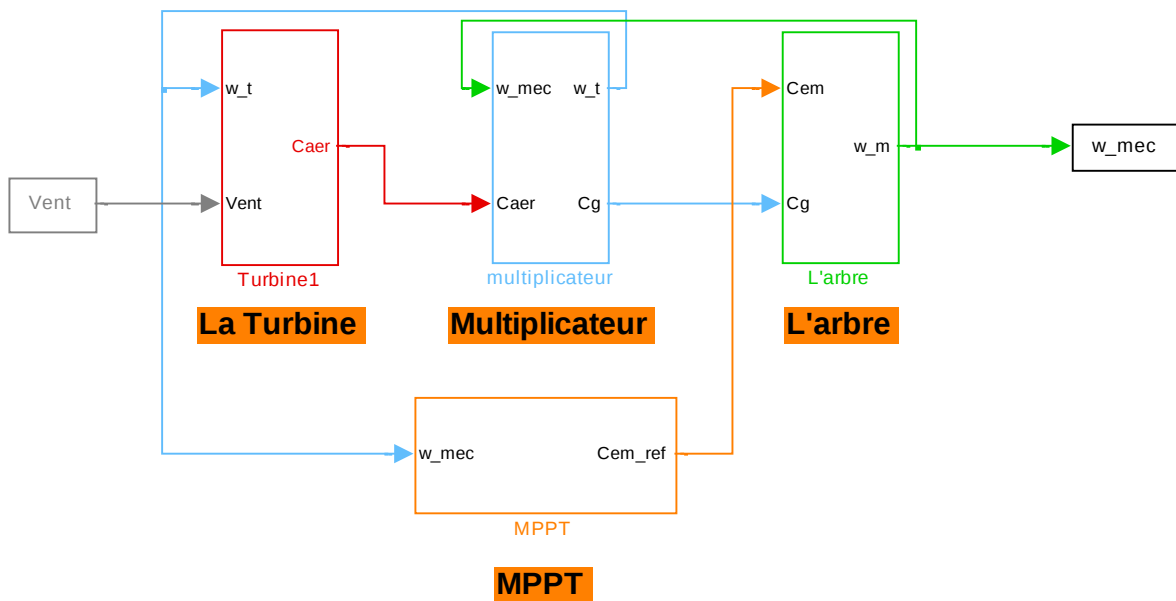


Figure. II.11 Modèle de la turbine avec la Commande en MATLAB/SIMULINK

Nous allons donc nous fixer une couple référence et utiliser le profil de vent de la figure. II.11 pour valider le modèle établi précédemment. Nous observerons l'allure de la Vitesse mécanique et de la puissance de référence en fonction de l'évolution du vent.

Où les composants électriques utilisés donnés en Annexe A.2.

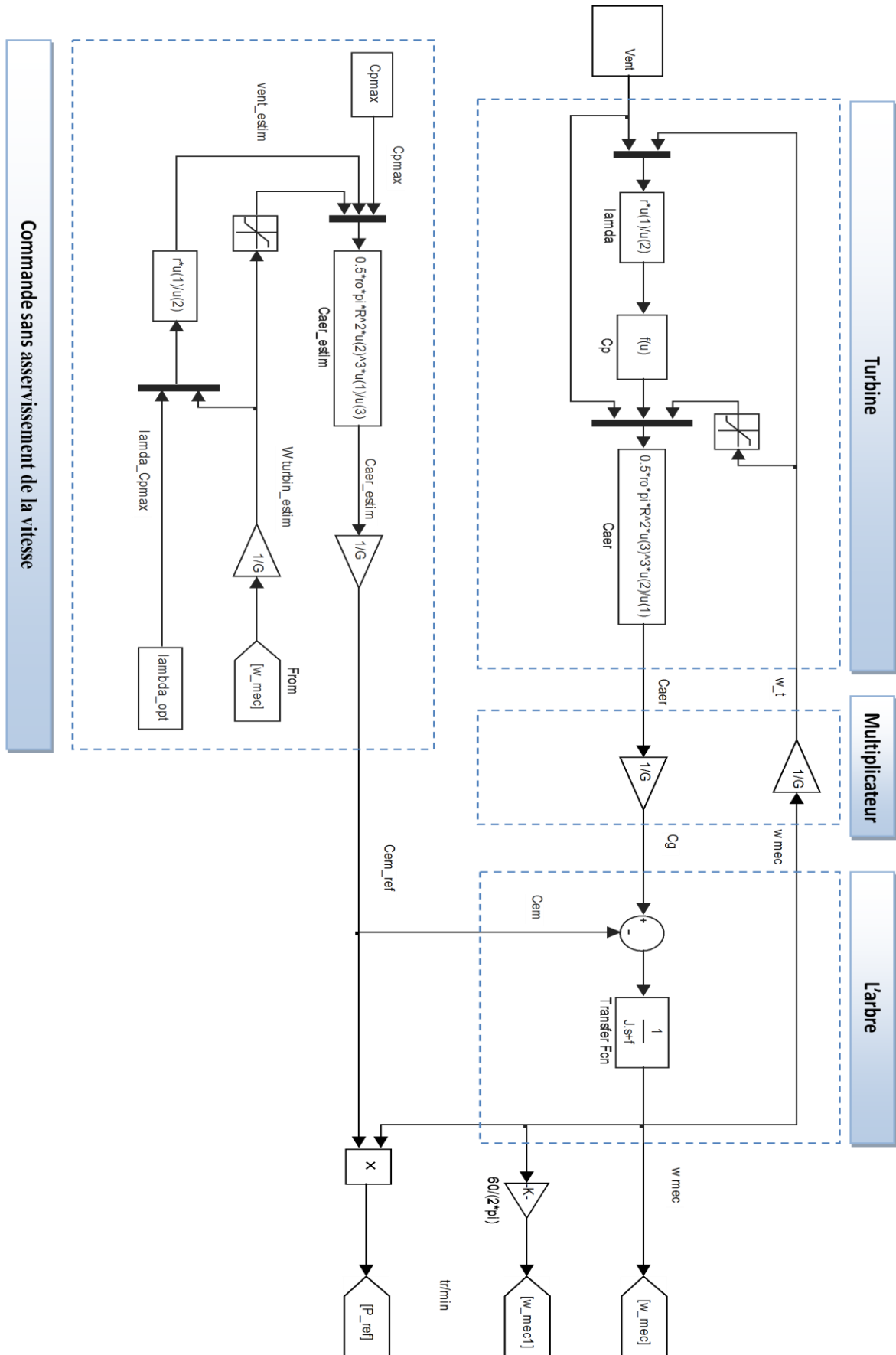


Fig. II.12 Modèle éclaté de la turbine éolienne

A. Profil du vent :

La figure (II.13) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne.

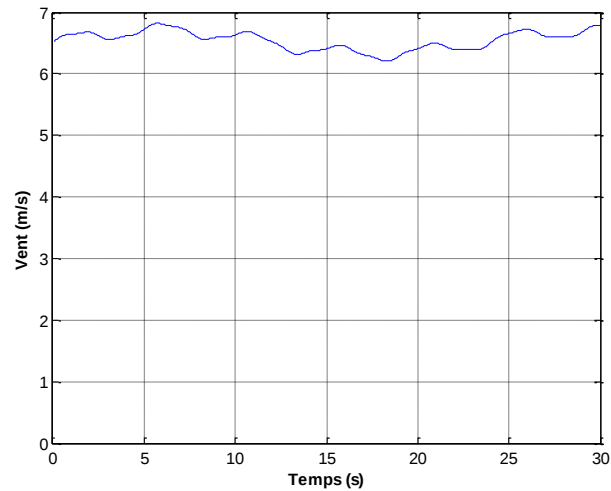


Figure. II.13 Profil du vent

B. Le coefficient de puissance :

La figure (II.14) montre le coefficient de puissance obtenu par le profil du vent présenté sur la figure (II.13).

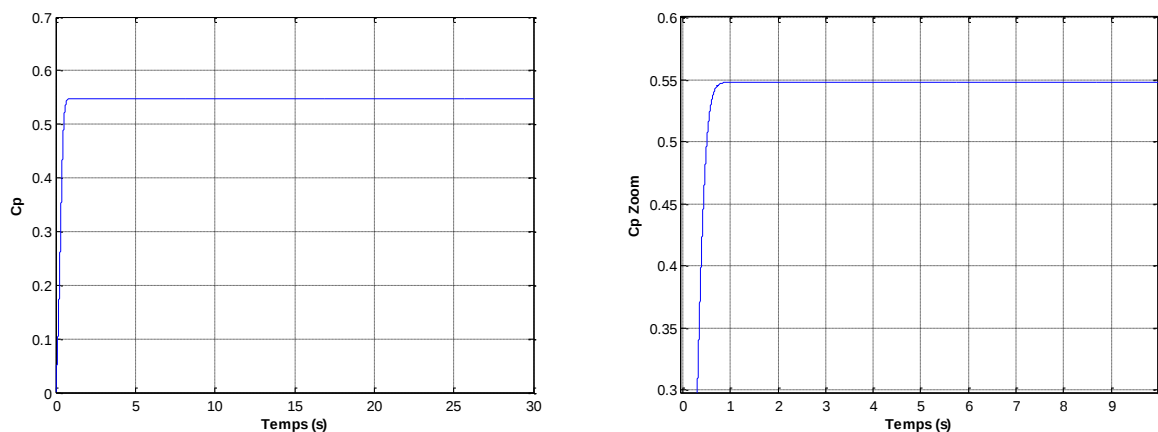


Figure. II.14 Coefficient de puissance avec un zoom

Ce coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{optimale}$.

On remarque que le C_p atteint une valeur moyenne de 0,54, il cherche à être gardé au maximum possible pour but de maximiser la production, et varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

C. La puissance électrique et la Vitesse mécanique :

En négligeant les pertes d'origine électrique, la puissance électrique devient égale à la puissance électromagnétique définie par $(\Omega_{mec} \cdot C_{em})$. Cette puissance -puissance de référence- sera comptabilisée négativement car elle s'oppose à la puissance aérodynamique "pour respecter la convention récepteur de l'ensemble". Lorsque ces deux puissances sont égales, l'éolienne tourne à vitesse constante.

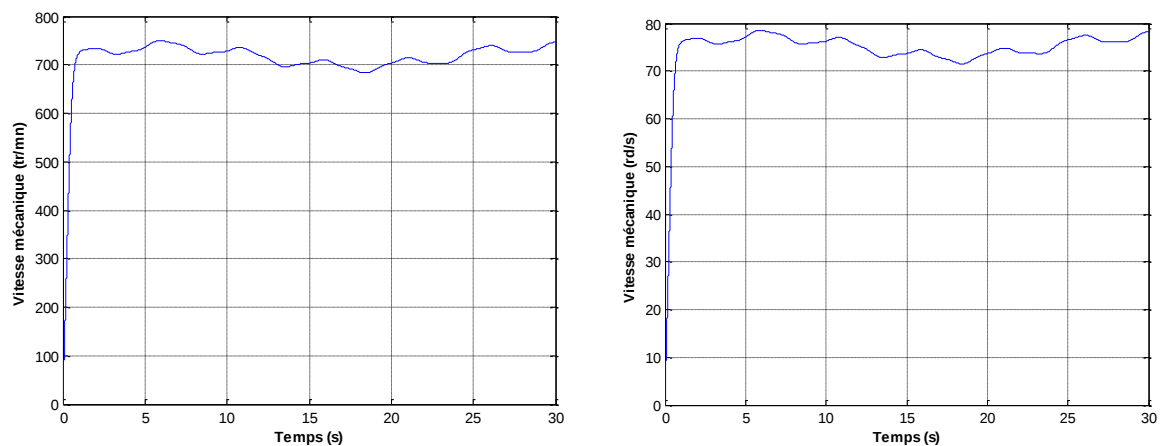


Figure. II.15 Vitesse mécanique

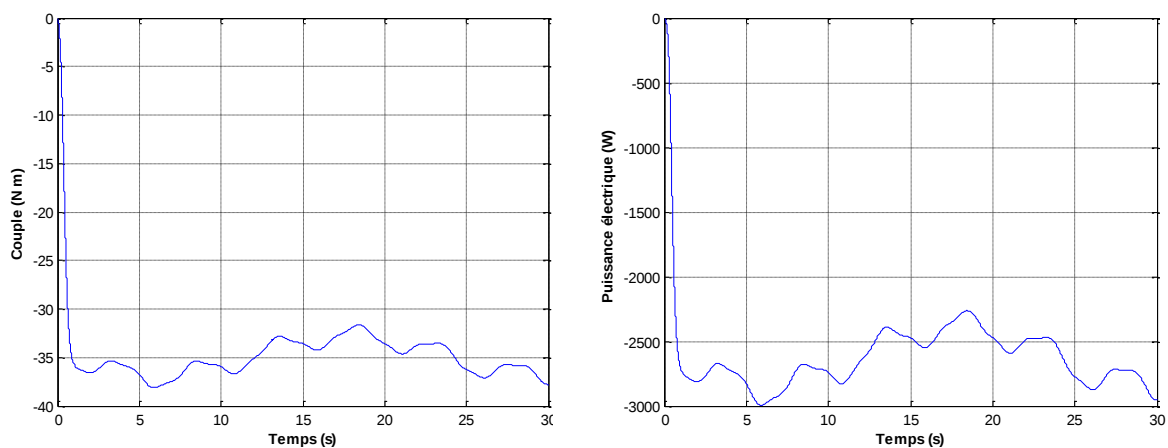


Figure. II.16 Couple et Puissance électrique produite

II.8. Conclusion:

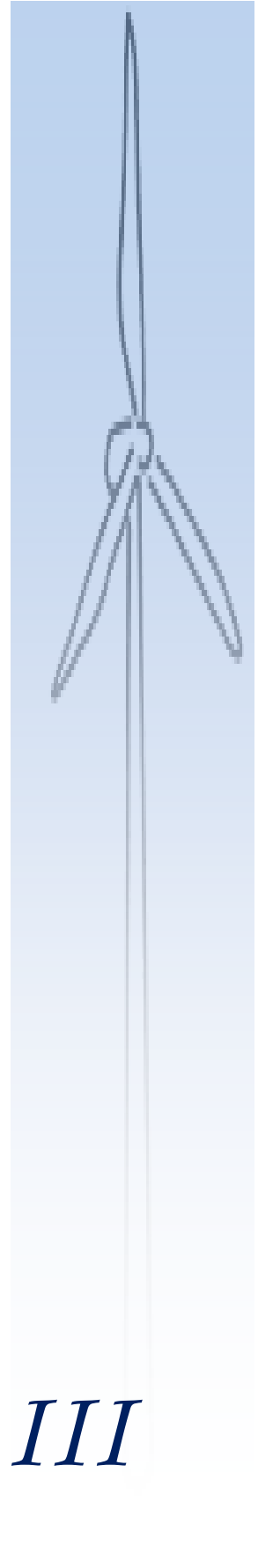
Dans ce chapitre nous avons détaillé une modélisation des différentes parties de la turbine éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil de pales, l'angle décalage de celle-ci et le profil de vent utilisé.

Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations. [BOY_06]

Cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne. Elle comporte sa propre commande afin de maximiser la puissance extraite du vent par MPPT .

Nous allons maintenant nous intéresser aux autres parties de l'éolienne afin de modéliser l'ensemble et étudier le fonctionnement global du système de conversion d'énergie.

*Modélisation
et
Simulation
de la MADA*



Chapitre III

III.1. Introduction

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation. Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

Nous verrons dans ce chapitre la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). En tenant compte des considérations du certain nombre d'hypothèses simplificatrices et ou on va constate que le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques dans le temps, aussi la transformation de Park qui permet la simplification du modèle. A la fin on expose les résultats de la simulation.

III.2. Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties, **un stator** analogue à celui des machines triphasées classiques, constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. **Le rotor** de cette machine est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent se frotter des balais lorsque la machine tourne. [MER_07] Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur.

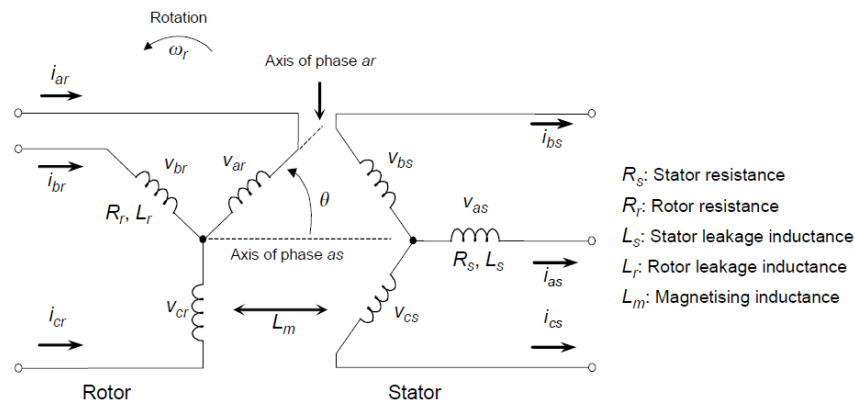


Figure. III.1 Stator et le rotor circuit électrique d'une machine à induction

III.3. Principe de fonctionnement

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances ($<500\text{kW}$), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales du régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve :

- L'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble. On peut même imaginer qu'un système "intelligent" augmente la marge de stabilité. Ce dernier aspect peut jouer sur la limite de puissance raccordable au réseau et permet la suppression, entre stator et réseau, de condensateurs susceptibles de provoquer des résonances.
- Le rendement de la conversion
- Le filtrage ou la qualité des formes d'ondes injectées au réseau ;
- Le prix, évidemment. [SOU_07]

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . 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 $(1+g)P$. Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (Figure.III.2). 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 [AIM_04].

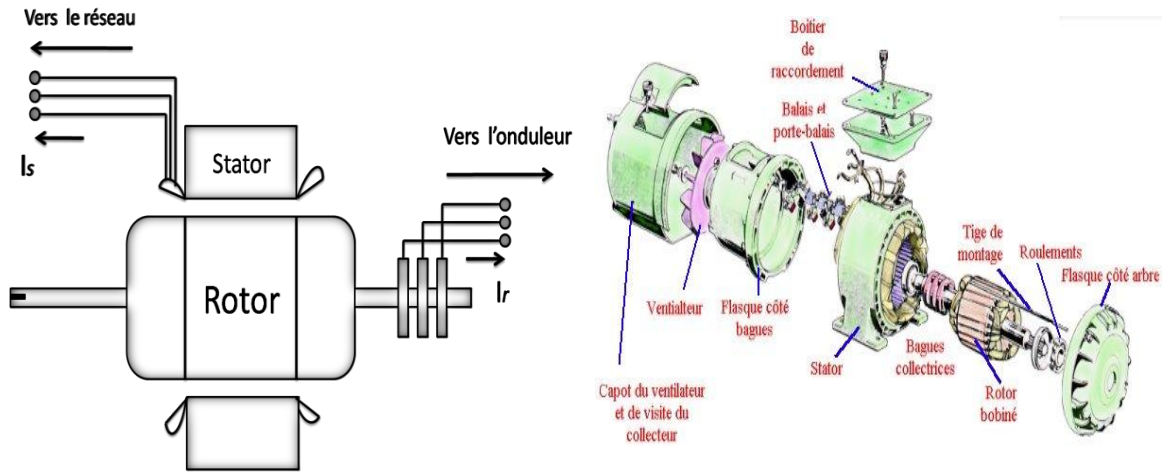


Figure. III .2 Machine à induction à rotor bobiné

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

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (\text{III.1})$$

En posant : $g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$ L'équation (III.1) devient:

$$\frac{E_r}{E_s} = g \cdot \frac{N_r}{N_s} \quad (\text{III.2})$$

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

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (\text{III.3})$$

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

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{E_r}{E_s} \frac{I_r}{I_s} = g \quad (\text{III.4})$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, 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 en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g [AIM_04].

III.4. Fonctionnement à vitesse variable

La machine à double alimentation a fait l'objet de deux variantes de fonctionnement :

III.4.1. Fonctionnement Moteur

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme la puissance du glissement peut être récupérée, c'est la cascade **hypo synchrone**. En cascade **hyper synchrone**, une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.[MER_07] .

III.4.2. Fonctionnement génératrice

La puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode **hypo synchrone**, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode **hyper synchrone**, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance est transmise par l'intermédiaire du rotor [MER_07].

Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci-dessous (Figure.III.3):

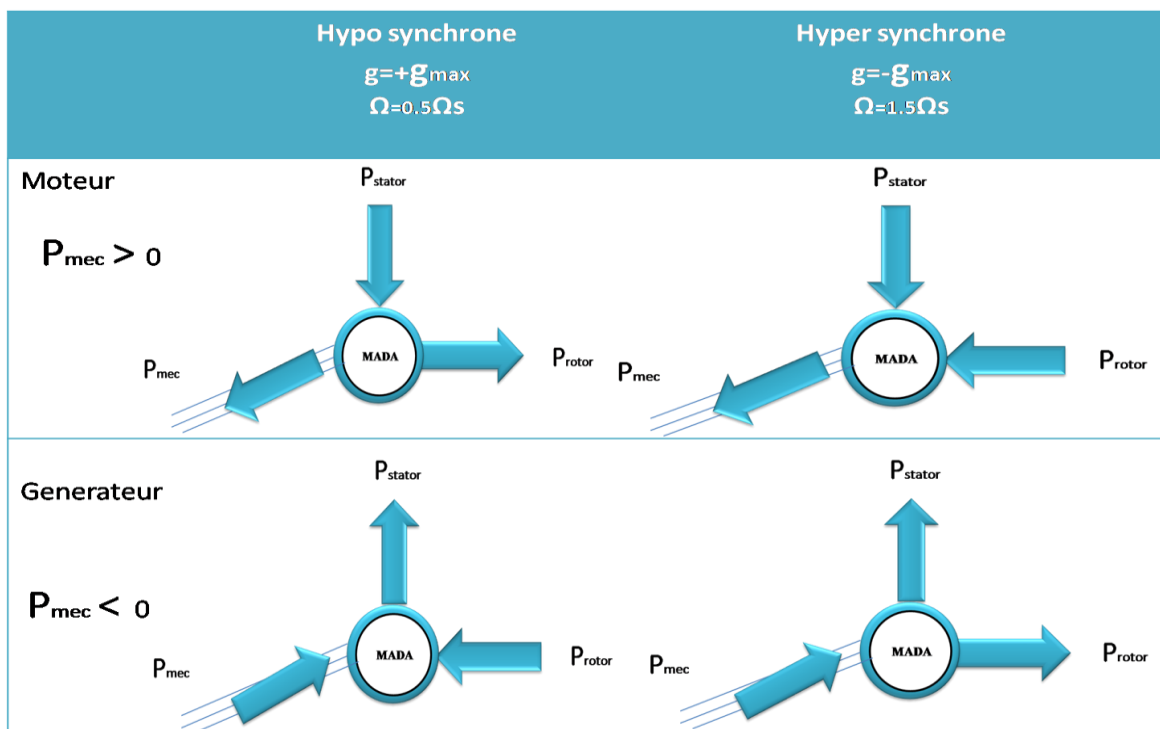


Figure. III.3 Différents modes de fonctionnement de la MADA.

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas ($\pm$) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance du glissement. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques. Plusieurs technologies de machines asynchrones à double alimentations ainsi que plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables et sont présentés [MER_07].

III.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La modélisation d'une machine asynchrone était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant. La simplicité de conception et d'entretien de cette machine à la faveur des industries, s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Les méthodes matricielles sont développées et sont devenues les bases pour une approche de modélisation, de simulation, d'identification et de commande. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

III.5.1. Hypothèses simplificatrices

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ❖ Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ;
- ❖ Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- ❖ Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques;
- ❖ Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [MER_07].

III.5.2.Représentation de la MADA dans repère triphasé (abc)

Les équations générales de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère triphasé [TAM_06] :

❖ Equations électriques

Par application de la loi de faraday à chaque enroulement de la machine représentée par la figure.III.1 on peut écrire :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (III.5)$$

Avec:

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique de la MADA sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

❖ Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (III.6)$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

III.5.3. Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park)

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques [MER_04]. Cette transformation est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha\beta)$, puis vers le repère (dq) .

Le repère $(\alpha\beta)$ est toujours fixe par rapport au repère (abc) ; par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe $(\alpha\beta)$ un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [SAL_07].

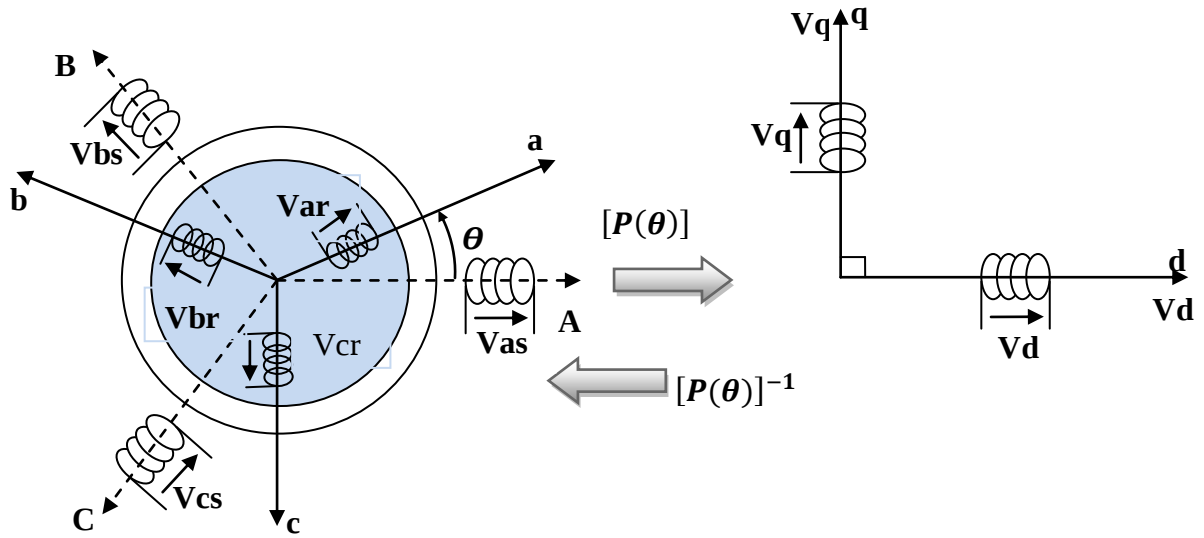


Figure. III.4 Passage du triphasé au biphasé et l'inverse

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

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

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

Cette matrice permet le passage des composantes X_{abc} du système triphasé aux composantes biphasées; avec X_{abc} peut être : un vecteur de tension, courant ou flux.

III.5.4.Choix du référentiel

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre [AZA_08].

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

- 1) au stator
- 2) au rotor
- 3) au champ tournant

III.5.4.1.Référentiel lié au stator

$$\omega_{coord} = 0$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées

III.5.4.2.Référentiel lié au rotor

$$\omega_{coord} = \omega_r$$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

III.5.4.3.Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_{coord} = \omega_s$. Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [AZA_08].

Application de la transformation de Park à la MADA

Les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit :

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont $\omega_{coor} = \omega_s$

- **Tensions:**

$$\begin{cases} [V_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \end{cases} ; \begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq0}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Courants :**

$$\begin{cases} [I_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} ; \begin{cases} [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq0}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq0}]_r \end{cases}$$

- **Flux:**

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0}]_s = [P(\theta_s)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\varphi_r] \end{cases} ; \begin{cases} [\varphi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_s \\ [\varphi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\varphi_{dq0}]_r \end{cases}$$

III.5.5.Représentation de la MADA dans repère biphasé (dq)

❖ **Equations électriques**

En multipliant les systèmes des équations (III.5) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (III.7)$$

Sous forme vectorielle cela donne

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + J \omega_s \bar{\varphi}_s \\ \bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + J(\omega_s - \omega) \bar{\varphi}_r \end{cases} \quad (III.8)$$

Avec :

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad J: \text{appelée matrice de rotation}$$

❖ Equations magnétiques

En multipliant les systèmes des équations (III.6) par la matrice de Park, on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Equations électriques sous forme matricielle

Les deux systèmes des équations (III.7) et (III.9) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + M \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{dI_{rd}}{dt} + M \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{dI_{rq}}{dt} + M \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Ce système d'équation (III.10) se traduit sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \\ &+ \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11}) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow [V] = [A][I] + [B] \frac{d}{dt}[I] + \omega_s [C][I] + \omega [D][I] \quad (\text{III.12})$$

Et la matrice, ce qui représente les équations magnétiques

$$[\varphi] = [B][I] \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Dont : } [V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} ; [I] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} ; [\varphi] = \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}$$

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

III.5.6. Expression de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive au stator est définie comme:

$$\text{On a: } \begin{cases} V_s = V_{sd} + j V_{sq} \\ V_r = V_{rd} + j V_{rq} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_s = \text{Re} ([V_s][I_s]) \\ Q_s = \text{Im} ([V_s][I_s]) \end{cases}$$

Avec la multiplication et tout les calcules il en résult:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Le même pour les puissances active et réactive rotorique

$$\begin{cases} P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

III.5.7. Expression du couple électromagnétique

Nous avons exprimé les équations de la machine, mais il reste également le couple électromagnétique. Ce dernier peut être obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes (dq) est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ P_s &= \left(R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \right) I_{sd} + \left(R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \right) I_{sq} \\ P_s &= R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + \left(\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq} \right) + \omega_s (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \end{aligned}$$

Elle se décompose en trois termes :

- 1) Puissance dissipée en pertes joules

$$R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2)$$

- 2) Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} I_{sq}$$

- 3) Puissance mécanique

$$\omega_s(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd})$$

Et d'autre part on a :

$$C_{em} = \frac{P_m}{\Omega_s} \quad ; \quad \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad ; \quad C_{em} = p \frac{P_m}{\omega_s}$$

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (III.16)$$

III.6. Résultats de la Simulation

Les théories et les équations citées seront modélisées pour permettre un traitement avec MATLAB/SIMULINK. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

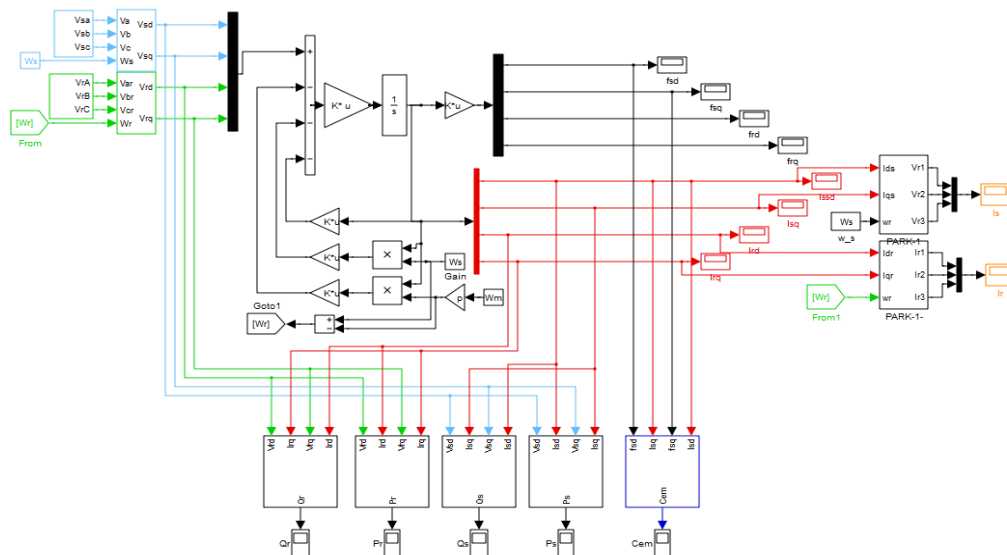


Figure. III.5 Schéma bloqué de la modèle de MADA

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min. Les résultats obtenus montrent que :

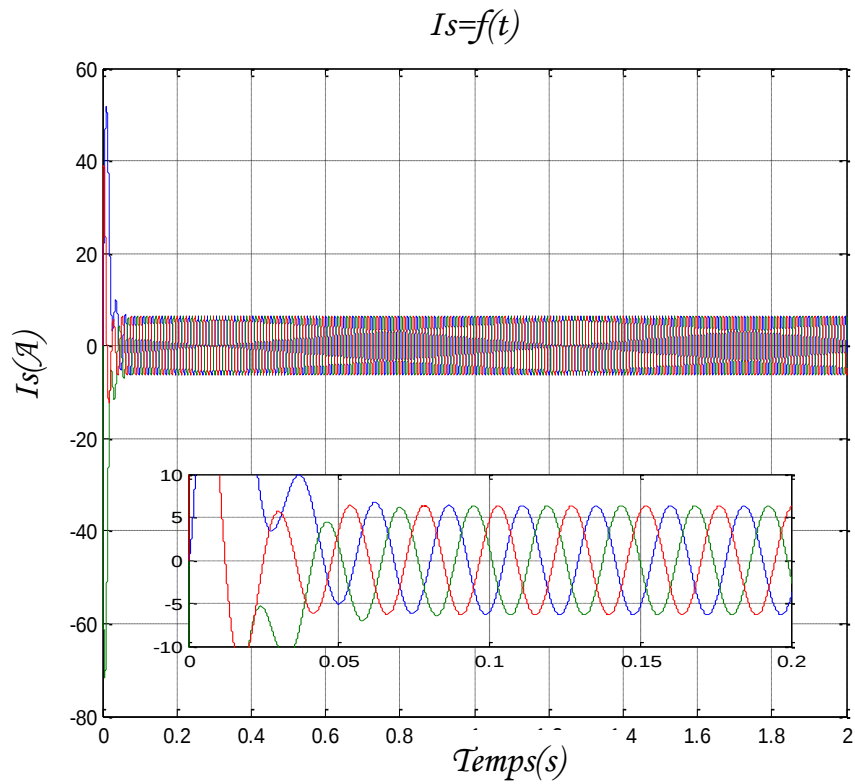


Figure. III.6 Courbe du courant statorique avec zoom

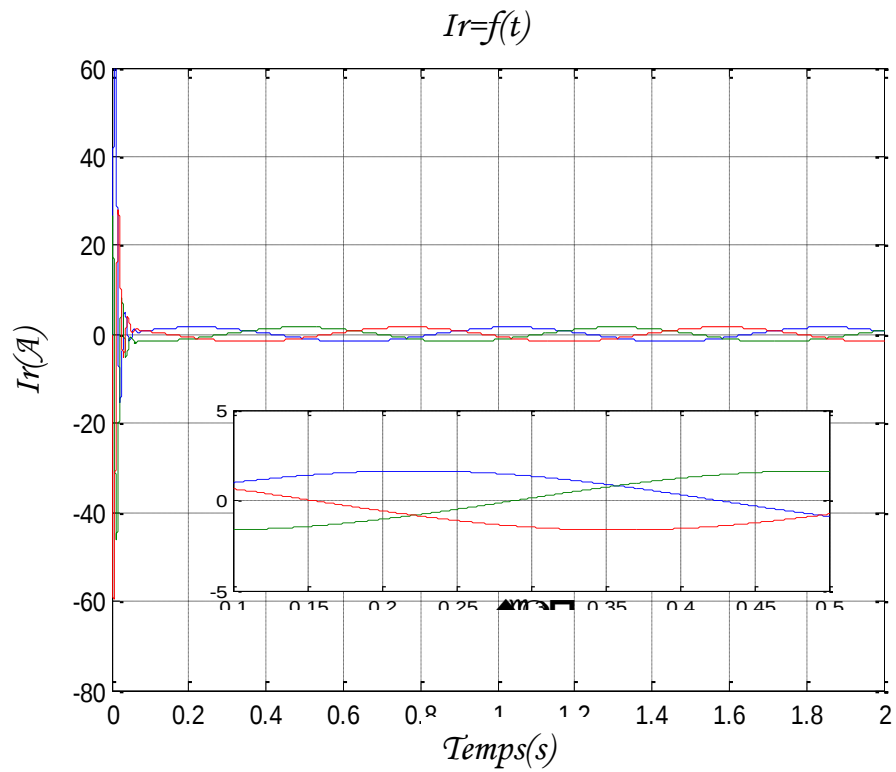


Figure. III.7 Courbe du courant rotorique avec zoom

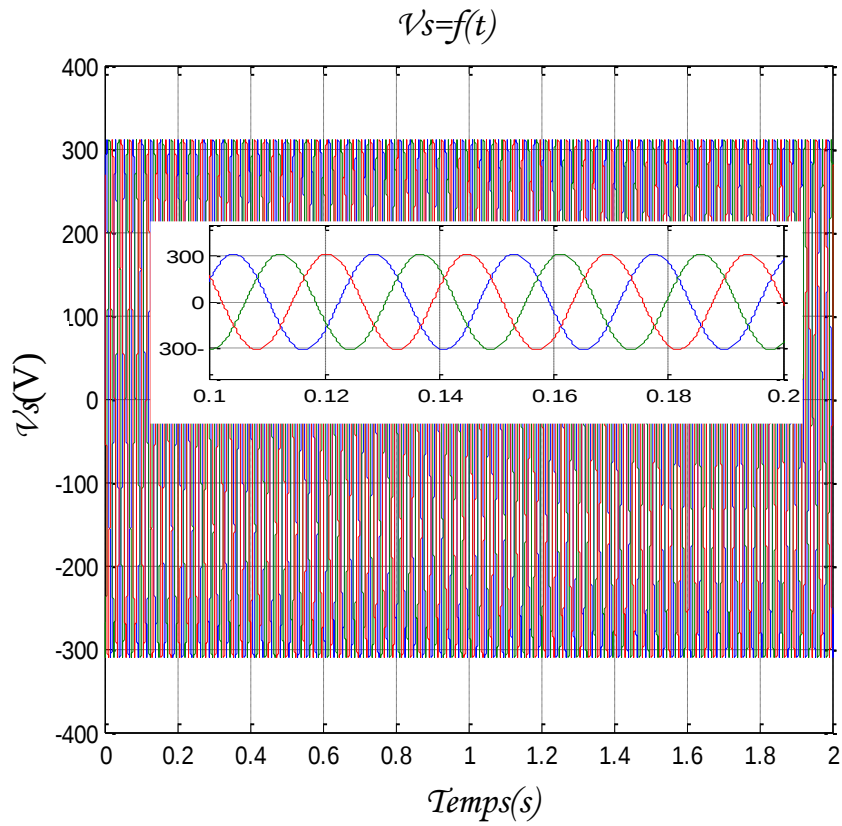


Figure. III.8 Courbe de la tension statorique avec zoom

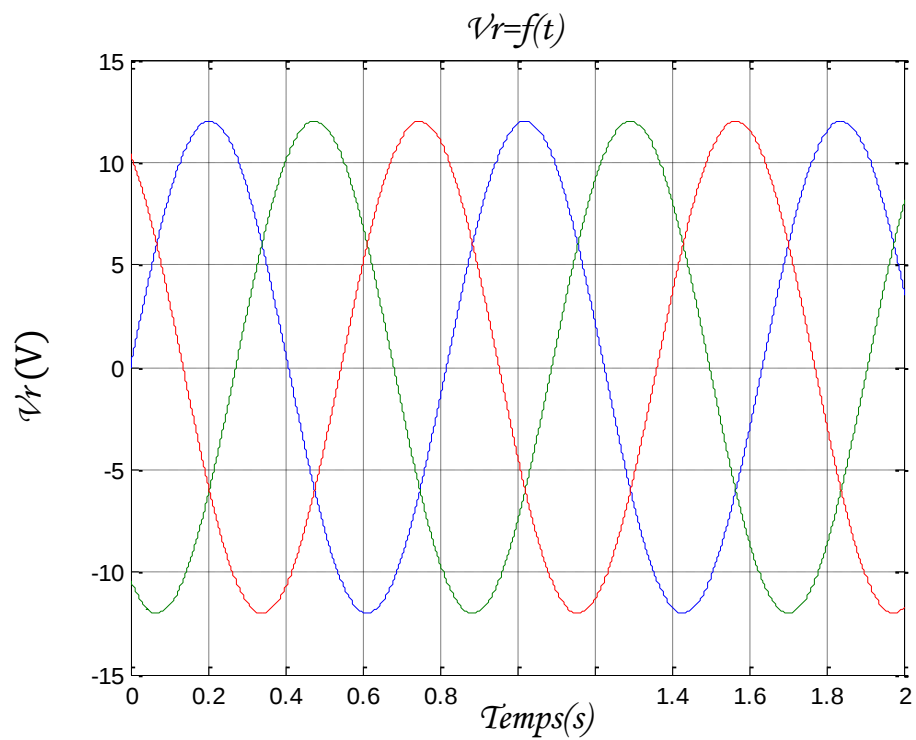


Figure. III.9 Courbe de la tension rotorique

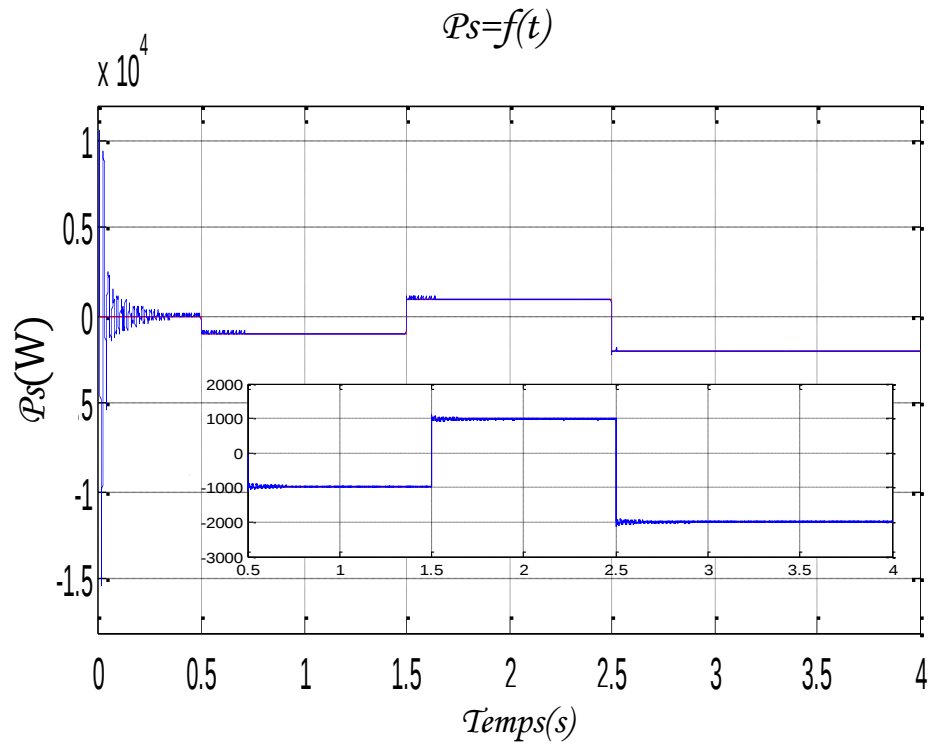


Figure. III.10 Courbe de la puissance active statorique avec zoom

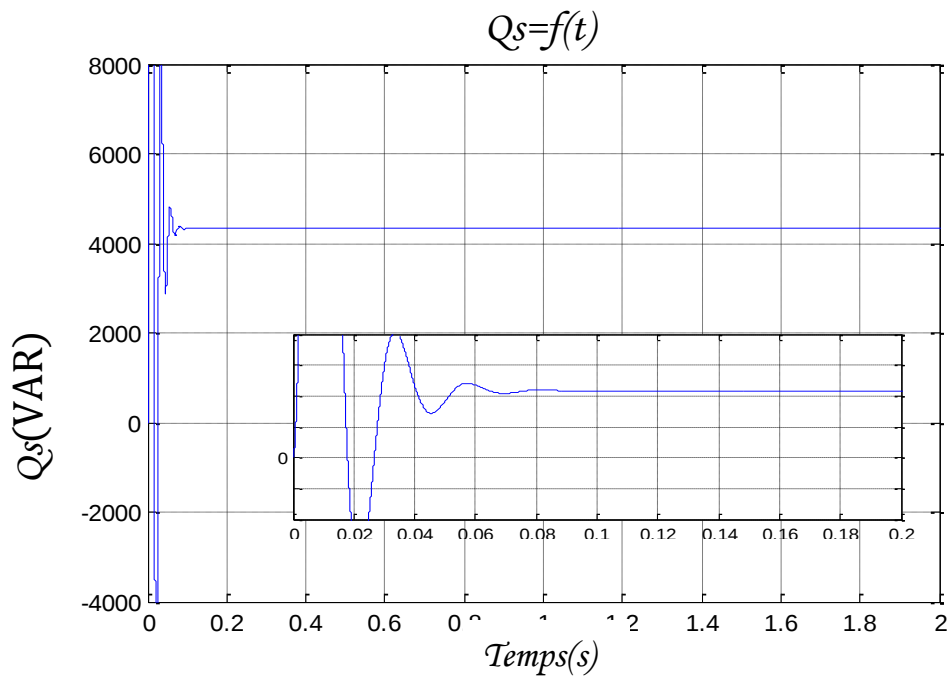


Figure. III.11 Courbe de la puissance réactive statorique avec zoom

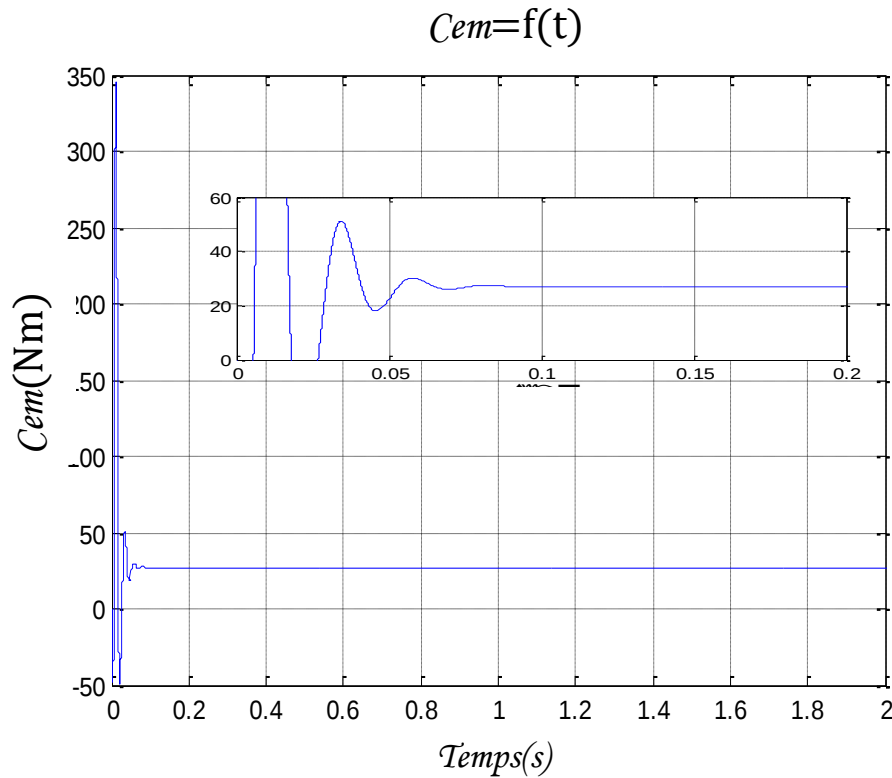


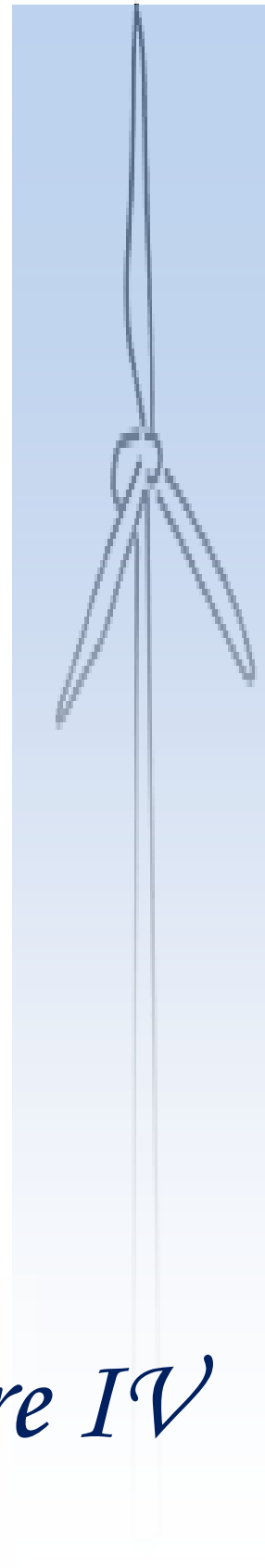
Figure. III.12 Courbe de la couple avec zoom

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En 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. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

*Commande
des puissances
active
et
réactive
de la MADA*

Chapitre IV



IV.1 Introduction

Il a été montré dans le premier chapitre que l'utilité de la MADA est de permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionnement génératrice.

IV.2 Commande vectorielle de la MADA

Le contrôle vectoriel permet de modéliser la machine asynchrone 'MADA' comme une machine à courant continu, c'est-à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée figure. IV.1, où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit qui fournit le couple électromagnétique. A cet effet, il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple. La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d,q) , repère tournant biphasé orienté sur φ_r (flux rotorique) ou sur φ_s (flux statorique) et un type de commande qui permettent de découpler le couple et le flux. Le découplage peut être réalisé par orientation du flux **statorique** ou du flux **d'entrefer** ou du flux **rotorique**.

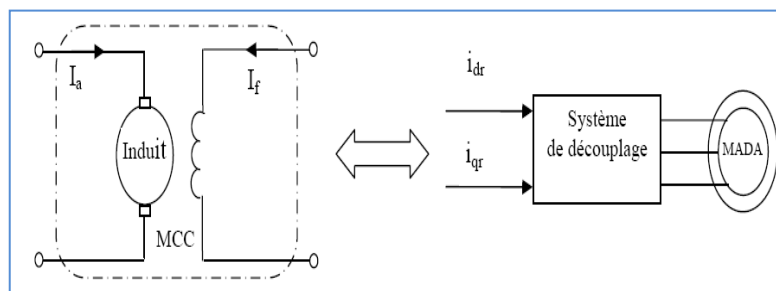


Figure. IV.1 Commande d'une MCC et commande vectorielle d'une MADA

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d,q) lié au champ tournant

On a donc:

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad \& \quad \varphi_{sq} = 0$$

Les équations (III.7) et (III.9) deviennent:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} = \varphi_s \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Si l'on néglige la résistance du stator ' R_s ', les tensions statoriques V_{sd} , V_{sq} sont:

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\varphi_{sd}}{dt} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_{sd} = V_s \end{cases} \quad (IV.3)$$

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (IV.4)$$

L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure. IV.2

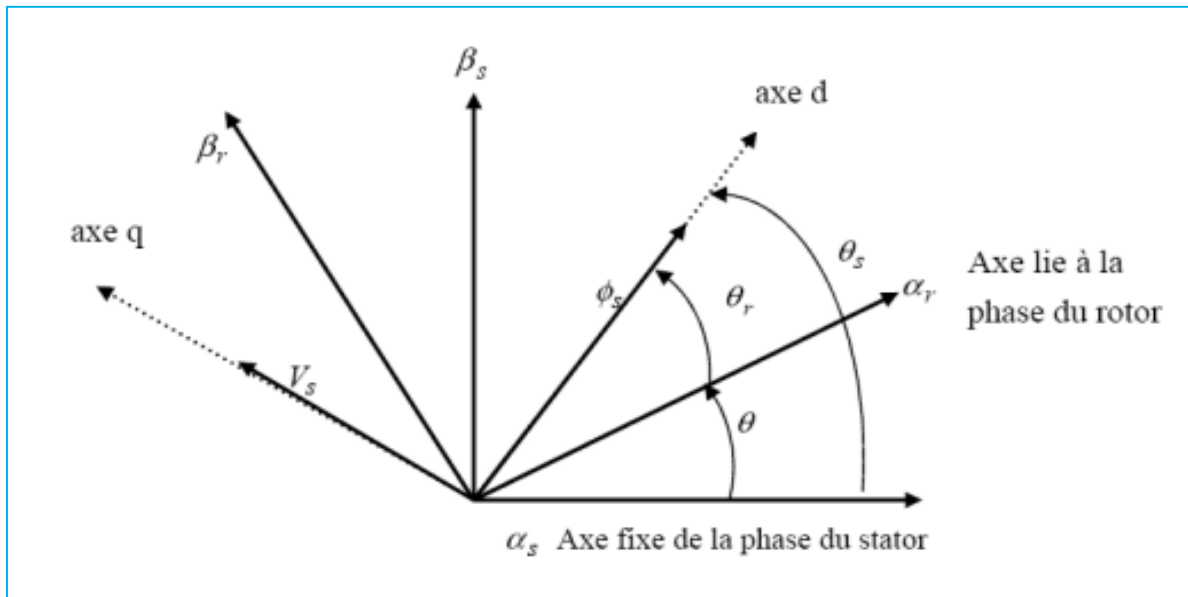


Figure. IV.2 Orientation de la tension et de flux statorique

À partir de système des équations (IV.2), on obtient les expressions suivantes

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive deviennent alors :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad (IV.6)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.5) et la valeur de φ_s de l'équation (IV.4) dans l'équation (IV.6), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (IV.7)$$

l'équation (III.16) de couple devient alors:

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} \varphi_s I_{rq} \quad (IV.8)$$

Il ressort de l'expression (IV.7) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. La puissance active au stator produite par la machine est contrôlée par la composante I_{rq} . Si la tension et la fréquence sont imposées par le réseau, la puissance réactive peut être contrôlée par la composante I_{rd} et éventuellement contrôlée à zéro pour obtenir un facteur de puissance unitaire au stator.

En remplaçant (IV.2) dans les expressions des tensions rotoriques dans le système d'équations (IV.1) on a: avec $g\omega_s = (\omega_s - \omega)$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} (L_r I_{rd} + M I_{sd}) - g\omega_s (L_r I_{rq} + M I_{sq}) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} (L_r I_{rq} + M I_{sq}) + g\omega_s (L_r I_{rd} + M I_{sd}) \end{cases} \quad (IV.9)$$

En remplace les valeurs du courant de l'équation (IV.5) dans (IV.9) pour obtenir la relation suivant :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g\omega_s \frac{M\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.10)$$

Après la transformation de la place des équations (IV.10) déviennentt:

$$\begin{cases} V_{rd} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s)I_{rd} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rq} \\ V_{rq} = (R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})s)I_{rq} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rd} + g\omega_s \frac{M\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.11)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rd} + g\omega_s \frac{M\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (IV.12)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

IV.3 Schéma bloc réduit de la MADA

En examinant les équations (IV.7) et (IV.11), on peut établir le schéma bloc de la figure. IV.3 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives réactives statoriques.

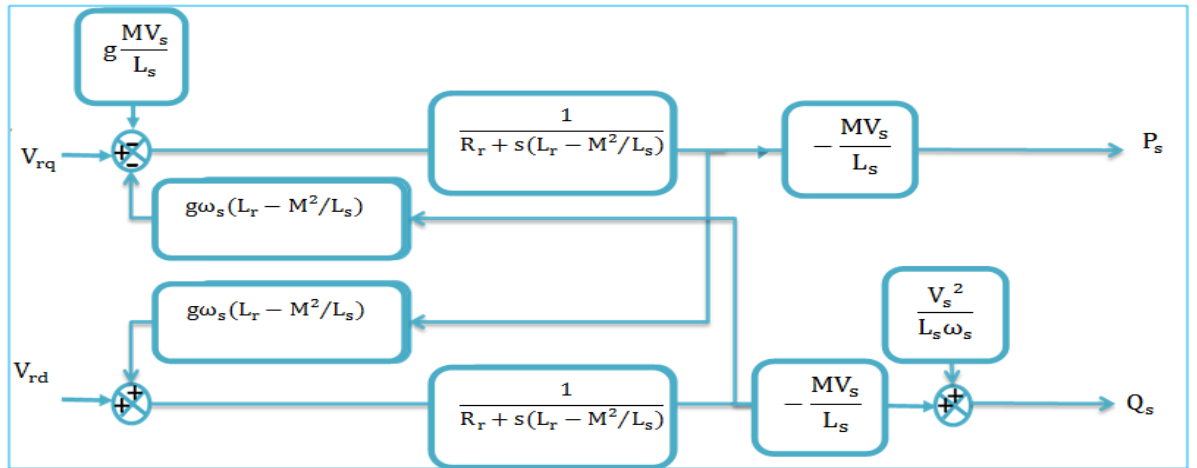


Figure. IV.3 : Schéma bloc de la MADA sous les contraintes du flux et de la tension orientés

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

IV.4 Types de commande

Il apparait deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine, qui sont :

IV.4.1. Commande directe

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives, les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. Ce principe de commande est présenté dans le schéma suivant figure. IV.4

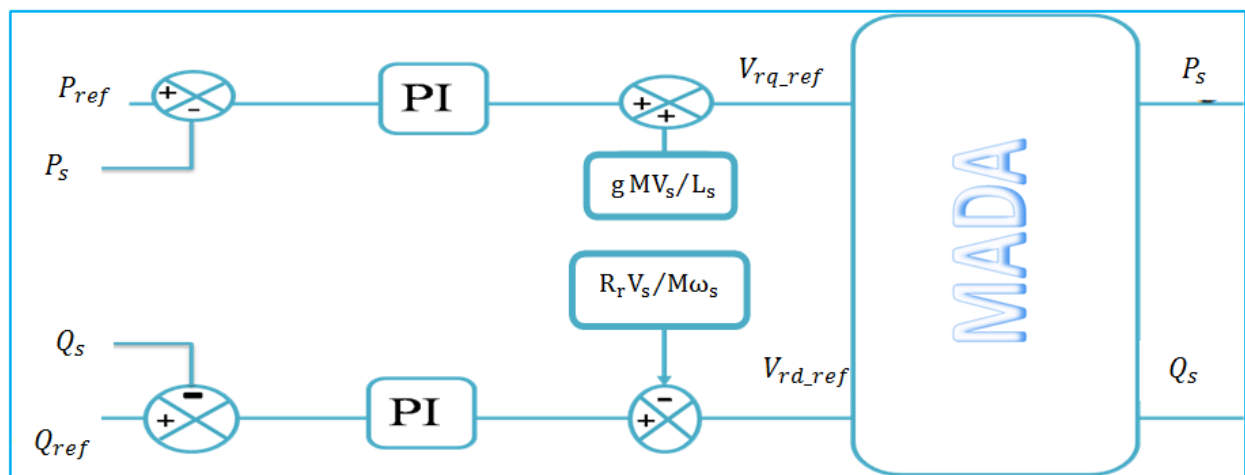


Figure. IV.4 Schéma de principe de la commande directe

IV.4.1.1.Synthèse des régulateurs

Pour réaliser la commande bouclée, on utilise des régulateurs classiques de type PI. Ce type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à **l'action intégrale** tandis que la rapidité de la réponse est établie par **l'action proportionnelle**

Le schéma de la figure. IV.5. montre une partie de notre système bouclé 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. IV.4.

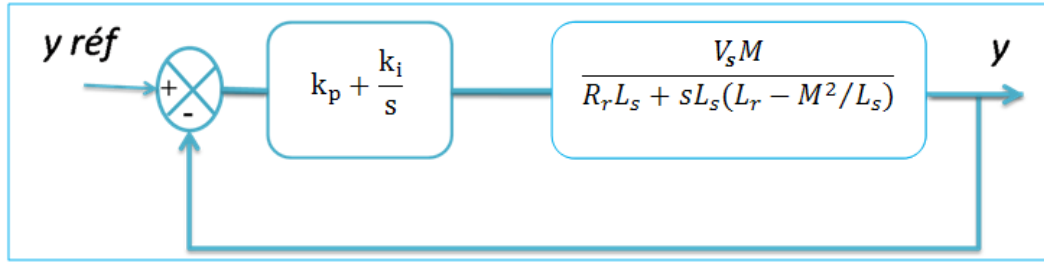


Figure. IV.5 Schéma bloc d'un système régulé par un PI

La fonction de transfert en boucle ouverte (*FTBO*) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{V_s M}{L_s (L_r - M^2/L_s)}}{s + \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}}$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_r}{(L_r - M^2/L_s)}$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F_o(t) = \frac{\frac{V_s M}{L_s (L_r - M^2/L_s)}}{\frac{s}{k_p}}$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps 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 performant.

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$FTBF = \frac{F_o(t)}{1 + F_o(t)} = \frac{1}{1 + \tau_r s} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s (L_r - M^2/L_s)}{V_s M}$$

τ_r est le temps de réponse du système, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer 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.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r L_s (L_r - M^2/L_s)} \quad ; \quad k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s M}$$

IV.4.2. Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la MADA.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques [BOY_06].

IV.4.2.1. Commande indirecte en boucle ouverte

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courants rotoriques sans aucun retour au système, en imposant les tensions de références V_{rd} et V_{rq} qui conviennent. De ce fait, la commande par boucle interne qui contrôle le courant I_r est alors appliquée à la MADA pour des raisons de sécurité de fonctionnement. En outre, la commande indirecte sans bouclage de puissance (en boucle ouverte) permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} en boucle fermée et les puissances P_s et Q_s en boucle ouverte. Le schéma de cette commande est illustré sur la figure. IV.6.

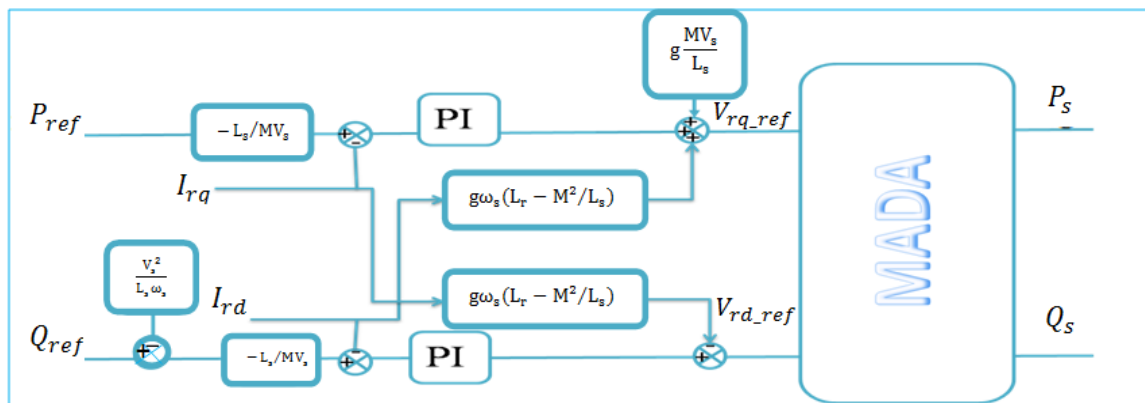


Figure. IV.6 Schéma de la commande indirecte en boucle ouverte

IV.4.2.2. Commande indirecte en boucle fermée

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure. IV.7.

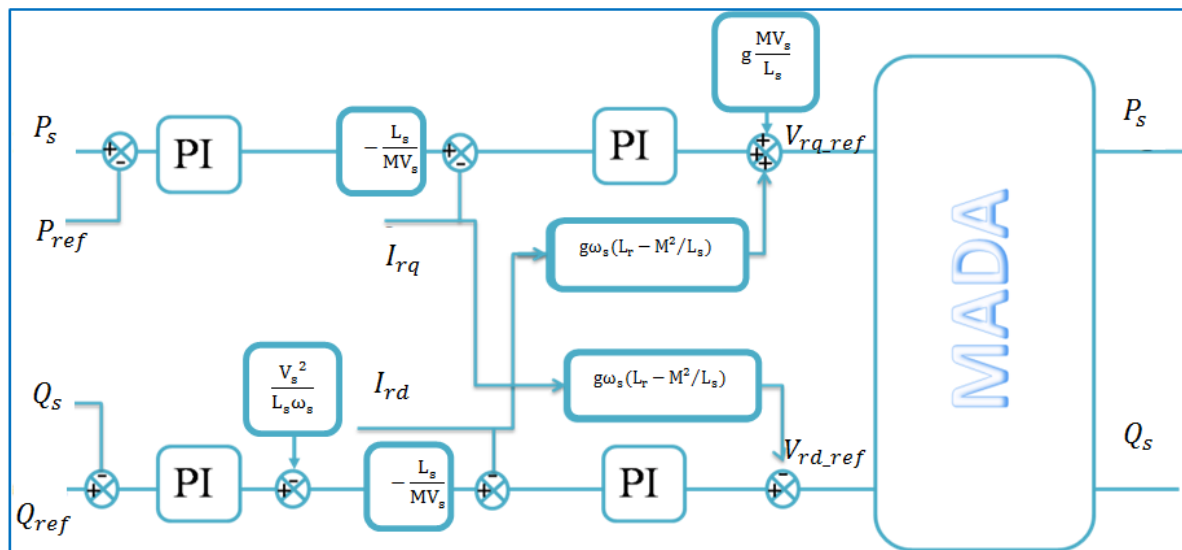


Figure. IV.7 Schéma de la commande indirecte en boucle fermée

Les gains des correcteur dans la commande indirect en boucle (ouverte & fermée) sont calculés de la même manière qu'à section "IV.4.1.1".

IV.5 Convertisseur MLI

Le rotor de la MADA est alimenté par une tension continue à travers un onduleur de tension qui est supposée constante, la tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

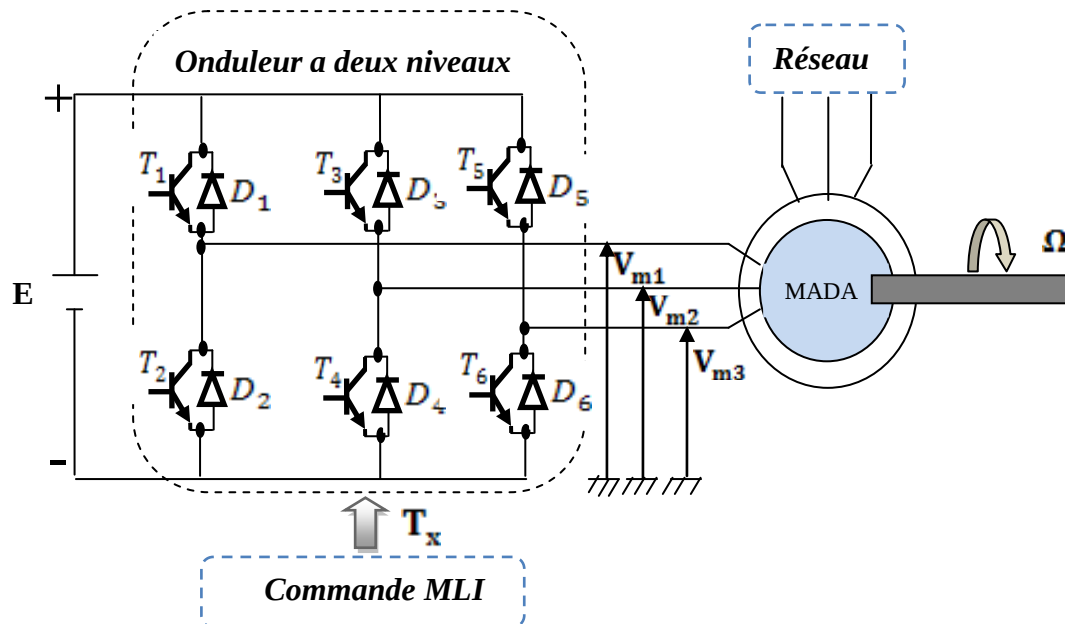


Figure. IV.8 Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur ML

IV.5.1. Onduleur a deux niveaux

L'onduleur est un convertisseur d'énergie permettant d'onduler la tension du bus continu et la fournir au bobinage du rotor. La tension continue est considérée constante, elle est égale à 381V. Cette hypothèse nous permet de faciliter la commande du convertisseur. Ainsi la bidirectionnalité de la puissance entre le rotor et le réseau est possible à travers un niveau de tension du bus continu supérieur à la valeur crête de la tension ondulée. Toujours par soucis de simplification, l'onduleur utilisé est à deux niveaux Figure. IV.9

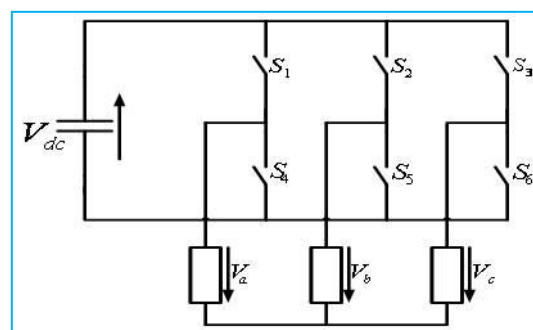


Figure. IV.9 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :
 $S_a=0$ Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;
 $S_a=1$ Si S1 est fermé et S4 est ouvert.
- Branche2 :
 $S_b=0$ Si S2 est ouvert et S5 est fermé;
 $S_b=1$ Si S2 est fermé et S5 est ouvert.
- Branche3 :
 $S_c=0$ Si S3 est ouvert et S6 est fermé;
 $S_c=1$ Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases}$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases}$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

IV.5.2. Stratégie de commande MLI

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulosinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance Figure. IV.10.

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- 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 :

$$m = \frac{f_p}{f}$$

- 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) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p}$$

IV.5.3. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangulosinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes

❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{ref} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases}$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases}$$

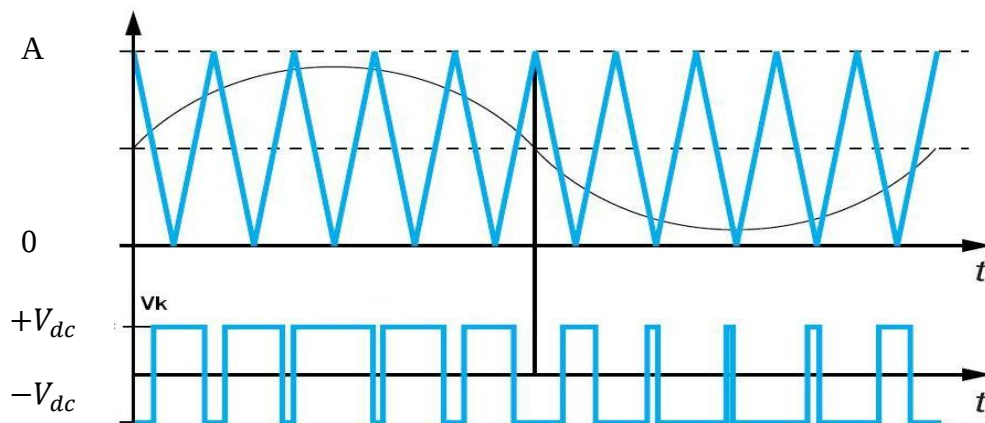


Figure. IV.10 Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse

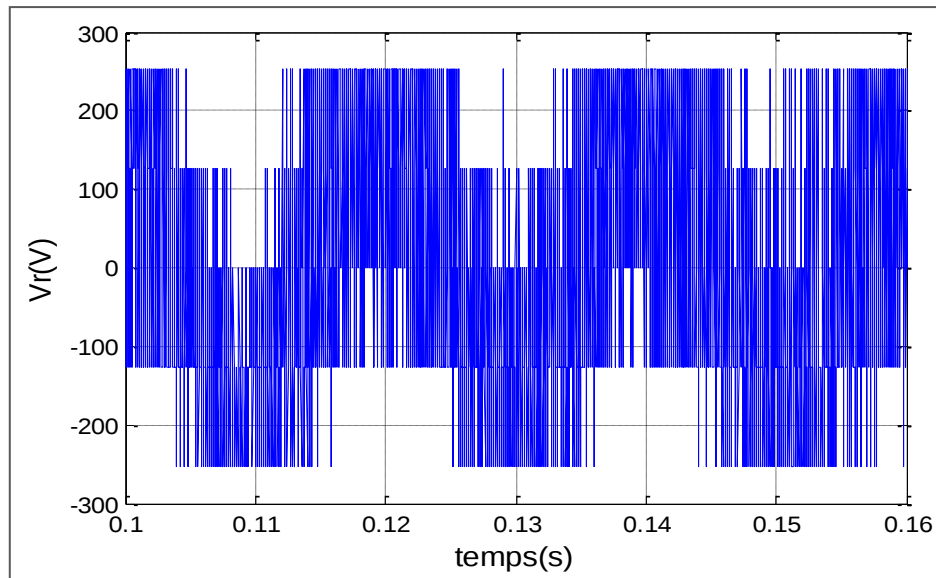


Figure IV.11 Tensions rotorique à travers l'onduleur (La tensions ondulée)

IV.6 Schéma de simulation

La figure (IV.11) représente la structure de la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la MADA avec onduleur alimentant le rotor.

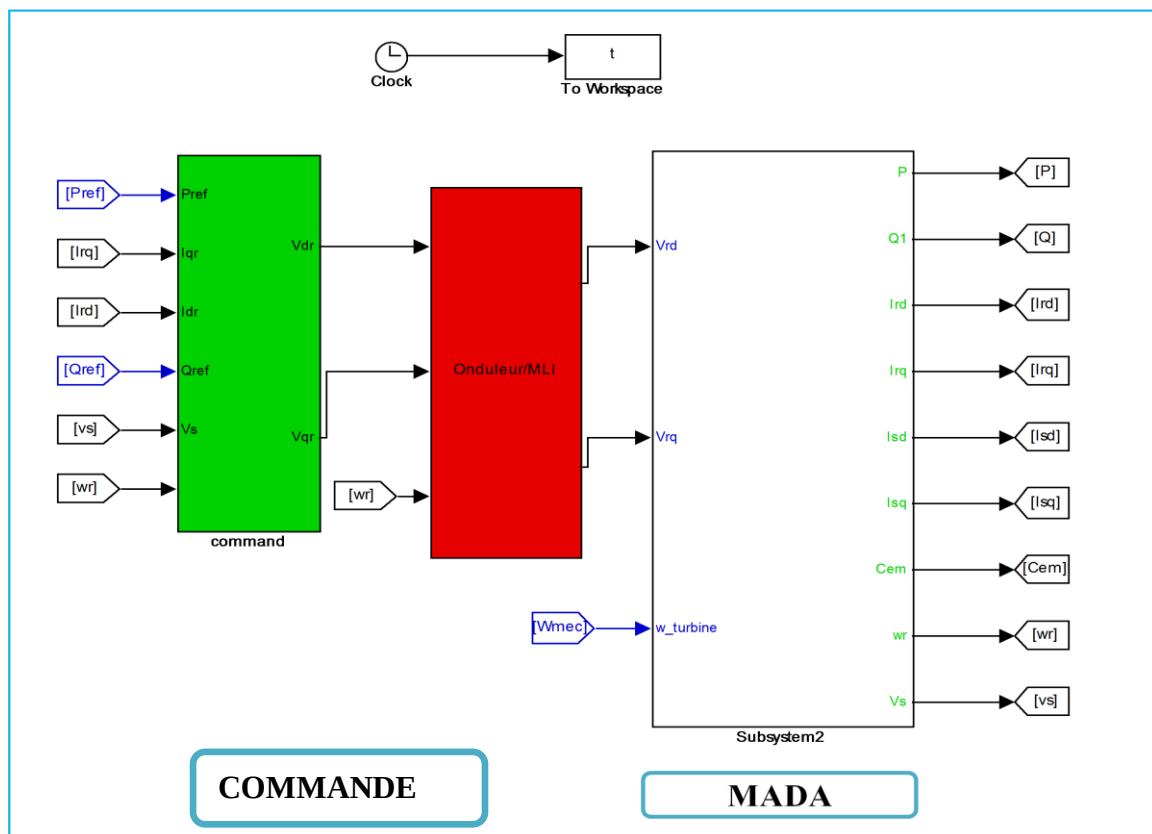


Figure. IV.12 Schéma bloc de la commande vectorielle de la MADA avec onduleur

IV.7 Résultats de la simulation

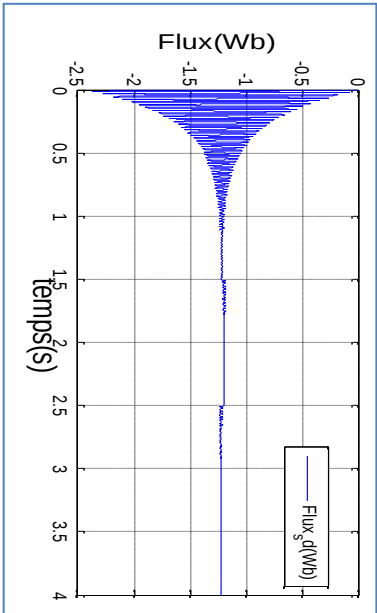
Les figures suivantes représentent les différentes courbes obtenues par la commande des puissances active et réactive générées au niveau du stator de la machine asynchrone double alimentée selon deux cas : sans l'association d'un onduleur au coté rotorique et avec l'association de ce dernier au coté rotorique.

La simulation de cette machine à **4 kW** (paramètres donnés en Annexe), a été implantée sous MATLAB/SIMULINK

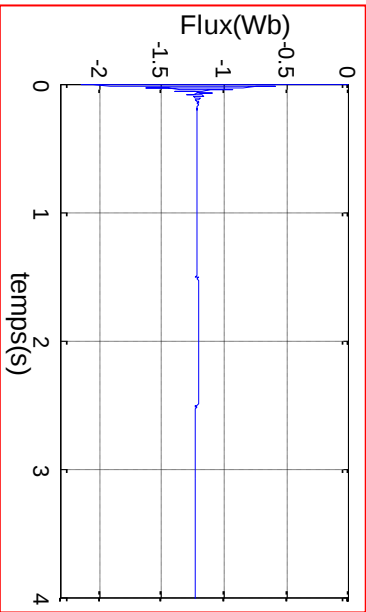
On a procédé aux essais suivant pendant une durée de 4s .Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1455 tr/min

T (s)	P _{ref} (W)	Q _{ref} (VAR)
0 à 0.5	0	0
0.5 à 1.5	-1000	1000
1.5 à 2.5	1000	-1000
2.5 à 4	-2000	0

Direct



Indirecte En Boucle Ouverte



Indirecte En Boucle Fermée

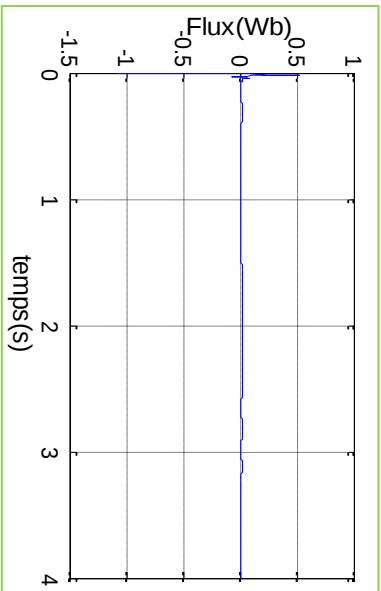
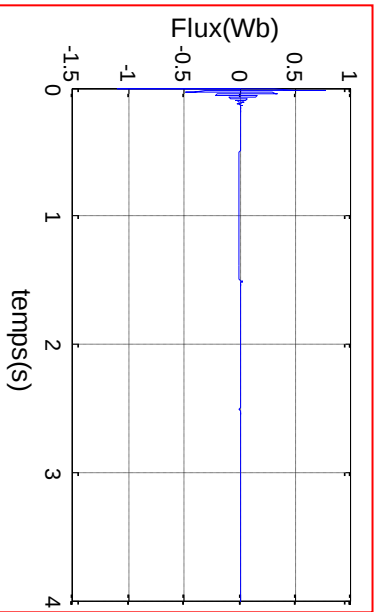
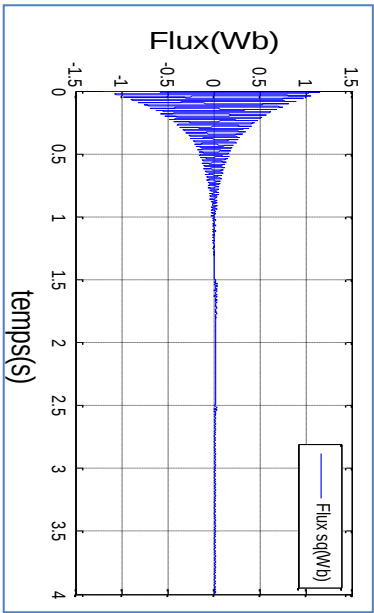
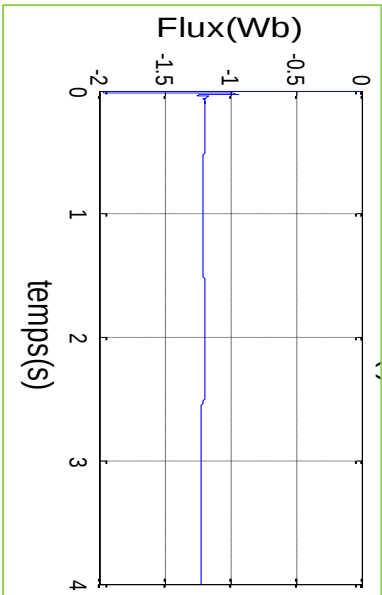
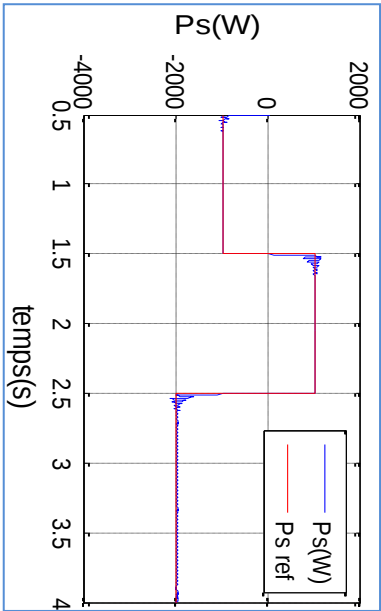
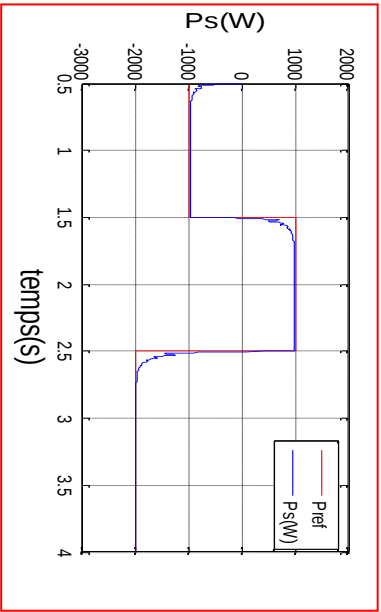


Figure IV.13 : Flux d'orientation rotorique direct et quadrature (d,q) (Sans Onduleur)

Direct



Indirecte En Boucle Ouverte



Indirecte En Boucle Fermée

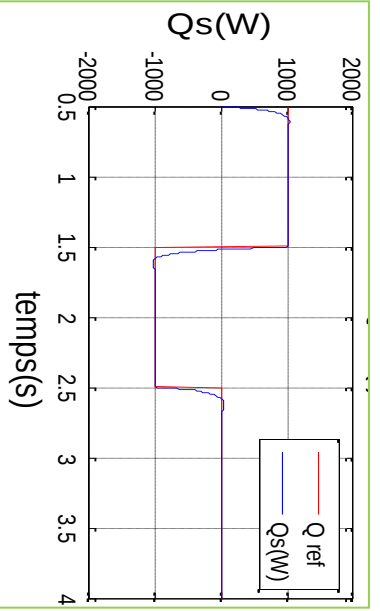
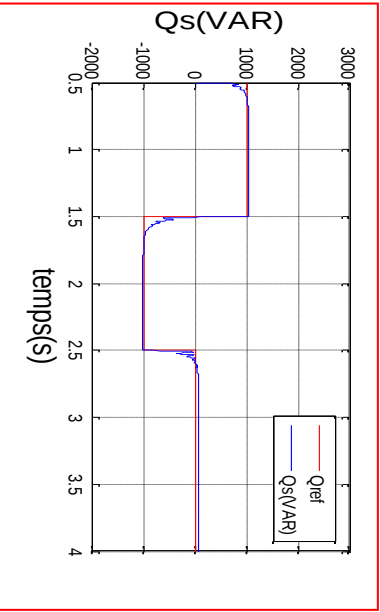
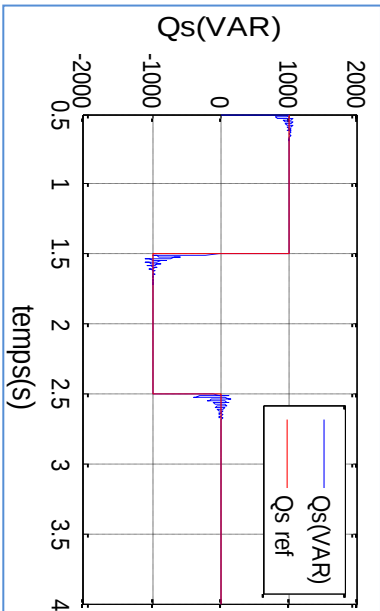
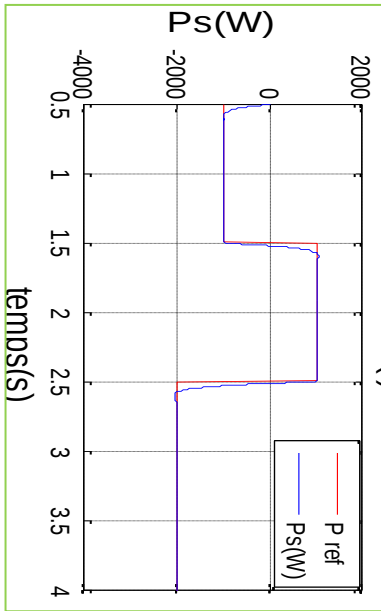
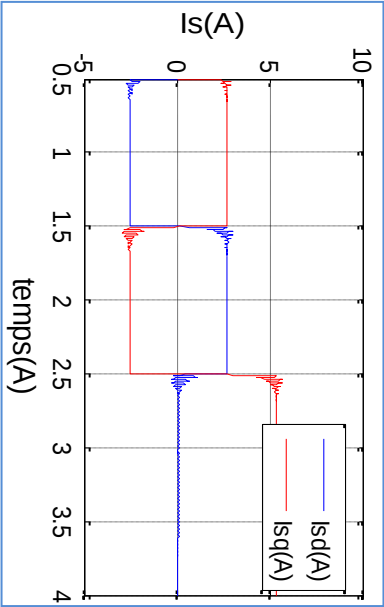
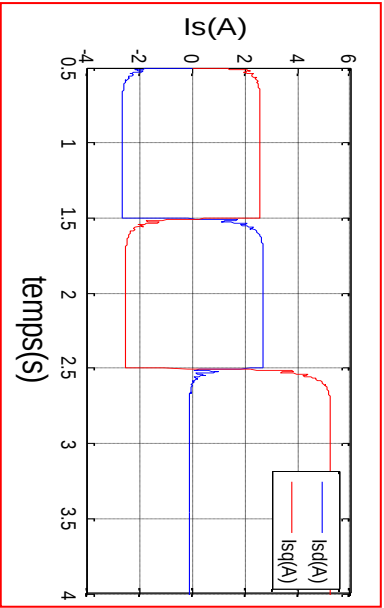


Figure IV. 14: Puissance active et réactive avec sa référence (d,q) (Sans Onduleur)

Direct



Indirecte En Boucle Ouverte



Indirecte En Boucle Fermée

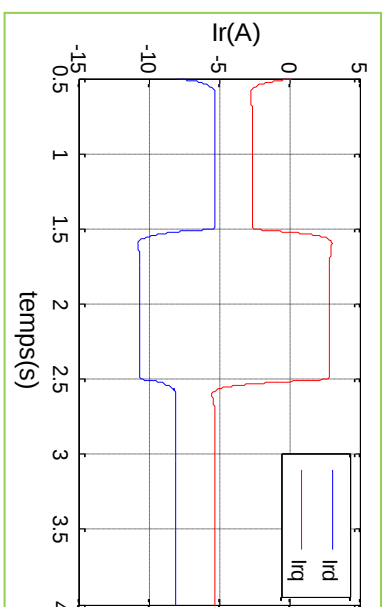
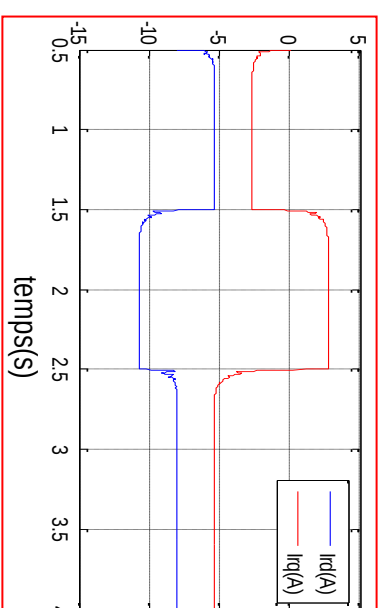
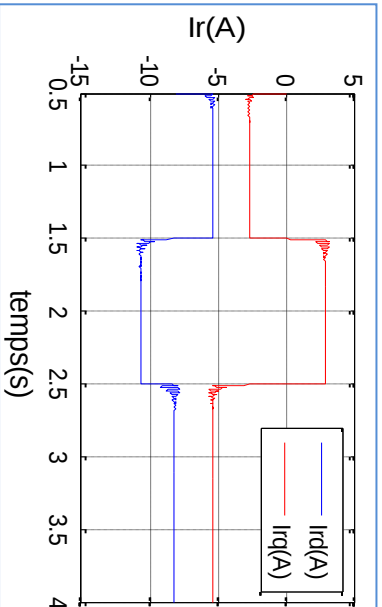
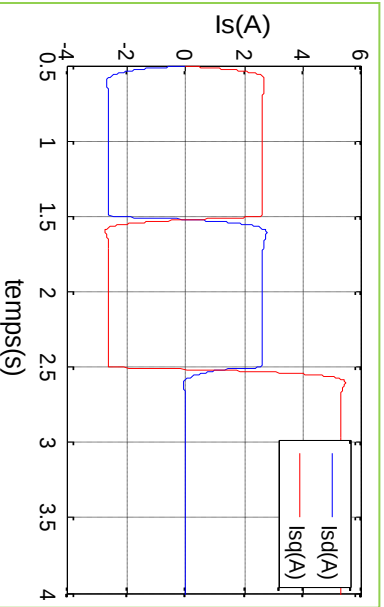
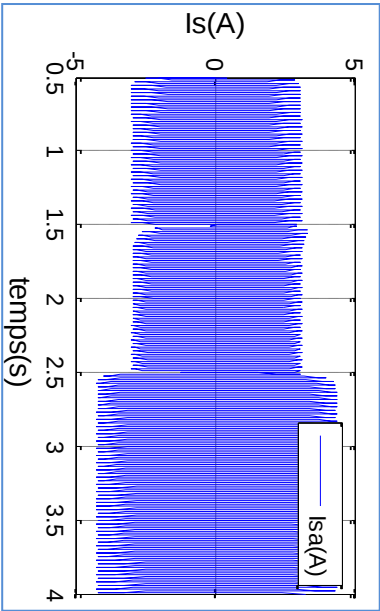
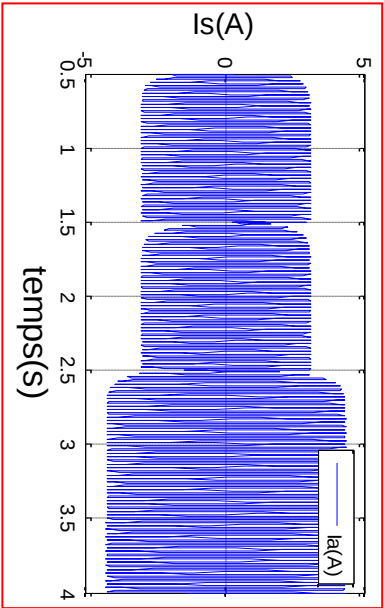


Figure IV. 15 : Courbes de courant statorique et rotorique biphasée (Sans Onduleur)

Direct



Indirecte En Boucle Ouverte



Indirecte En Boucle Fermée

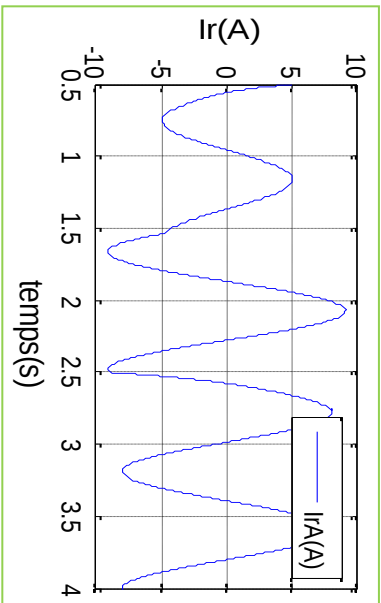
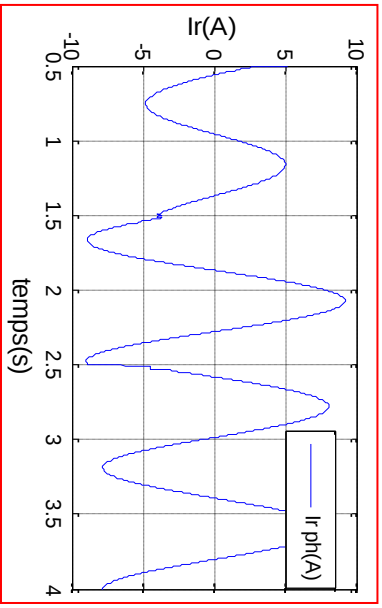
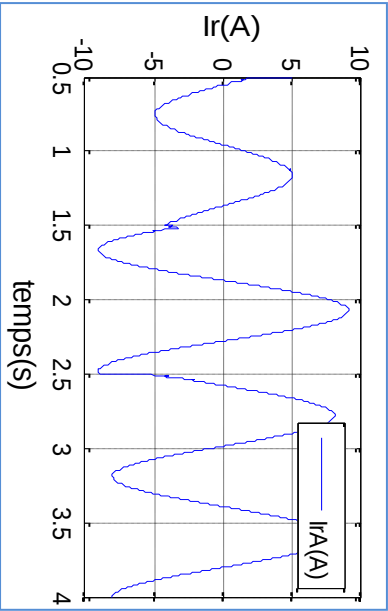
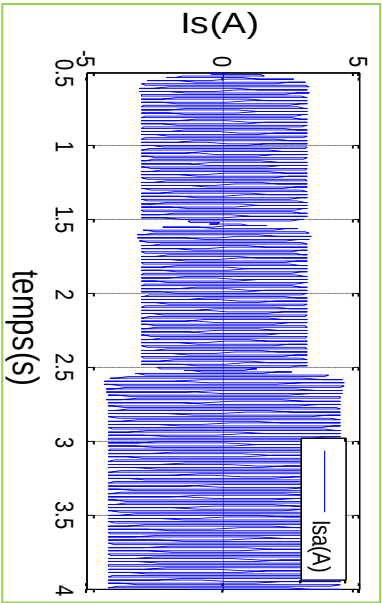


Figure IV. 16 : Courbes de courant statorique et rotorique triphasée (Sans Onduleur)

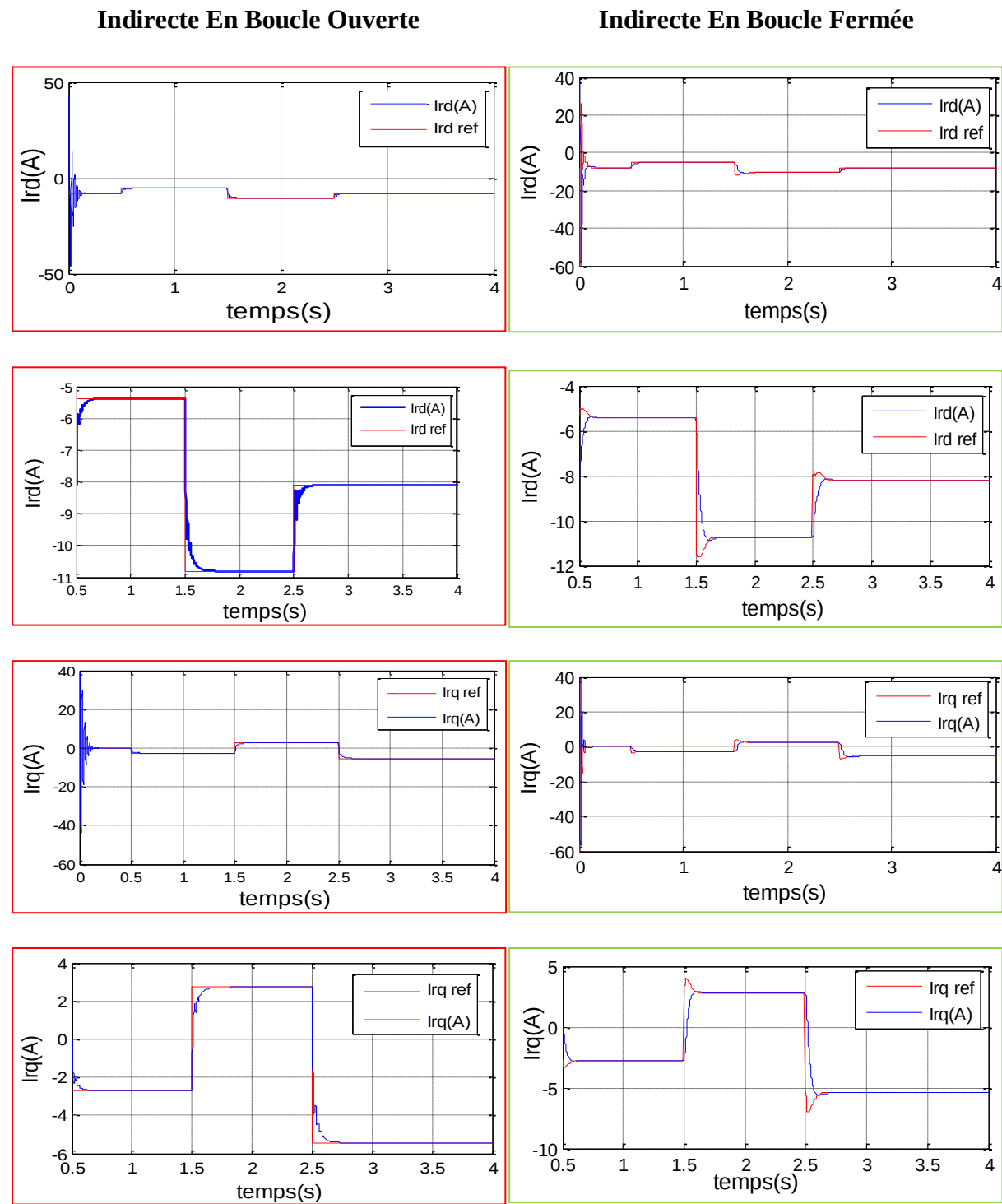
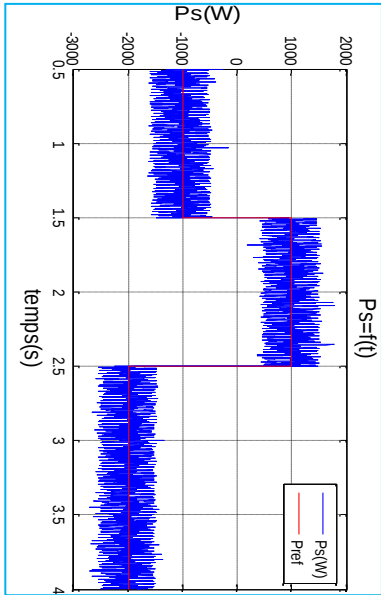


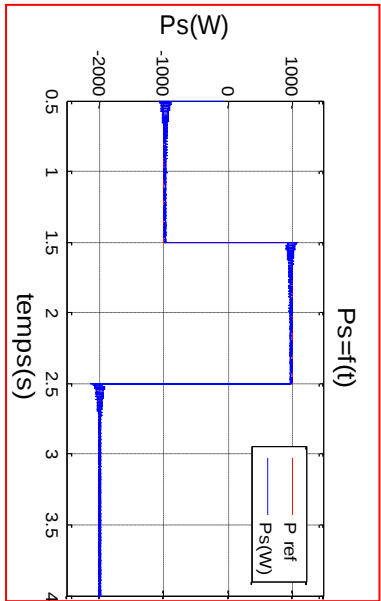
Figure IV.17 Courants rotorique direct et quadrature (d,q) suivi les référence avec le zoom

(Sans Onduleur)

Direct



Indirecte En Boucle Ouverte



Indirecte En Boucle Fermée

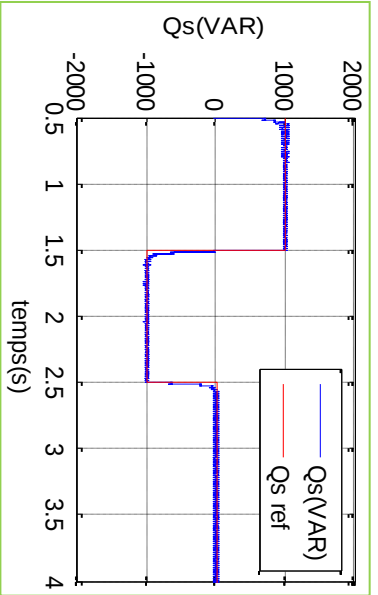
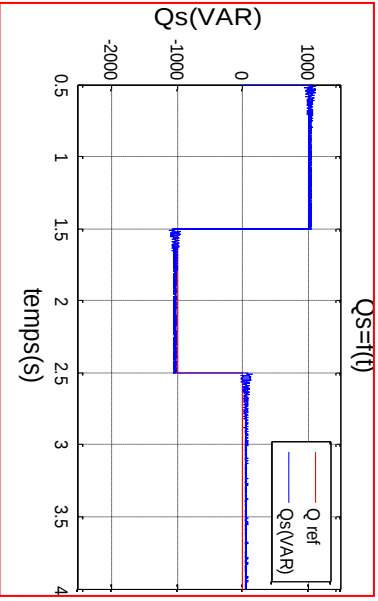
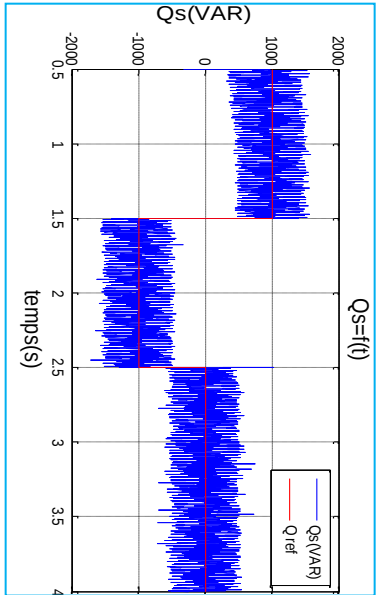
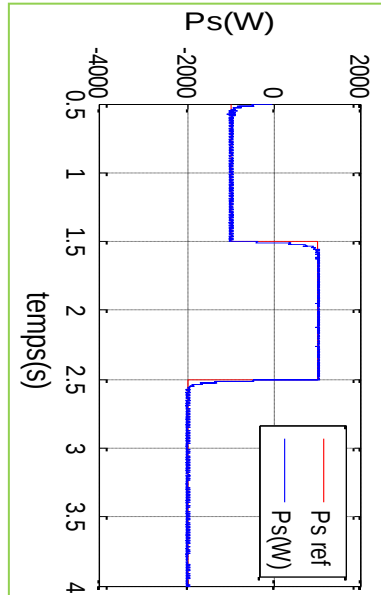


Figure IV. 18: Puissance active et réactive avec sa référence (d,q) (Avec Onduleur)

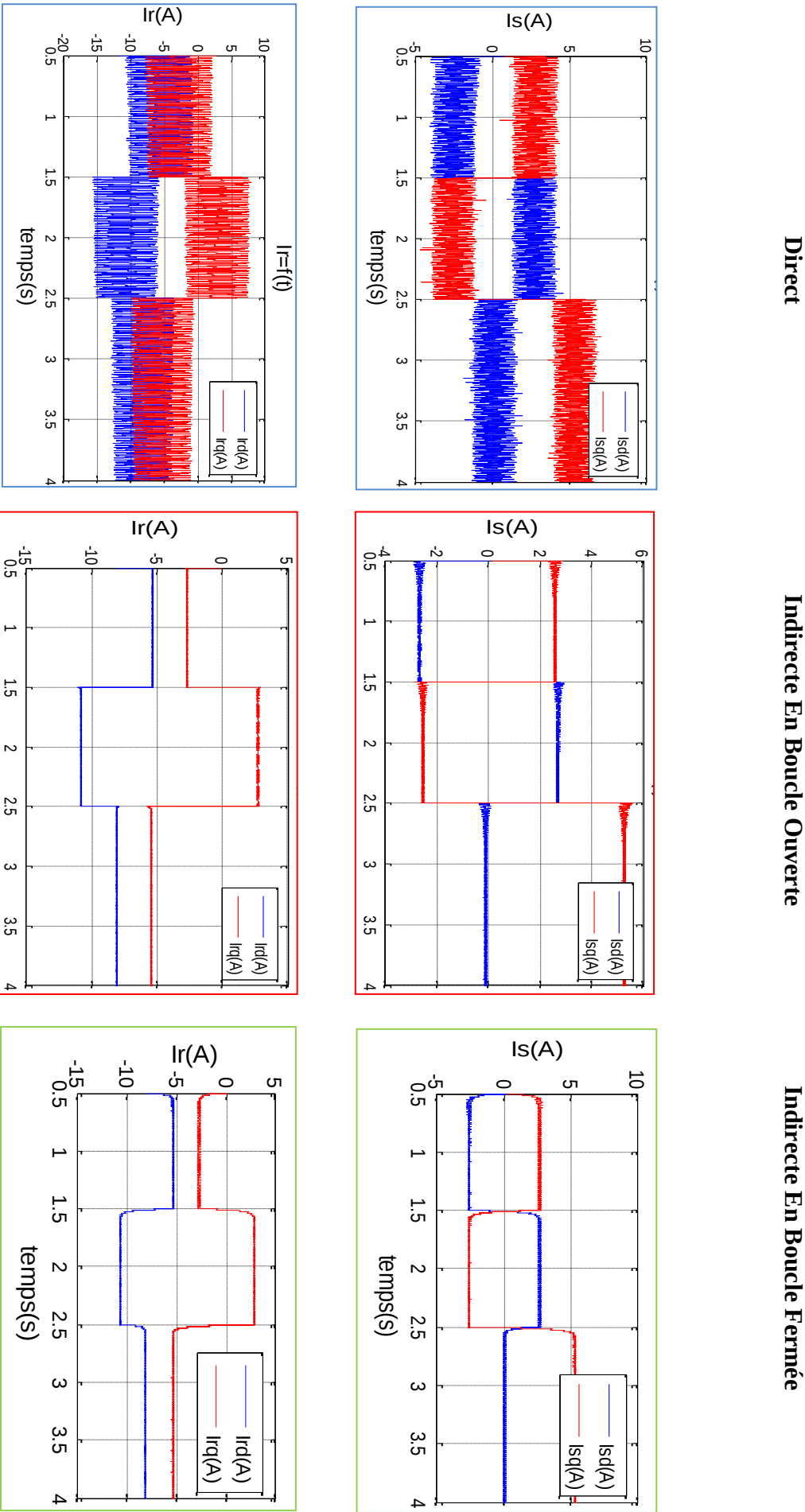
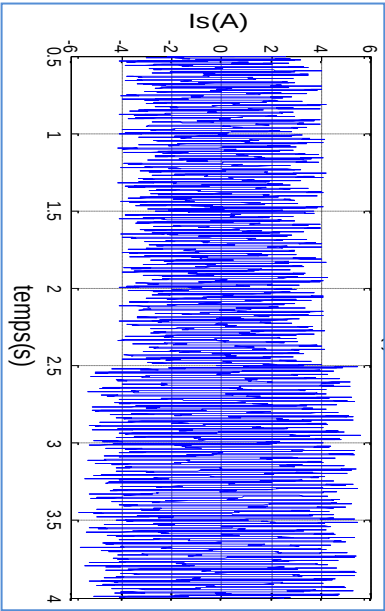
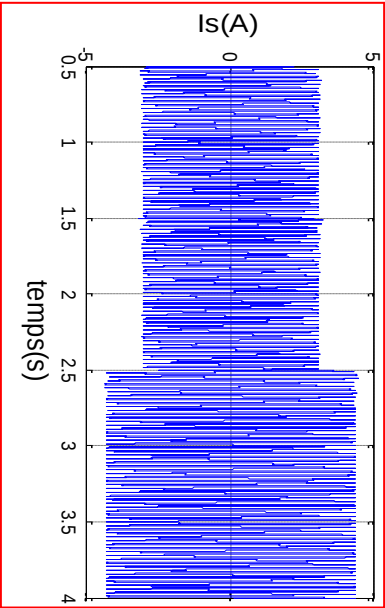


Figure IV. 19 : Courbes de courant statorique et rotorique biphasée (Avec Onduleur)

Direct



Indirecte En Boucle Ouverte



Indirecte En Boucle Fermée

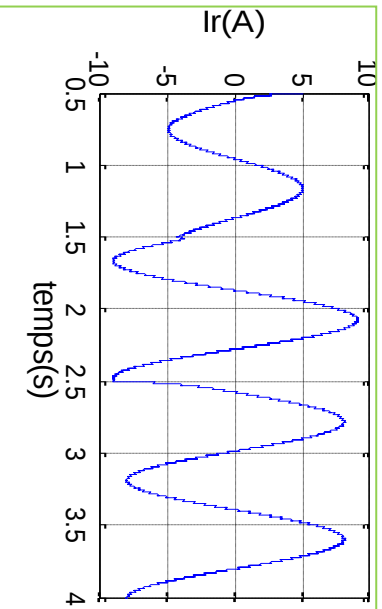
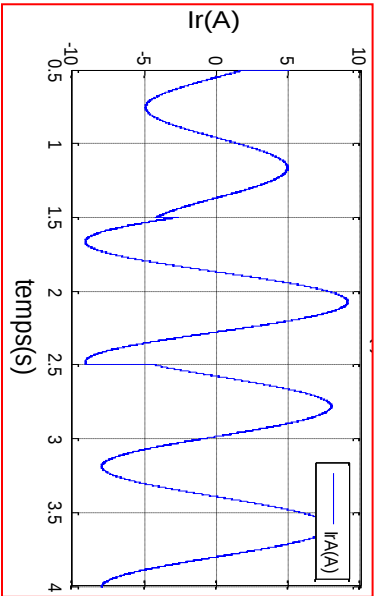
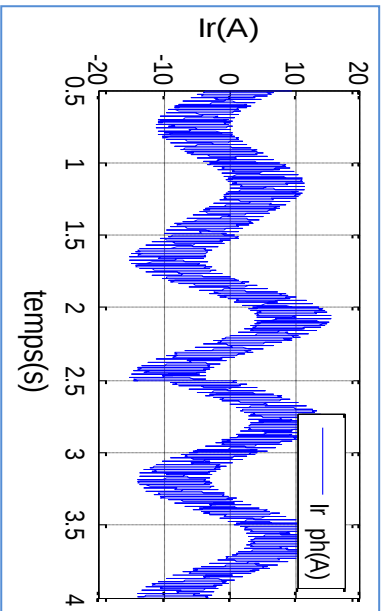
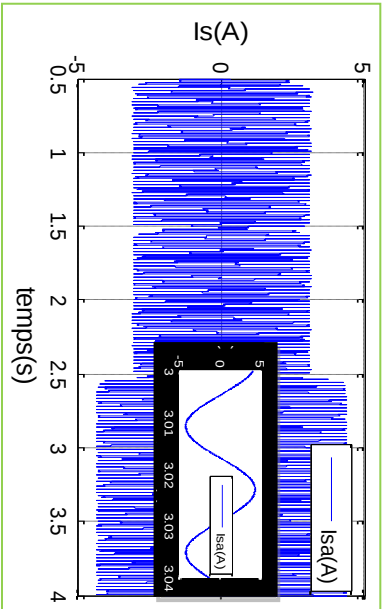


Figure IV. 20 Courbes de courant statorique et rotorique triphasée (Avec Onduleur)

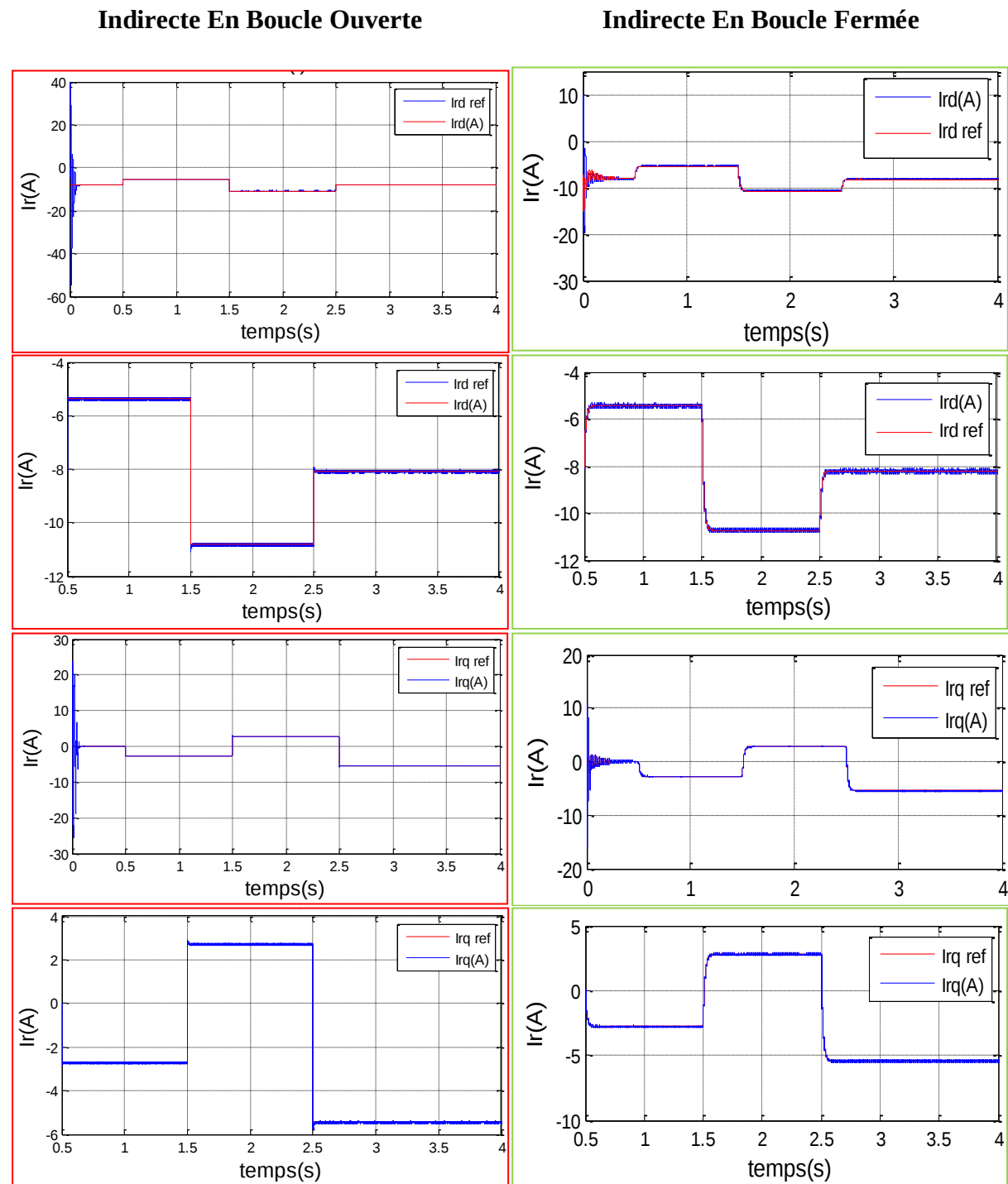


Figure IV.21 Courants rotorique direct et quadrature (d,q) suivi les référence avec le zoom
(Avec Onduleur)

IV.8 Interprétations des Résultats

➤ Figure IV.13 montre 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.

➤ A partir des différentes commandes précédemment réalisées, on va comparer entre eux pour déterminer la configuration la plus adéquate pour une application dans la machine.

Dans le cas de la commande *direct* on constate dans les figures (IV.14) et (IV.18), les puissances suivent leurs références, et on peut remarquer des oscillations qui sont dues à l'effet des variations des valeurs de puissance référence à l'instant 1.5s et 2.5s sur les deux axes (d,q) ou autrement sur P_s et sur Q_s . Par contre, les résultats obtenus par la méthode *indirect boucle ouverte et boucle fermée*, qui sont illustrés dans les figures (IV.14 ; IV.18), sont bien régulés en régime permanent, et les oscillations de forte amplitude en régime transitoire sont réduites.

➤ Les figures (IV.17 et IV.21) montrent que le courant rotorique de la commande *indirect boucle ouverte et boucle fermée*, on constate que les courants rotoriques I_{rd} , I_{rq} suivent leurs références sans dépassement avec faibles oscillations en régime transitoire.

➤ Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances de réglage par des régulateurs PI, dans les deux cas sans et avec onduleur. Ces derniers présentent un bon découplage au réglage des puissances active et réactive et au niveau du stator ou d'autre manière celle du flux et du couple, ainsi qu'un meilleur suivi des courants rotoriques par rapport à leurs références, dont la puissance active et réactive (P_s , Q_s) sont proportionnelles à la composante en quadrature et directe du courant rotorique (I_{rd} et I_{rq}) respectivement.

➤ Les figures (IV.16 et IV.20) représentent le courant statorique et rotorique triphasé d'une phase(A), après le zoom de courant statorique, on constate leur fréquence est 50HZ.

➤ De plus on remarque la présence des oscillations dans les courbes avec onduleur qui sont dues à l'harmonique de la tension (V_{rd} , V_{rq}) . (voir la figure IV.11).

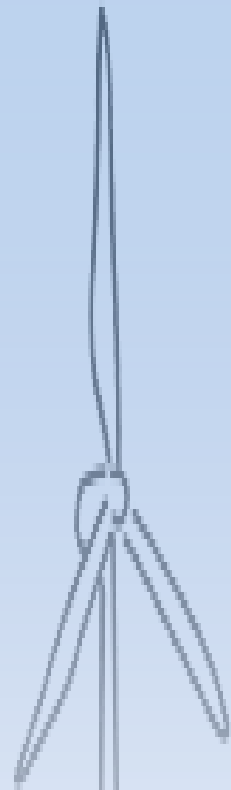
Finalement, on conclut que la commande indirecte en boucle fermée donne de bons résultats.

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique. Ainsi, on a représenté trois modes de contrôle ont été réalisés .Un mode direct dans lequel les puissances sont mesurées et comparées à leurs références. Un autre indirect où les courants rotoriques sont utilisés pour commander les puissances. Un troisième a pour rôle d'améliorer le suivi de consigne de la commande précédente en y ajoutant une boucle de puissance.

A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation qui ils sont obtenu, sans onduleur et avec utilisation un onduleur de tension a deux niveaux.

Intégration de l'aérogénérateur



Chapitre V

V.1.Introduction:

Dans les chapitres précédents, nous avons procédé à la modélisation de la turbine éolienne ainsi que la MADA et ces commandes, Celles-ci ne peuvent pas fonctionner indépendamment et leurs utilités s'avèrent par la complémentarité qu'elles constituent.

On s'intéresse dans ce chapitre à l'association des différentes parties étudiées (Turbine, MADA, et onduleur) qui présente un système éolien global.

V.2.Système de la chaîne globale

L'étude que nous menons comme la dernière étape consiste à intégrer le modèle de la MADA (que nous étudions dans chapitre III et IV) dans un dispositif éolien.

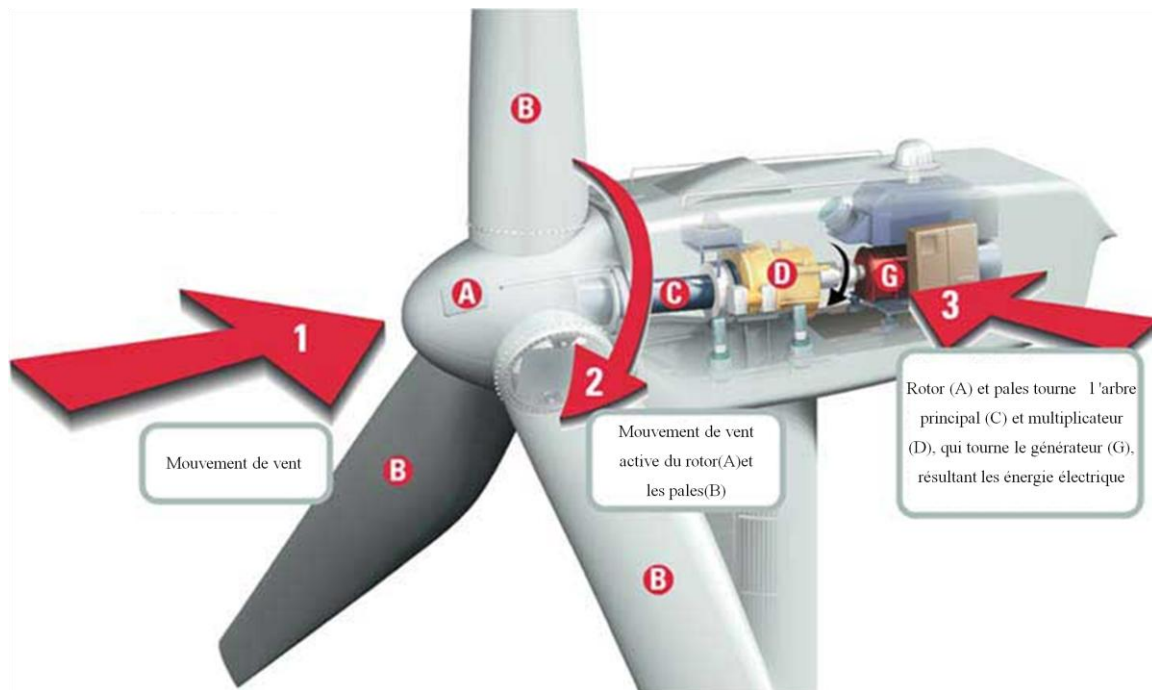


Figure. V.1-a Aérogénérateur

Le modèle globale (figure V.1) contient :

La turbine: Extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique [LAV-05].

Et avec un command, la maximisation de L'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré. Qui correspond une référence de puissance active imposée à la MADA.

La MADA : Transforme la puissance mécanique en puissance électrique

La Charge : On connecte le stator de la MADA à une source de tension triphasée parfaite d'amplitude ($230 * \sqrt{2}$ v) qu'on suppose comme un réseau électrique dans le cas réel (figure V.1-b).

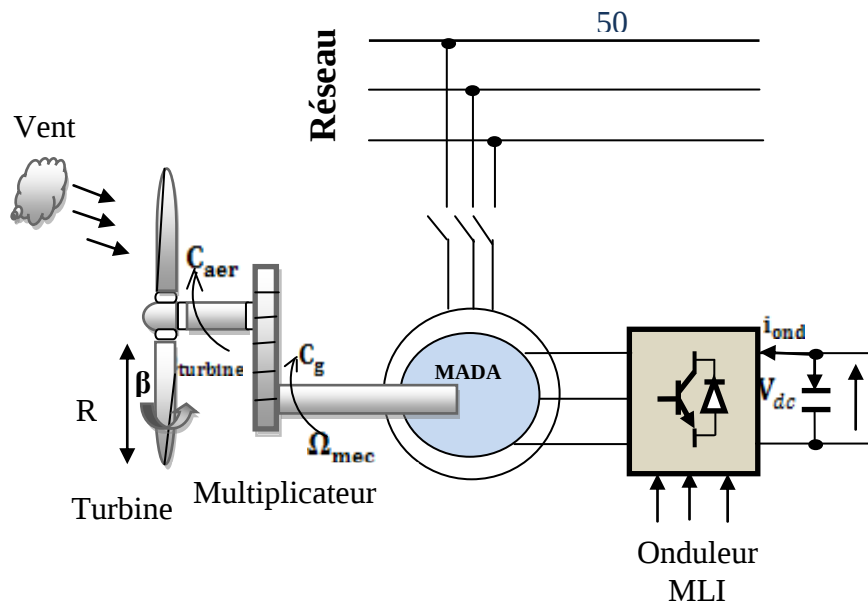


Figure. V.1-b Structure de la chaîne globale

Figure. V.2 Modèle de la chaîne éolienne avec la Command en MATLAB/SIMULINK

V.4. Résultats de Simulation et interprétations :

La simulation est réalisée avec un aérogénérateur à vitesse variable de 4 kW. Ce dernier est modélisé et accouplée à une *MADA* par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse. D'où elle convertit toute la puissance maximale (*M.P.P.T.*), extraite du vent en une puissance électrique injectée au réseau et considérée négativement. Dans le cas de ce travail, on adopte la méthode de l'effet *Stall* qui consiste à caller les pales sur une orientation fixe ($\beta=2^\circ$) en profitant de leur *design* (profil adapté au vent). En effet, un essai en boucle fermée de la *MADA* sans asservissement de vitesse a été réalisé ($C_e = C_r$), afin de connaître, pour chaque vitesse de vent, quelle est la référence de puissance active à imposer à la *MADA*, pour que le coefficient de puissance soit toujours maximal avec λ optimal. [MEK_04]

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus par simulation avec les mêmes paramètres de la turbine et génératrice (voir annexe) utilisée dans les chapitre précédant $V_s=220$ V.

A. Profil du vent :

La figure (V.3) présente le profil du vent supposé et appliqué à la turbine éolienne.

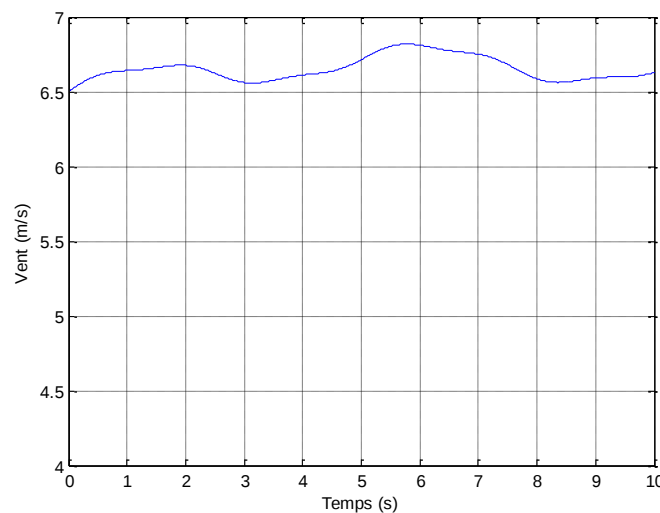


Figure. V.3 Profil du vent appliqué

B. Coefficient de puissance:

A travers l'évolution du coefficient de puissance (Figures V.4), nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique.

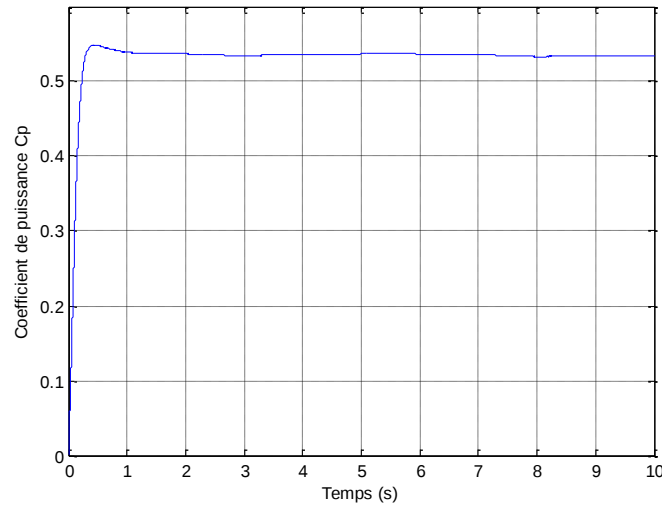


Figure. V.4 Coefficient de puissance de la turbine

C. Vitesse de rotation de la MADA:

En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine, il est constaté que celle-ci reste dans des proportions acceptables (Figures V.5). Car, mis à part la période de démarrage.

Les variations de la vitesse de la génératrice sont adaptées à la variation de la vitesse du vent, Figures (V.5). [MEK_04]

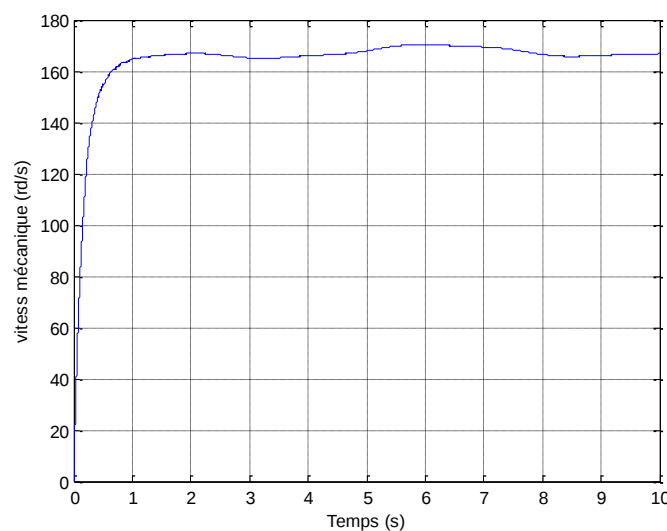


Figure. V.5 Vitesse de rotor (rd/s)

D. Puissance active :

À partir des résultats illustrés sur la figure. V.6, on constate que la courbe de la puissance mécanique ($MPPT$) de la turbine est bien suivie par celle de la puissance électrique produite par la *MADA*. Cette puissance reflète également la variation de la vitesse du vent, ce qui est confirmé par le zoom ainsi donné présentant la poursuite de la puissance de la *MADA* à la puissance de référence imposée par les variations du vent. [MEK_04]

Toutes les erreurs (Figure. V.7) entre la puissance mesurée et sa référence n'est pas nulle. Celle-ci devient plus importante lors des régimes transitoires avec la variation de la vitesse du vent. Ce phénomène est dû à l'inertie importante de la turbine qui empêche un suivi instantané de la consigne.

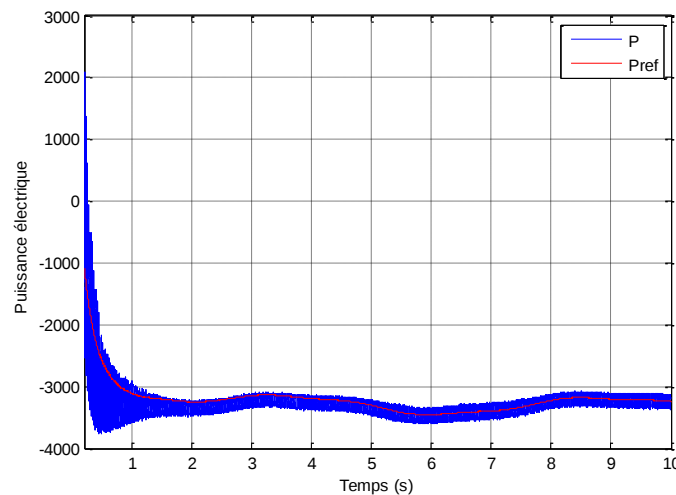


Figure. V.6 Puissance active statorique et sa référence.

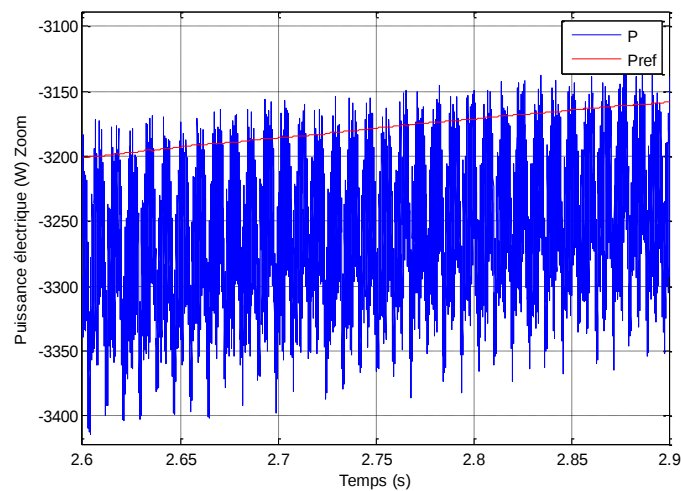


Figure. V.7 Erreur sur le suivie de la consigne de la puissance statorique.

E. Puissance réactive :

La figure (V.8) représente la puissance réactive injectée au réseau, avec la référence de la puissance réactive fixée à zéro [MEK_04].

Quant à la puissance réactive, elle demeure proche du zéro qui a pour conséquence la faible incidence de la machine sur la qualité du réseau (un facteur de puissance unitaire au stator).

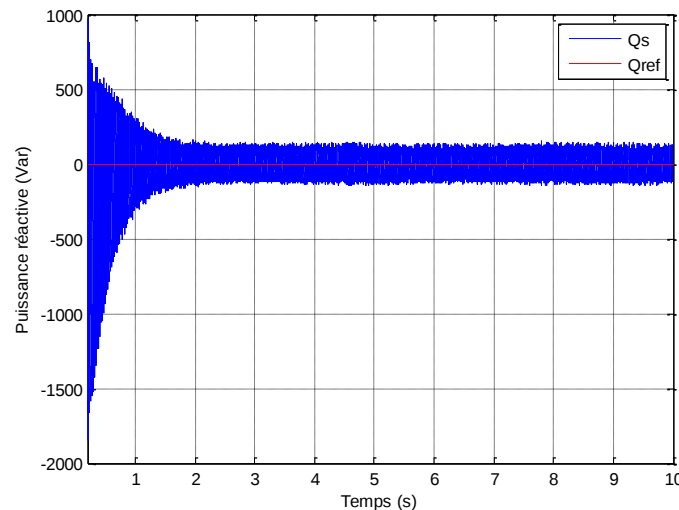


Figure. V.8 Puissance réactive généré par MADA

F. Les courants :

Les courants statorique et rotorique (figure (V.9) et (V.10)) ont pris leurs formes sinusoïdales et sont aussi adaptés à la variation de la vitesse de rotor, et la fréquence rotorique dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

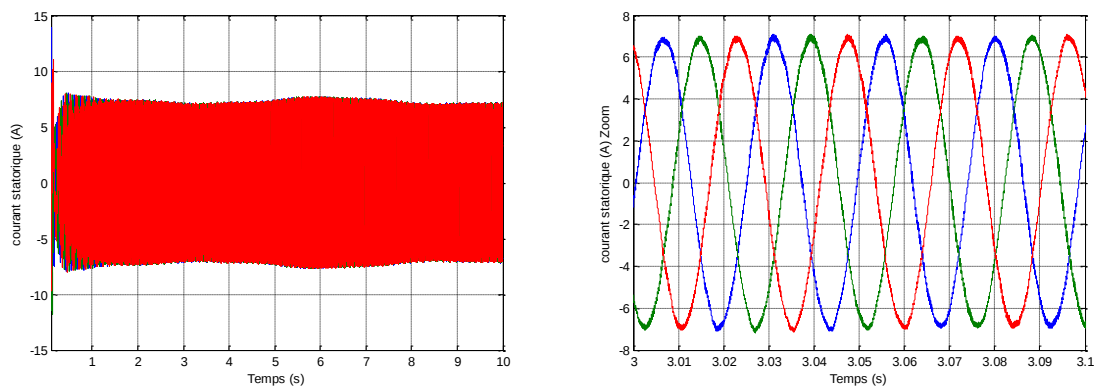


Figure. V.9 Courant statorique avec Zoom

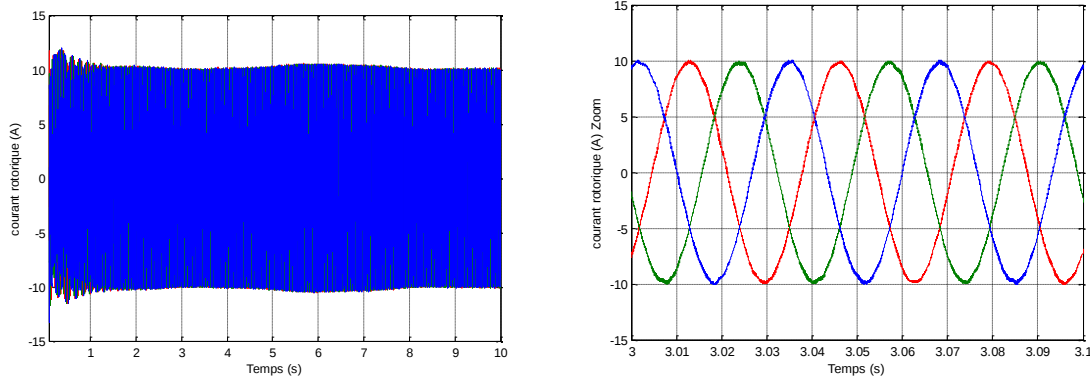


Figure. V.10 Courant rotorique avec Zoom

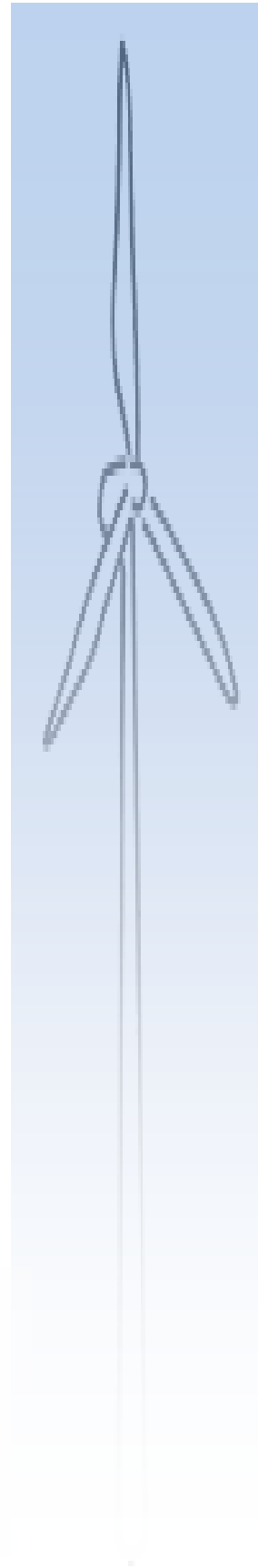
V.5.Conclusion

En dernière phase de l'étude on intégrera le modèle de la *MADA* (que nous avons étudié au chapitre III et IV), dans un dispositif éolien, Ceci nous a permis d'instaurer un modèle global composé de l'aérogénérateur, d'où la puissance débitée par le générateur éolien est proportionnelle au cube de la vitesse du vent (les équations sont décrites au Chapitre II). Suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne (Figure V.6), cette caractéristique montre que pour chaque vitesse du vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale, à vitesse du vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la *MADA*.

En effet, pour chaque vitesse de vent correspond une référence de puissance active imposée à la *MADA*.

Conclusion

générale



Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif la modélisation de différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne, et l'étude de différents systèmes de contrôle de la génératrice.

Pour ce faire, on a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées, notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée au le rotor, par un convertisseur MLI.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Néanmoins, il en demeure quelques problèmes notamment liés aux contacts mécaniques (bagues). Ainsi la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituée de génératrice asynchrone à double alimentation car elle apporte non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permet un transfert optimal de la puissance au réseau.

Afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau on a utilisée Une commande vectorielle. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI et testé et comparé ses performances en suivi de consigne, face aux perturbations et aux variations de paramètres. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et, même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.

Difficultés rencontrées

Au cours de notre travail nous n'avons pas échappés à quelques problèmes :

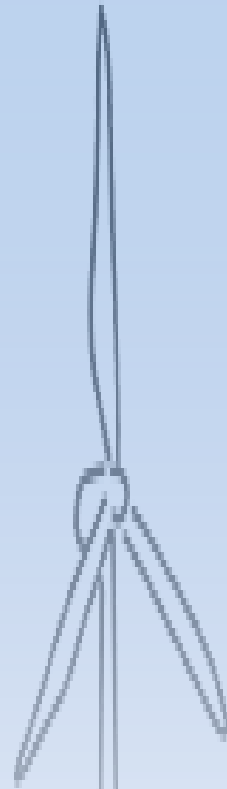
Le choix des paramètres du correcteur de type proportionnel-intégral a été fait par plusieurs essais, ceci réside dans le fait de chercher les paramètres qui donnent le réglage le plus optimal, tout en simulant pour avoir réponse plus rapide sans qu'il y ait de dépassement.

Suggestions et perspectives

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

- Etablissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- Utilisation d'autres types de régulateurs plus performants dans la commande du dispositif.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : Logique floue, réseau de neurones.
- L'étude des perturbations de la production de l'énergie éolienne vis à vis des déséquilibres du réseau.

Liste
de
Bibliographie



[AIM_04] S. EL-AIMANI, «Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2004.

[CAM_03] H. CAMBLONG, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable», thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

[MEK_04] 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», Mémoire de Magistère, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna, Département d'Electrotechnique, 2004.

[ABD_07] A. ABDELLI, «Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive», Thèses de Doctorat, octobre 2007.

[LAV_05] N. LAVERDURE, «Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires», Thèses de Doctorat, INPG, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 2005.

[BOY_06] A. BOYETTE, «Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation avec un système de stockage pour la production Eolienne Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[POI_03] F. Poitiers, «Etude et Commande de Génératrice Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

[ROG_04] V. ROGEZ, «Modélisation Simplifiée de Sources de Production Décentralisée pour des Etudes de Dynamique des Réseaux. Application à l'Intégration d'une Production Eolienne dans un Réseau de Distribution Insulaire.», Thèse de Doctorat, Université d'Artois décembre 2004, France

[SAL_07] G. SALLOUM, «Contribution à La Commande Robuste de La Machine Asynchrone A Double Alimentation, Thèse de Doctorat, École doctorale G.E.E.T, 2007.

[KHE_07] L. KHETTACHE, «Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée», Mémoire de Magistère, Laboratoire d'Electrotechnique de Batna (LEB), Département d'électrotechnique, 2007.

[DAV_07] A. DAVIGNY, «Participation aux Services Système de Fermes d'éoliennes à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'énergie», Thèse de Doctorat, Département de formation doctorale en génie électrique, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille, 2007.

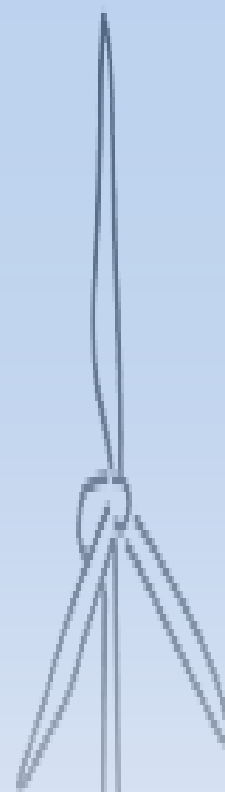
[MER_07] F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», Mémoire de Magistère, Ecole Nationale polytechnique, Département du Génie Electrique, Laboratoire de commande des processus, ENP d'Alger 2007.

[SOU_07] A. MOUSSA SIDDO, I. SOUMANA NOUHOU, «Etude du Générateur Asynchrone pour L'utilisation dans La Production de L'énergie Eolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 2007.

[BEN_08] Y. A. BENCHERIF, «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département du Génie Electrique, El Harrach, Alger, 2008.

[AZA_08] R. AZAIZIA, «Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée Par un Convertisseur Multi niveaux», Mémoire de Magistère, Département Automatisation des Procédés Industriels et Electrification, Laboratoire de recherche sur l'électrification des entreprises industrielles (LREEI), BOUMERDES 2008.

Annexes



Annexe A :*Paramètres utilisés***A.1. Les valeurs nominales :**

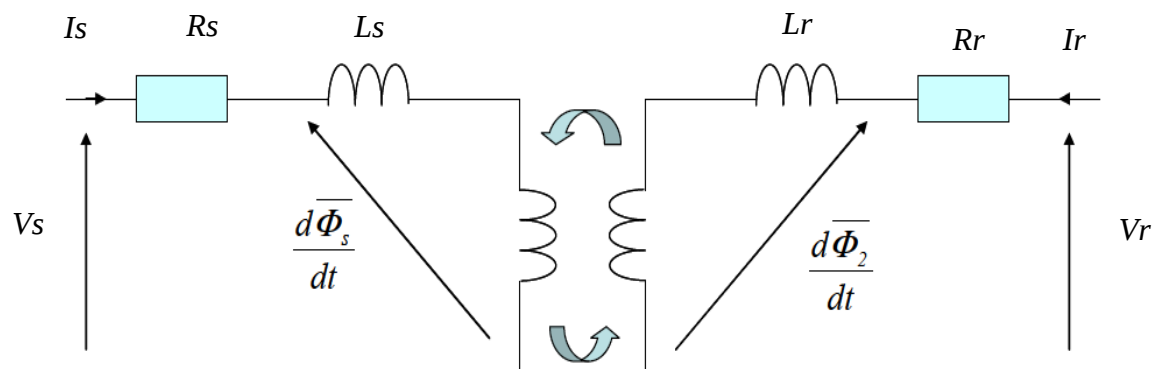
4 kW ; 220/380 V ; 50 Hz ; 15/8.6 A ; 1455 tr /min

A.2. Paramètres de la turbine éolienne utilisée :

- Nombre de pales = 3.
- Rayon de la surface balayée par les pales : $R = 3\text{m}$.
- Gain du multiplicateur : $G = 5.4$.
- Densité de l'air à 15°C : $\rho = 1.225 \text{ kg. m}^{-3}$

A.3. Constantes mécaniques :

- Moment d'inertie de la turbine $J_{\text{turbine}} = 0.2 \text{ kg.m}^2$.
- Coefficient de frottement visqueux : $f = 0.001 \text{ N.m.s/rd}$.

A.4. Données de la machine à double alimentation (MADA)

- R_s (Résistance du stator) = 1.2Ω
- R_r (Résistance du rotor) = 1.8Ω
- L_s (Inductance du stator) = 0.1554 H
- L_r (Inductance du rotor) = 0.1568 H
- M (Inductance mutuelle) = 0.15
- P (Nombre de paire de pole) = 2

Annexe .B :*Paramètres des régulateurs***Régulation de la commande PI**➤ *Sans Onduleur*

- *Commande directe*

$$\begin{cases} k_{pd} = 0.01 \text{ (boucle de puissance)} \\ k_{id} = 0.8 \text{ (boucle de puissance)} \end{cases}$$

- *Commande indirecte en boucle ouverte*

$$\begin{cases} k_p = 2.719 \text{ (boucle de courant)} \\ k_i = 100 \text{ (boucle de courant)} \end{cases}$$

- *Commande indirecte en boucle fermée*

$$\begin{cases} k_p = 0.6533 \text{ (boucle de courant)} \\ k_i = 97.88 \text{ (boucle de courant)} \end{cases} \quad \begin{cases} k_{pp} = 1.3 \text{ (boucle de puissance)} \\ k_{ip} = 83 \text{ (boucle de puissance)} \end{cases}$$

➤ *Avec Onduleur*

- *Commande directe*

$$\begin{cases} k_{pd} = 6.001 \text{ (boucle de puissance)} \\ k_{id} = 20.8 \text{ (boucle de puissance)} \end{cases}$$

- *Commande indirecte en boucle ouverte*

$$\begin{cases} k_p = 5.6567e4 \text{ (boucle de courant)} \\ k_i = 8.4764e6 \text{ (boucle de courant)} \end{cases}$$

- *Commande indirecte en boucle fermée*

$$\begin{cases} k_p = 710.64 (\text{boucle de courant}) \\ k_i = 8894.5 (\text{boucle de courant}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_{pp} = 0.007 (\text{boucle de puissance}) \\ k_{ip} = 70 (\text{boucle de puissance}) \end{cases}$$

➤ *La chaîne*

$$\begin{cases} k_p = 710.64 (\text{boucle de courant}) \\ k_i = 8894.5 (\text{boucle de courant}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} k_{pp} = 0.007 (\text{boucle de puissance}) \\ k_{ip} = 70 (\text{boucle de puissance}) \end{cases}$$