

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLÔME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE: INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUES

THEME

L'optimisation de puissance des éoliennes
à vitesse variable

Proposé et dirigé par :
M^{me}. BELOUNIS Ouassila

Présenté par :
Mekhiche Youcef

Année Universitaire: 2011/2012

N° d'ordre : 041

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ceux qui ont passés leur vie rêvant de voir ce jour-ci, à ceux qui mon entourés d'amour et tendresse.....,

à la fleur de ma vie ma très chère mère en témoignage de ma profonde et ma grande reconnaissance pour sa tendresse, sa patience, son sacrifice tout au long de mes études.

Mon honorable et très cher père Mohamed qui a sacrifié sa vie qu'on puisse se trouver à ce niveau et qui m'a été source de réussite.

Au mes très chers frères : Makhlouf, Ayoub

Au mes très chers sœurs

A mes très chers amis: Khadija, Saïd, Khalid, oussama, Khaled, Hanni, Basset, Abd Alatif, Mosaab, Moaataz, Kader, Djaber, Ishak, Youssef, Hamza, Mouaad, Halim ...

*Aux étudiants du Génie Electrique et toute la promotion
2012*

Mekhiche Youcef.

Remerciements

Avant tout Je tiens à remercier le bon Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il ma donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreuse **M^{me} O. BELOUNIS** pour avoir d'abord proposer ce thème, pour son suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qu'elle n'a pas cessée de me donner ses conseils.*

Je tiens à remercier vivement toutes personnes qui m'on aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui m'on aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département, particulièrement Messieurs: Barkat, Benslimane, Khodja, Riad, et le chef de département de génie électrique qui ont contribué à ma formation par ailleurs, je remercie tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail et tous les enseignants.

En fin, je tenu à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Mekhiche Youcef

Notation

Notation

MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	: Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
d, q	: Indices des composantes orthogonales directs et en quadrature
R_s, R_r	: Résistance statorique, rotorique
l_s, l_r	: Inductance propre statorique, rotorique
M_{sr}	: Inductance mutuelle stator- rotor
M_s	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
M_r	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
ϕ_s, ϕ_r	: Respectivement flux statorique et rotorique
$\phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr}$: Respectivement flux statorique et flux rotorique selon l'axe (d,q)
V_s, V_r	: Tension simple respectivement statorique et rotorique
θ_s, θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique
ω_s, ω_r	: Pulsation statorique , rotorique
ω_m	: Pulsation mécanique
P	: Nombre de paire de pole
N_s, N_r	: Nombre de spire statorique, rotorique
g	: Glissement
P_e	: Puissance d'entrée
C_{em}	: Couple électromagnétique
C_r	: Couple résistant
$C_{aér}$: Couple aérodynamique
f	: Coefficient de frottement visqueux
J	: Inertie de la machine

Notation

P_s	: Puissance active statorique
Q_s	: Puissance réactive statorique
P_{vent}	: Puissance du vent
ρ	: Masse volumique du vent
V_{vent}	: Vitesse du vent
C_p	: Coefficient de puissance
β	: Angle de calage
P_{tur}	: Puissance de la turbine
S	: Surface balayée par la turbine
λ	: Facteur d'avance (vitesse relative)
Ω_t	: Vitesse de la turbine
Ω_r	: Vitesse du rotor de la génératrice
G	: Multiplicateur mécanique
C_{vis}	: Couple des frottements visqueux
C_g	: Couple issu du multiplicateur
C_t	: Couple de la turbine
R	: Rayon de la turbine

Sommaire

Notation

Introduction générale.....01

Chapitre I : Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

I.1. Introduction.....04

I.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation.....04

I.3. Principe de fonctionnement de MADA.....05

I.4. Modes de fonctionnement de la MADA.....06

 I.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....07

 I.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....07

 I.4.2. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....07

 I.4.3. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....07

I.5. Etude de la puissance pour la MADA.....08

I.6. Mise en équation de MADA.....08

 I.6.1. Hypothèses simplificatrices.....08

 I.6.2. Modèle mathématique de la GADA.....09

 I.6.2.1. Équation électrique.....09

 I.6.2.2. Equations magnétiques.....10

 I.6.3. Modèle Biphase de GADA.....10

 I.6.4. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q).....12

 I.6.4.1. Équation magnétique.....13

 I.6.4.2. Les équations de tension.....13

I.7. Mis sous forme d'équation d'état.....15

I.8. Simulation de GADA.....15

I.9. Interprétations des résultats.....19

I.10. Conclusion.....19

**chapitreII : la commande vectorielle en puissance
active et réactive**

II.1 Introduction.....20

II.2 Principe de la commande vectorielle.....20

II.3 Modèle de la GADA a flux statorique orienté.....22

 II.3.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....24

 II.3.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....25

II.4 Commande indirecte.....28

 II.4.1 Commande en boucle ouvert.....28

 II.4.2 Commande en boucle fermée.....29

II.5 Résultats de simulation.....30

II.6 Interprétations des résultats.....33

II.7 conclusion.....34

Chapire III: cascade Redresseur MLI- Onduleur MLI- MADA

III.1 Introduction.....35

III.2 Cascade Redresseur MLI de courant - onduleur MLI de tension – GADA.....35

 III.2.1 Onduleur de tension.....36

 III.2.1.1 Modélisation de l’onduleur de tension triphasé.....36

 III.2.1.2 Commande triangulo-sinusoidale.....39

 III.2.2 Redresseur MLI de courant.....40

 III.2.2.1 Principe de fonctionnement.....41

 III.2.2.2 Modélisation de Redresseur.....42

 ❖ La source d’alimentation.....42

Sommaire

❖ Le redresseur à MLI.....	43
❖ Modélisation du bus continu.....	43
III.2.2.3 Commande du redresseur en courant par hystérésis.....	44
III.3 Résultats de simulation.....	47
III.4 Interprétation des résultats.....	55
III.5 Conclusion.....	56
<u>Chapitre IV</u> : asservissement de la chaîne éolienne	
IV .1) Introduction.....	57
IV .2) Définition de l'énergie éolienne.....	57
IV .3) Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	58
IV .4) Les différents types de éolienne.....	58
➤ Les éoliennes à axe vertical.....	58
➤ Les éoliennes à axe horizontal.....	59
IV .5) les Principaux composants des éoliennes à axe horizontal.....	60
IV .6) Conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie électrique.....	61
a) Loi de Betz.....	61
b) Production d'énergie mécanique.....	64
IV .7) Intérêt de la vitesse variable.....	64
IV .8) Modélisation de convertisseur éolienne.....	65
❖ Modélisation de la turbine.....	65
❖ Modèle du Multiplicateur.....	67
❖ Equation mécanique de l'arbre.....	67

Sommaire

IV .9) les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.....	69
IV .10) Technique d'extraction du maximum de puissance.....	70
IV .10.1) Principe de la MPPT.....	70
IV.10.2) Commande indirecte de vitesse (sans asservissement de vitesse).....	70
IV .11) Profile de vent.....	72
IV.12) Résultats de simulation du système de conversion complet.....	73
IV .13) Interprétation des résultats.....	76
IV .14) Conclusion.....	76
Conclusion générale.....	77
Annexe.....	79
Bibliographie.....	83

Introduction générale:

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Ces modes de production ainsi que les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies [2].

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 20%. Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement à cause de la pollution provenant des déchets radioactifs et le risque industriel lors de l'exploit de l'énergie ainsi à l'épuisement des ressources non renouvelables (combustibles fossiles et Uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des énergies renouvelables pour la production d'électricité.[8]

De ce fait, l'énergie éolienne apparaît en bonne place parmi les autres formes d'énergie renouvelable, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles, notamment le nucléaire. Néanmoins, des techniques d'extraction de la puissance de cette ressource demandent des recherches et développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et à augmenter l'efficacité énergétique.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas des Etats Unis, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 35,15 GW, l'Allemagne, numéro deux mondialement et le premier dans l'Union Européen avec 25,77 GW et l'Espagne avec 19,4 GW à la fin de l'année 2009. Sans oublier la Chine avec une capacité de production qui atteint les 25,10 GW seulement en quelques années après avoir adopté l'investissement dans ce domaine [18].

Les différentes génératrices utilisées dans les aérogénérateurs ont des problèmes d'adaptation avec l'aspect aléatoire du vent. L'alternateur classique exige une vitesse d'entraînement fixe. La machine asynchrone classique travaille au voisinage de synchronisme.

Ces deux contraintes poussent à ajouter systématiquement des interfaces d'électronique de puissance

qui supportent la totalité de la puissance transférée. Par conséquent, on se retrouve avec des systèmes de conversions chères et non compétitives.[8]

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable, on leur préfère plutôt des machines à rotor bobiné doublement alimentées qui offrent d'excellents compromis performances/coût[2].

Connue depuis 1899, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) En anglais «*double feild induction machine DFIM* » est la solution la mieux adaptée pour un fonctionnement à vitesse variable. Grâce à l'accessibilité aux grandeurs rotoriques de la MADA, le convertisseur statique a pour rôle d'injecter seulement la puissance de glissement au réseau. Donc, on le dimensionne à une fraction de la puissance nominale du système. Ce qui justifie le compromis performances/coût.

Dans ce contexte général, notre travail se base sur l'étude d'une éolienne à vitesse variable, avec une chaîne de conversion suivante :

- ✓ Turbine éolienne tripale à axe horizontale.
- ✓ Machine asynchrone à double alimentation piloté par le rotor
- ✓ Un convertisseur de puissance comporte:
 - Redresseur MLI
 - Filter capacitife
 - Un onduleur de tension IGBT

Organisation du mémoire:

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, quatre chapitres, une conclusion générale et une bibliographie.

Au premier chapitre on présentera la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Sa mise en équation permettra de simuler son modèle, en l'alimentant par deux sources triphasées sinusoïdales parfaites ; l'une au niveau du stator et l'autre au niveau du rotor qui est entraînée par une vitesse fixe.

Le deuxième 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 troisième chapitre est un complément du chapitre précédent, où on se met dans le cas le plus pratique où le stator de la GADA est alimentée par une source triphasé et le rotor est connectée à un onduleur à MLI à deux niveaux commandée par le stratégie triangulo-sinusoidale. L'alimentation continue de l'onduleur est fourni par un convertisseur triphasé fonctionnant en redresseur sera commandée par une MLI à hystérésis a travers un bus continu. On aura donc une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Nous aborderons dans le quatrième chapitre, la modélisation de la turbine éolienne et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible. Puis un asservissement du modèle global d'une chaîne de conversion éolienne sera fait. . Cette étape s'intéressée à l'optimisation du rendement de la GADA dans un système éolien (MPPT).

Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale.

Chapitre

I

**Modulisation de la machine
asynchrone à double
alimentation**

I.1. Introduction:

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 [13].

Dans le présent chapitre nous nous intéresserons à la description et à la modélisation dynamique de la machine asynchrone en double alimentation en régime générateur «GADA», et plus précisément la modélisation par la méthode de R.H Park et à la simulation de cette machine asynchrone.

I.2. Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La machine asynchrone à double alimentation présente 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 [13].

Le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné en fonctionnement moteur a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Au lieu de dissiper l'énergie disponible au niveau du rotor, on insère un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau qui nous permettra de renvoyer cette énergie sur le réseau, on trouve que le rendement de la machine est amélioré. C'est le principe de la cascade hypo synchrone qui fera l'objet dans ce qui suit l'étude de la MADA en génératrice.

La structure de la machine asynchrone à double alimentation permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif.

Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme "machine synchrone à excitation alternative".

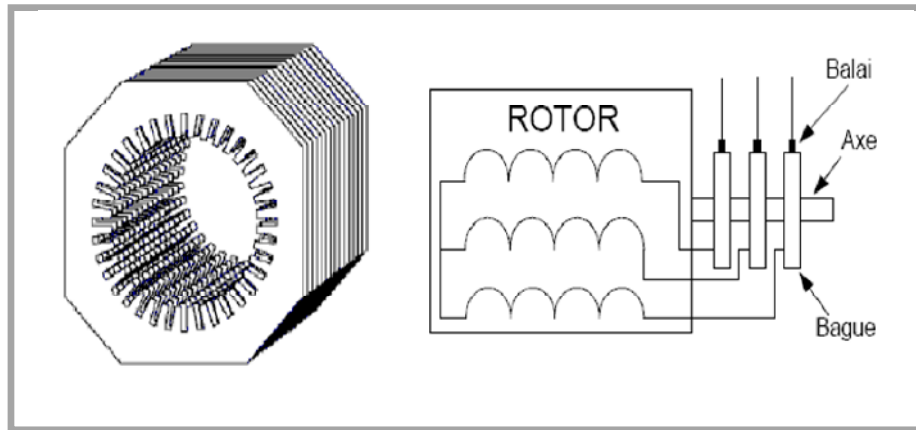


Figure. I.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

I.3. Principe de fonctionnement de MADA:

Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs **f.m.m** du stator et rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de la force magnétomotrice de l'enroulement statorique tourne avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f_s$ fixe, et que le rotor tourne à une vitesse ω_m , par conséquent il faut que le vecteur **f.m.m** de l'enroulement rotoriques tourne par rapport au rotor avec la vitesse

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m = g\omega_s \tag{I.1}$$

Ce qui impose la fréquence des grandeurs rotoriques

$$\omega_r = 2\pi f_r = g(2\pi f_s) \tag{I.2}$$

d'où:

$$f_r = g.f_s \quad \text{et} \quad \omega_r = g.\omega_s \tag{I.3}$$

pour cela, il faut y avoir un courant rotoriques de fréquence $g.f_s$.[16]

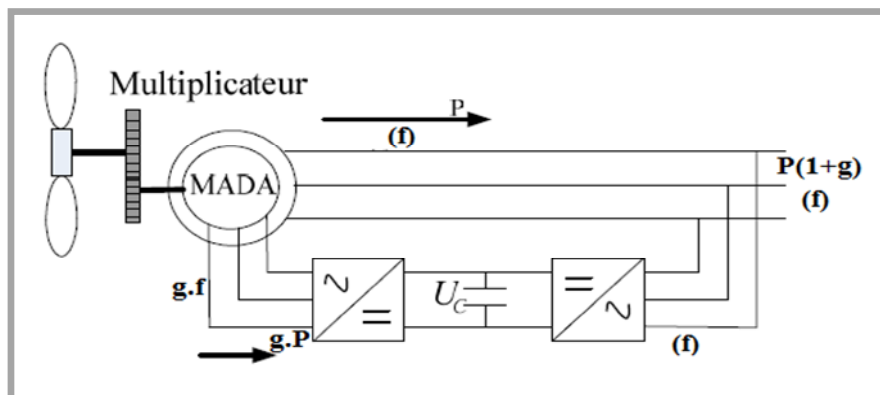


Figure I.2: Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

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

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des **f.e.m** dans le bobinage du rotor Er.

$$E_r = 2.22K_b \cdot N_r \cdot \Phi \cdot f_r \quad (I.4)$$

Avec:

K_b: coefficient de bobinage

Le rapport entre les **f.e.m** créées au rotor et au stator est:

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r \cdot f_r}{N_s \cdot f_s} = g \frac{N_r}{N_s} \quad (I.5)$$

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

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

$$N_s \cdot I_s = N_r \cdot I_r \quad (I.6)$$

Donc, le rapport entre la puissance **P_r** au rotor et la puissance **P_s** au stator devient :

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{I_r \cdot E_r}{I_s \cdot E_s} = g \quad (I.7)$$

Cette expression montre qu'il est possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement **g**, soit de la dissiper dans la résistance par effet joule, soit de la récupérer en la renvoyant sur le réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance, ce qui améliore le rendement du système (Figure.I.2) [16].

I.4. Modes de fonctionnement de la MADA:

Les différentes modes de fonctionnement de la MADA dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié à ce dernier par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique sont:

- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone
- Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone
- Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone
- Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

I.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

La figure (I.3.a) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

I.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

La figure (I.3.b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

I.4.2. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone:

La figure (I.3.c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. On a de ce fait un fonctionnement en mode génératrice en dessous de la vitesse de synchronisme.

I.4.3. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone:

La figure (I.3.d) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme [19][20]

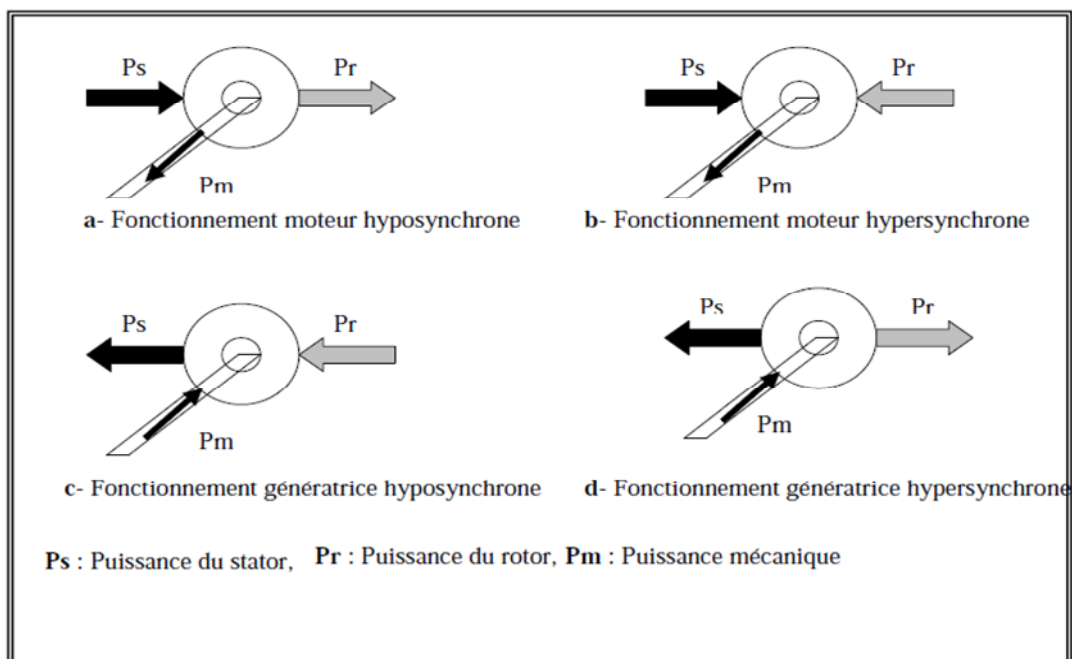


Figure I.3: Différents mode de fonctionnement de la MADA

I.5. Etude de la puissance pour la MADA [2] :

Les puissances de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$P_r = -gP_s \quad (I.8)$$

$$P_m = -(1-g)P_s \quad (I.9)$$

Type de fonctionnement	Moteur $P_m < 0$	Génératrice $P_m > 0$
Hypo synchrone $P_s = -(P_m + P_r)$	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
Hyper synchrone $P_m = -(P_s + P_r)$	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$

I.6. Mise en équation de MADA:

A fin de modéliser la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. De la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage sauf comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles.

I.6.1. 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.[13]

I.6.2. Modèle mathématique de la GADA: [12,20,21]

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statorique (A_s, B_s, C_s) décalées entre elles par un angle de $(\frac{2\pi}{3})$, et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (A_r, B_r, C_r).

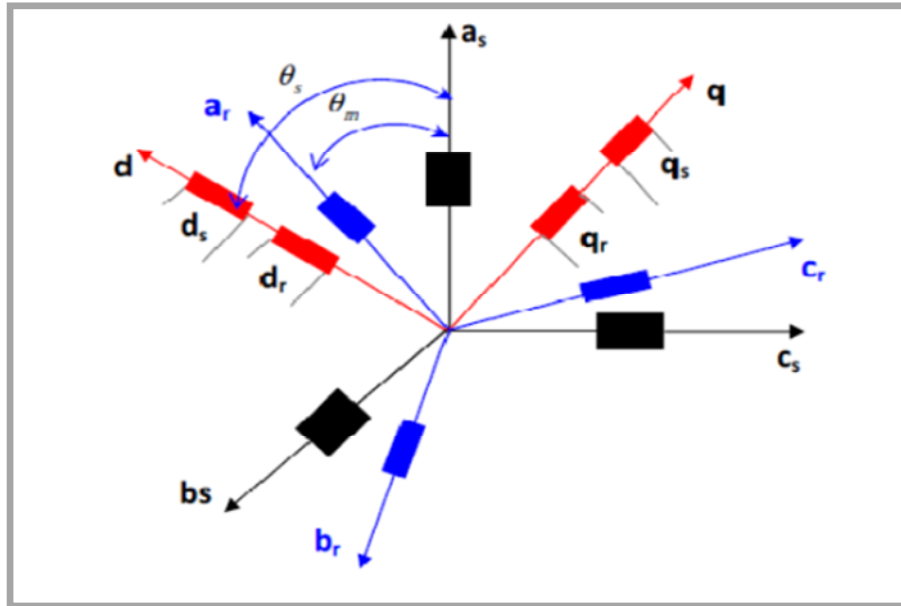


Figure .1.4: Représentation simplifié de la GADA

I.6.2.1. Équation électrique :

A partir de la loi de Faraday qui donne la relation entre la tension V aux bornes d'une bobine de résistance R , d'inductance L , le courant i , et les variations de flux.

$$\frac{d\phi}{dt} = V - RI \tag{I.10}$$

On applique cette relation sur l'enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve :

$$\begin{cases} V_{sa} = -R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{sa}} \\ V_{sb} = -R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{sb}} \\ V_{sc} = -R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{sc}} \end{cases} \tag{I.11}$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{ra}} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{r_{rb}} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{r_{rc}} \end{cases} \tag{I.12}$$

I.6.2.2. Equations magnétiques :

les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions

$$[\phi_s] = -[L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (I.12)$$

$$[\phi_r] = [L_r][I_r] - [M_{rs}][I_s] \quad (I.13)$$

Avec:

$$[\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} ; [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator, avec écart angulaire des axes.

I.6.3. Modèle Biphase de GADA:

La mise en équation des machines triphasés aboutie à des équations différentielles à coefficients variable, l'état de comportement (simulation) du système et alors difficile. On utilise alors la transformation mathématique qui permet de décrire le comportement de la machine à l'aide des équations différentielles à coefficients constant.

L'idée de **park** repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasés peut être aussi à l'identique par un système biphasés de deux bobine décalé de 90°.

La figure (I.5) présente le système d'axes réel (**Xa, Xb, Xc**) et le système d'axes fictifs (**d, q**)

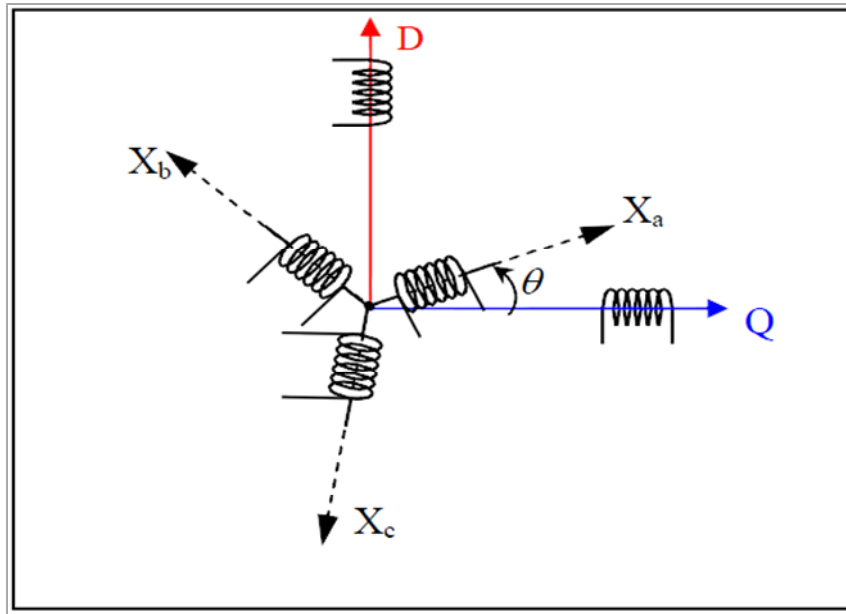


Figure.1.5: génératrice asynchrones à double alimentation [axe réel et axe (d, q)]

Le passage au système biphasé revient géométriquement à exprimer les composantes (**d,q**) en fonctions de (**Xa, Xb, Xc**) ; de plus cette transformation triphasée doit obligatoirement conserver les **F.m.m** c'est à dire le champ dans la machine ne doit pas être altéré.

La projection des courants réels sur le système d'axes (**d, q**) s'écrit sous forme matricielle comme suit :

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \varphi & -\sin(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (I.14)$$

Avec :

$$\theta = \int \omega_{\text{coor}} dt \quad : \text{ Angle entre le système d'axes (d,q) et le système d'axes ((Xa, Xb, Xc))$$

ω_{coor} : Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport au système d'axe triphasé.

Ou bien :

$$[V_p] = [P(\theta)] * [V_s] \quad (\text{I.15})$$

Où :

$[P(\theta)]$: La matrice est appelée matrice de Park ;

$[V_p]$: est le vecteur des tensions du système d'axes biphasé ;

$[V_s]$: est le vecteur des tensions du système d'axes triphasé.

Pour la transformation inverse, c'est-à-dire pour le passage du système biphasé au système triphasé, on utilise la matrice de Park inverse suivante :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varphi - \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varphi + \frac{2\pi}{3}) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{I.16})$$

Ou encore :

$$[V_s] = [P(\theta)]^{-1} * [V_p] \quad (\text{I.17})$$

La matrice $[P(\theta)]^{-1}$ est appelée matrice de transformation de Park inverse

I.6.4. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q) :

Il se traduit par les relations suivantes : $\theta_m = \theta_s - \theta_r$ (I.18)

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{I.19})$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \quad (\text{I.20})$$

Il est donc préférable de travail dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Les équations générales de la MADA dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante.

I.6.4.1. Équation magnétique :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{I.21})$$

Avec:: L'inductance cyclique statorique $L_s = l_s - M_s$: L'inductance cyclique rotorique $L_r = l_r - M$: L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor $M = \frac{3}{2} M_{sr}$ **I.6.4.2. Les équations de tension :**

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}(\phi_{sd}) - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}(\phi_{sq}) + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

En introduisant le système d'équations des flux magnétiques (I.21) dans celui d'équations électriques (I.22), et en réarrangeant tout, on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{d}{dt}(I_{sd}) + M \frac{d}{dt}(I_{rd}) + \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} - L_s \frac{d}{dt}(I_{sq}) + M \frac{d}{dt}(I_{rq}) - \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{d}{dt}(I_{rd}) - M \frac{d}{dt}(I_{sd}) - \omega_r L_r I_{rq} + \omega_r M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{d}{dt}(I_{rq}) - M \frac{d}{dt}(I_{sq}) + \omega_r L_r I_{rd} - \omega_r M I_{sd} \end{cases} \quad (\text{I.23})$$

Avec:

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$: Sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé

$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$: Sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} - C_r - f\Omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (I.24)$$

Avec:

C_{em} : Le couple électromagnétique

C_r : Le couple résistant

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA

J : L'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes :

$$\begin{cases} C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\phi_{sd} I_{rq} - \phi_{sq} I_{rd}) \\ C_{em} = -P \frac{M}{L_r} (\phi_{sq} I_{rd} - \phi_{sd} I_{rq}) \\ C_{em} = -P (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \end{cases} \quad (I.25)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P_S = -V_{sd} \cdot I_{sd} - V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_S = -V_{sq} \cdot I_{sd} + V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (I.26)$$

$$\begin{cases} P_R = V_{rq} \cdot I_{rq} + V_{rd} \cdot I_{rd} \\ Q_R = V_{rq} \cdot I_{rd} - V_{rd} \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (I.27)$$

I.7. Mis sous forme d'équation d'état:

Le modèle peut être exprimé dans l'espace sous la forme suivante :

$$V = GI + L \frac{dI}{dt} \quad (I.28)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M \omega_s & 0 \\ 0 & \omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ -\omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (I.29)$$

En mettant (I.29) sous forme d'état, on trouve :

$$\frac{d}{dt}[I] = [L]^{-1} \{ [V] - [G1][I] \} \quad (I.30)$$

$$G1 = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M \omega_s & 0 \\ 0 & \omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ -\omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

I.8. Simulation de GADA :

Une fois la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné a été modélisée par des équations mathématiques, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci. Un modèle conçu en Matlab-Simulink permet de visualiser les différentes grandeurs de la machine (flux, couple, courants ...).

Les figures ci dessous sont ceux obtenus pour le modèle de GADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1440 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. 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.

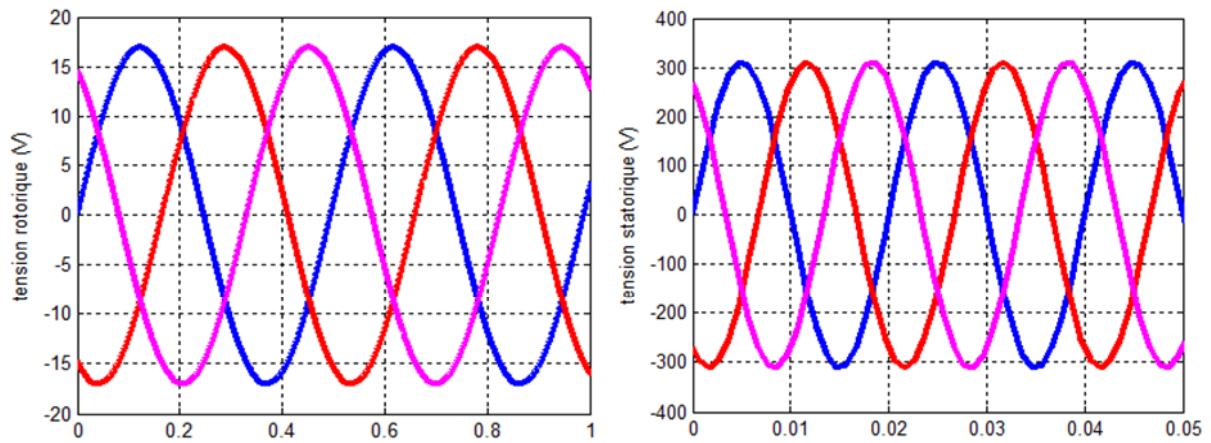


Figure. I.6 : Les tensions triphasées appliquées au stator et celle appliquée au rotor de la MADA

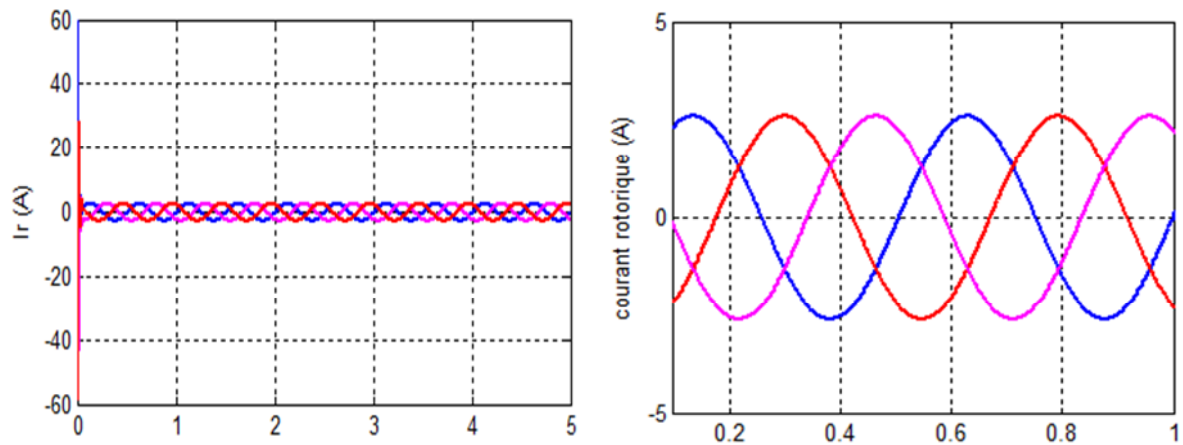


Figure. I.7 : Les courants rotoriques triphasées avec un zoom

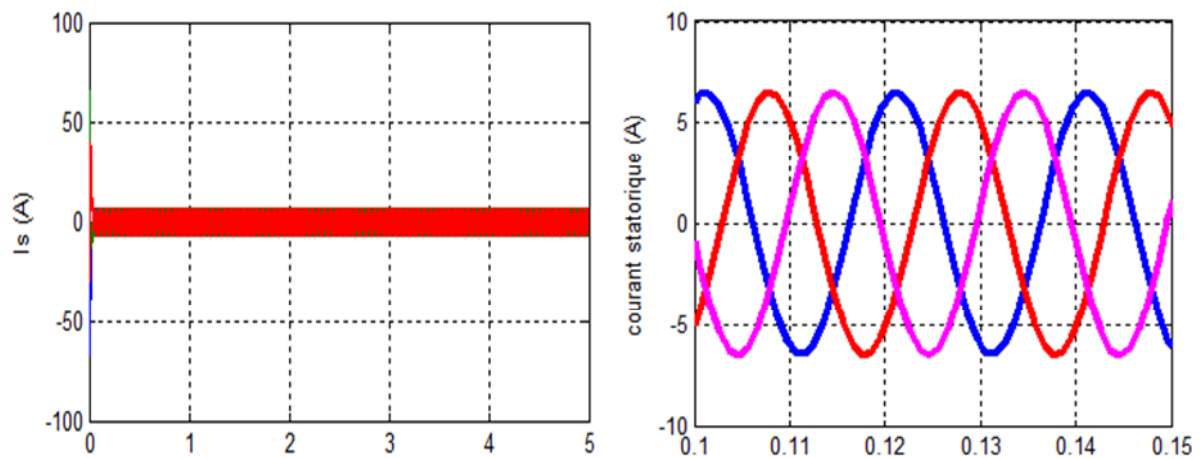


Figure. I.8 : Les courants statoriques triphasées avec un zoom

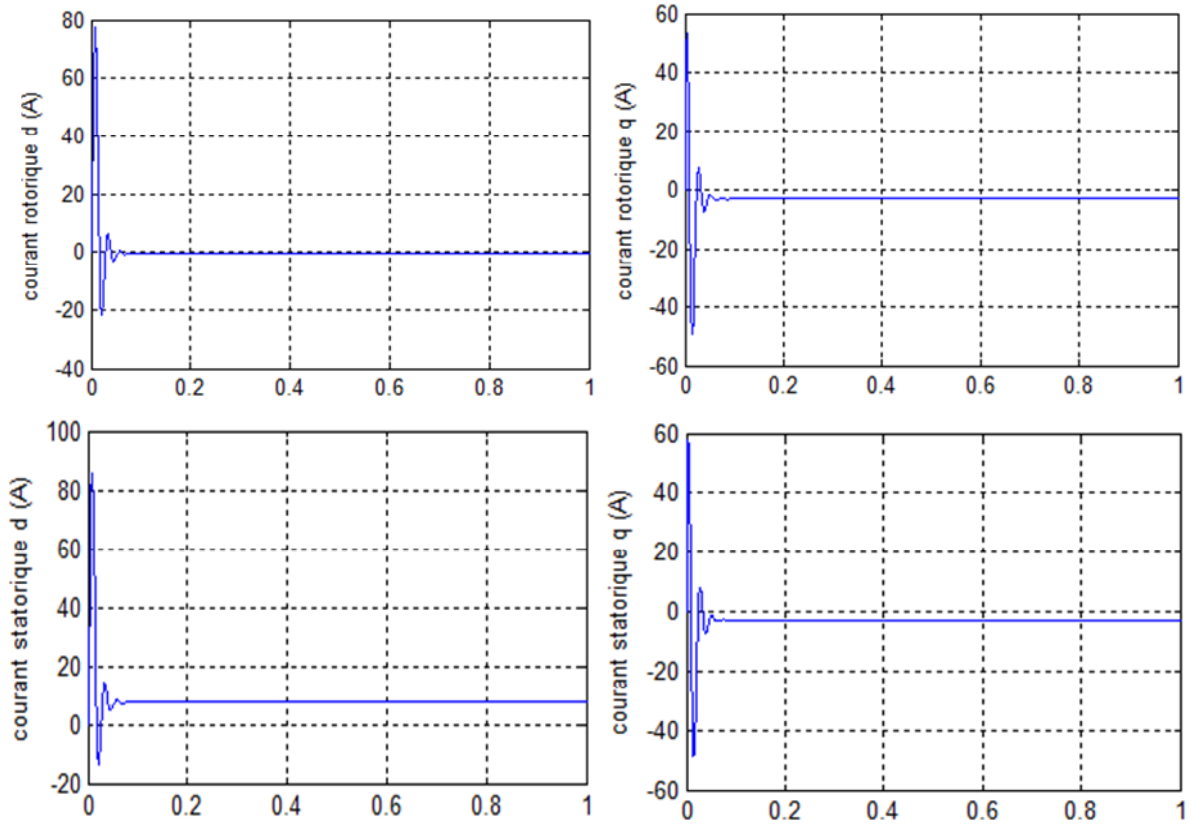


Figure I.9 : Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)

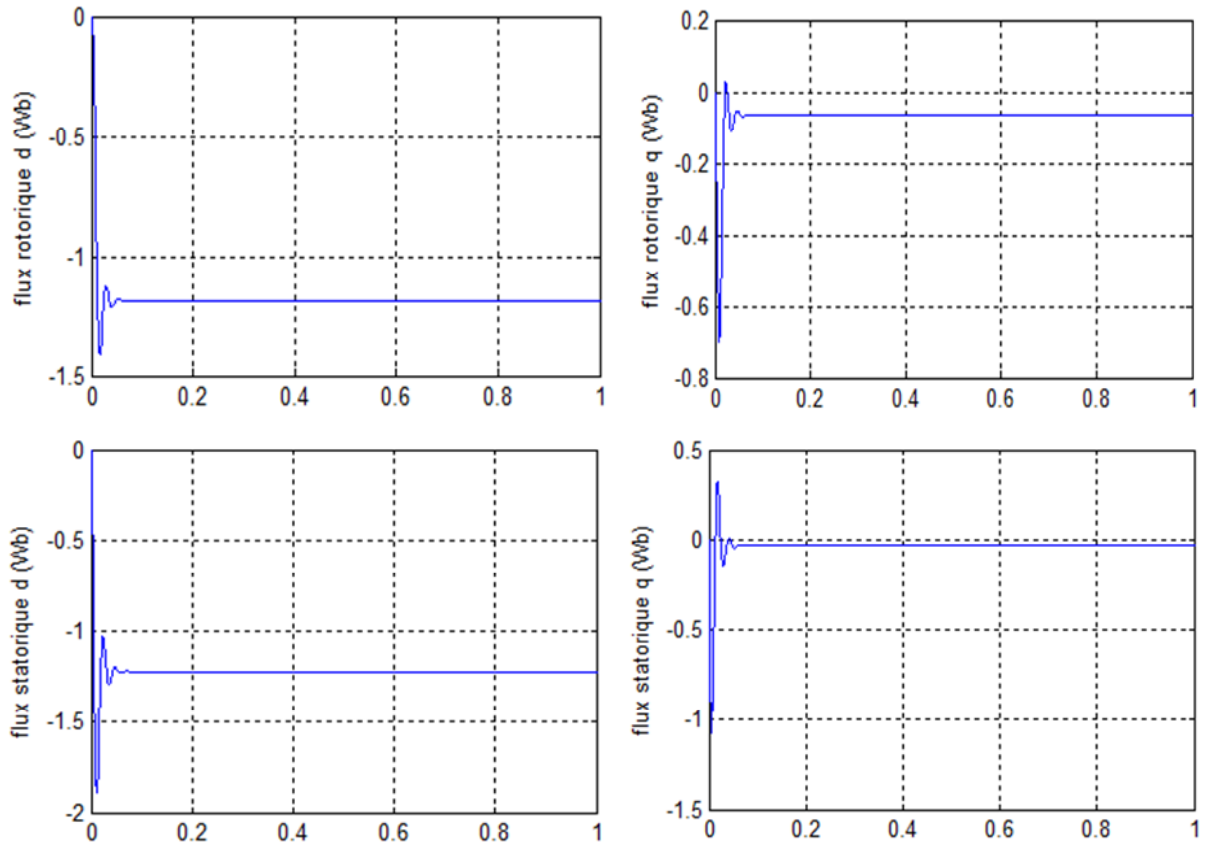


Figure I.10 : Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q)

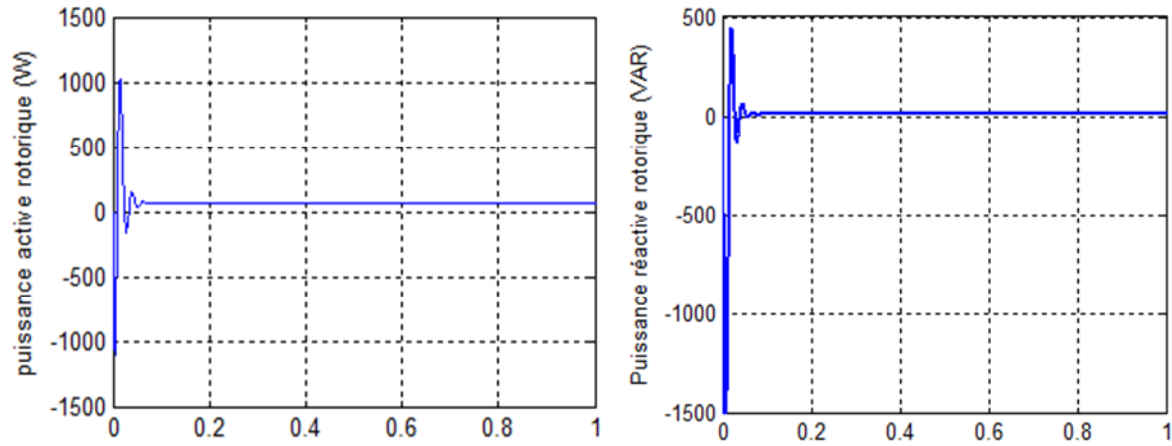


Figure I.11 : Puissance rotorique (P_r, Q_r)

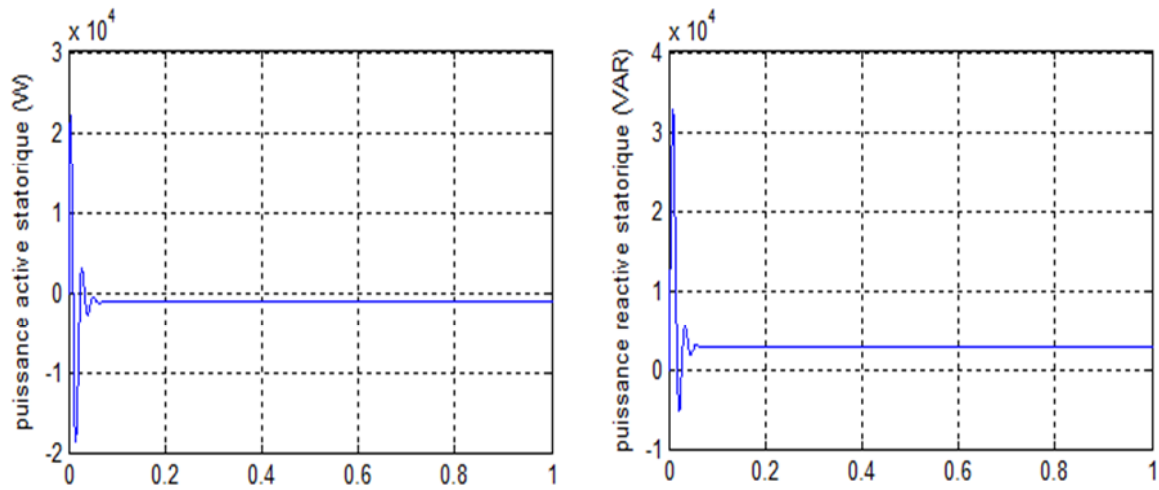


Figure I.12 : Puissances statoriques (P_s, Q_s)

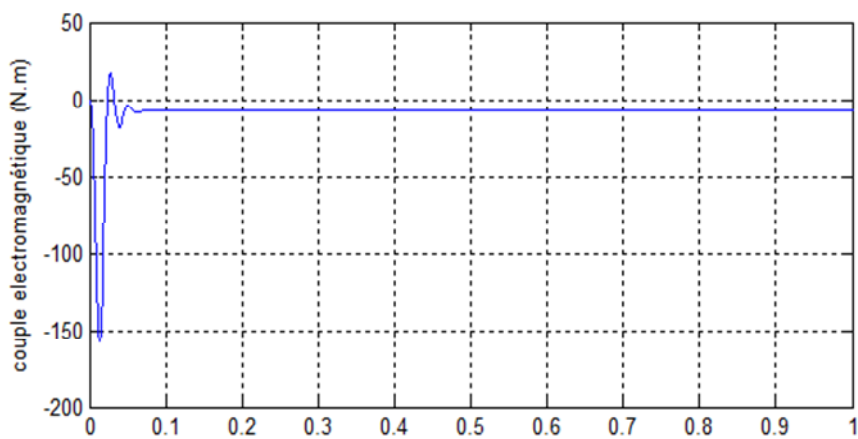


Figure I.13 : Couple électromagnétique

I.9. Interprétations des résultats :

La simulation sous Matlab/Simulink de la GADA dont les paramètres sont donnés dans l'annexe A, permet l'obtention des différentes grandeurs (tension, courant, couple ...).

La figure (I.7) et (I.8) représentent respectivement l'évolution du courant statorique et rotorique de GADA.

Pendant le démarrage on remarque l'importance du courant, après un temps très réduit égale à environs 0.05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdale de fréquence 50Hz pour les courants statorique et $f_r = g \cdot f_s$ pour les courants rotorique

La figure (I.13) montre que le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale -150N.m.

I.10. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons fait en premier temps une description générale de la machine asynchrone à double alimentation. Dans le but d'étudier le comportement de cette dernière nous avons établi un modèle dynamique en tenant compte certaines hypothèses simplificatrices.

Le modèle de la GADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de R.H.Park nous a permis de le simplifier. Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

Chapitre

II

**Commande vectorielle en
puissance active
et réactive**

II.1 Introduction:

La commande vectorielle de la machine à double alimentation est une solution plus attractive pour des applications à haute performance comme l'entraînement à vitesse variable et les systèmes de génération de l'énergie.

Cette solution convient à toutes les applications où les variations de la vitesse sont limitées autour de la vitesse de synchronisme. Puisque la puissance traitée par le côté rotorique (puissance de glissement) est proportionnelle au glissement, une conversion d'énergie est possible en utilisant un convertisseur de puissance du côté du rotorique, celui-ci ne traite qu'une petite fraction de puissance du système global, dans les entraînements à vitesses variables [5].

Dans ce chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [1,2].

Cette commande se décompose en deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Pour établir la commande vectorielle de la génératrice, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques ou rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc toutes les composantes homopolaire sont nulles.

Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifient la validation de commande.

II.2 Principe de la commande vectorielle:

Le principe de la commande vectorielle est d'assimiler le comportement de la machine asynchrone à double alimentation à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée [19]. il consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone φ_s , φ_r ou φ_m au choix, afin d'obtenir un découplage flux-courant et couple-courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment du flux [14].

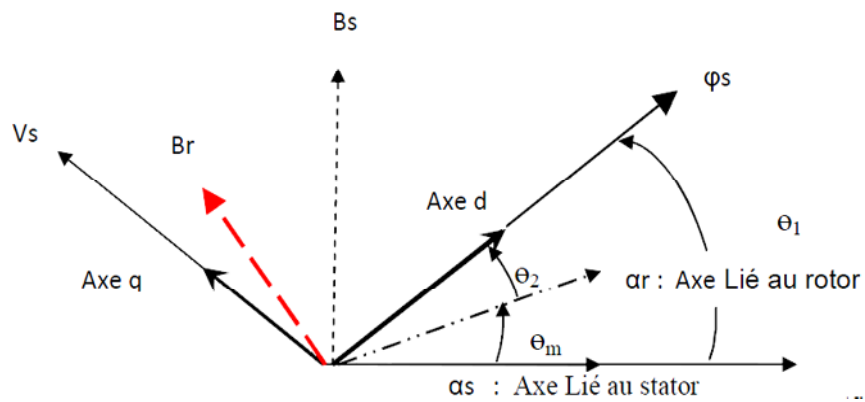


Figure. II.1: Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi

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

1) *La source d'énergie*

- Commande en tension.
- Commande en courant.

2) *L'orientation du repère*

- Le flux rotorique.

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \phi_r \\ \phi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (II.1)$$

- Le flux statorique.

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (II.2)$$

- Le flux d'entrefer.

$$\begin{cases} \phi_{dm} = \phi_m \\ \phi_{qm} = 0 \end{cases} \quad (II.3)$$

3) *La détermination de la position du flux*

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

II.3 Modèle de la GADA a flux statorique orienté:

On rappelle d'abord le système équations différentielles décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}(\phi_{sd}) - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d}{dt}(\phi_{sq}) + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.4})$$

Avec un flux statorique constant et orienté, $\varphi_s = \varphi_{ds}$ et $\varphi_{qs} = 0$, ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivante:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = -R_s I_{sd} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.5})$$

Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on peut de façon légitime négliger la résistance statorique tout en considérant le flux statorique constant (ce qui assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt}(\phi_{rd}) - \omega_r \phi_{rd} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt}(\phi_{rq}) + \omega_r \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

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

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.7.})$$

Partir de l'équation de flux, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Le couple a pour expression :

$$C_{em} = -P \cdot (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.9})$$

Avec une orientation du flux statorique telle que $\phi_{qs} = 0$; on obtient une expression simplifiée :

$$C_{em} = -P \cdot \phi_{sd} I_{sq} \quad (\text{II.10})$$

Le courant I_{sq} ne pouvant être directement contrôlé, en utilisant l'équation (II.8) , on fait apparaître la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique [1]:

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{sd} I_{rq} \quad (\text{II.11})$$

On voit que le couple électromagnétique est proportionnel au courant I_{rq} si le flux est maintenu constant. Le courant I_{rq} sera variable par action sur la tension V_{rq} .

Le flux peut être contrôlé le réglage du courant I_{rd} . Ce dernier est devient variable par action sur la tension V_{rd} . Nous pouvons les déterminer la référence de la composante directe et en quadrature du courant rotorique, à partir des puissances active et réactive.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique de d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

II.3.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques [2]:

Dans un repère diphasé, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrones s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd} \cdot I_{sd} - V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq} \cdot I_{sd} + V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($v_{ds}=0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = -V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = -V_{sd} \cdot I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En remplaçant i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données à l'équation (II.8), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Les tensions rotoriques diphasées sont les grandeurs à imposer pour contrôler les courant statoriques. V_{dr} et V_{qr} sont ainsi considérés comme des variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté (Figure II.2) et les courants rotoriques I_{dr} et I_{qr} . Comme des variables d'état. Les tensions rotoriques sont ainsi fonction des grandeurs de consigne P_{ref} et Q_{ref} [6].

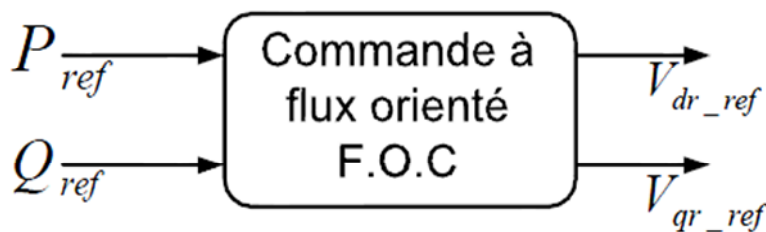


Figure. II.2: Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante \mathbf{M} comme constante, le système obtenu liée de façon proportionnelle à la puissance active au courant rotorique d'axe \mathbf{q} et la puissance réactive au courant rotorique

d'axe \mathbf{d} . La constante $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ près imposée par le réseau.

II.3.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques:

A partir du système d'équation (II.7) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \phi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe \mathbf{d} et \mathbf{q} sont alors intégrées aux expressions tensions rotoriques diphasées de l'équation (II.6). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations (II.17), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = [R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot s] I_{rd} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = [R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot s] I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.19)$$

Avec:

V_{rd} Et V_{rq} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

$[R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \cdot s]$: Est le terme de couplage entre les deux axes.

$g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s})$: représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

A partir des systèmes d'équations (II.15) et (II.19), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous [14].

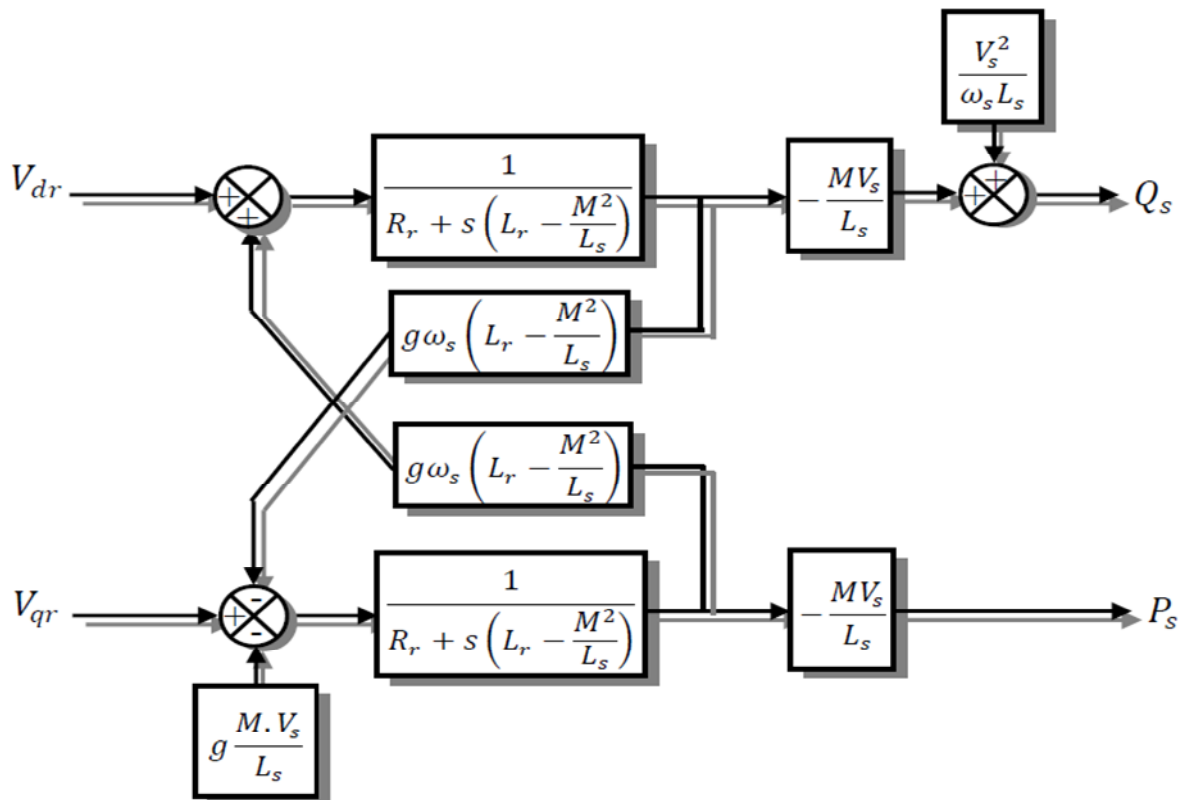


Figure.II.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

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

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine. La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour assurer une commande dé耦ée des puissances de la génératrice.

Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine [15].

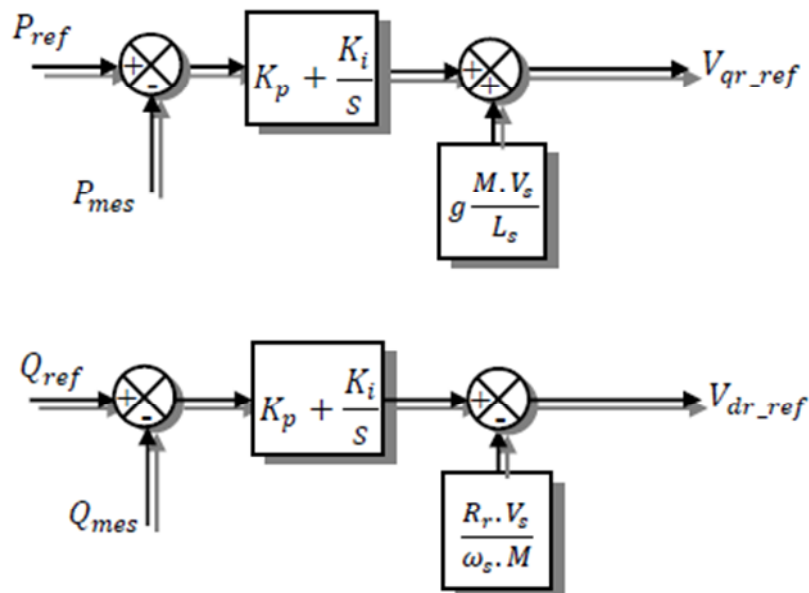


Figure. II. 4: schéma bloc de la commande directe.

II.4 Commande indirecte:

II.4.1 Commande en boucle ouvert:

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe **d** et **q**.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (II.15) on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} P_{s-ref} \\ I_{rd-ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} Q_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (II.20)$$

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

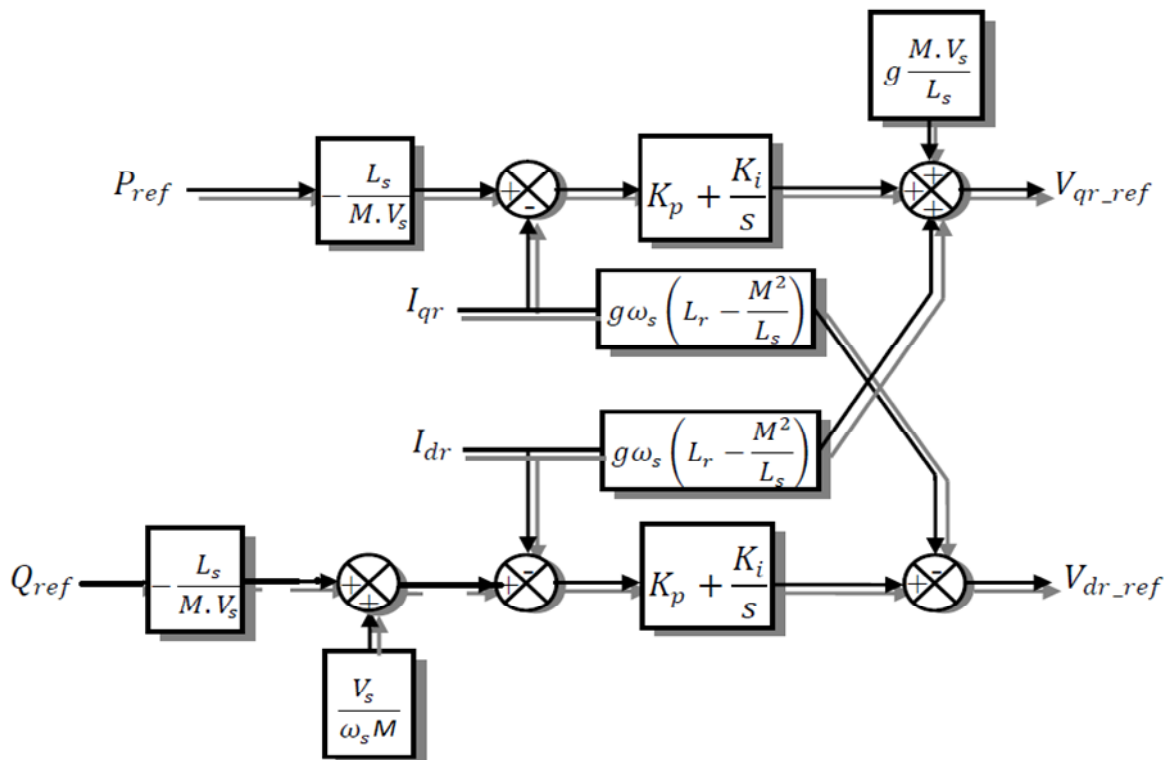


Figure .II.5: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.

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

II.4.2 Commande en boucle fermée

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

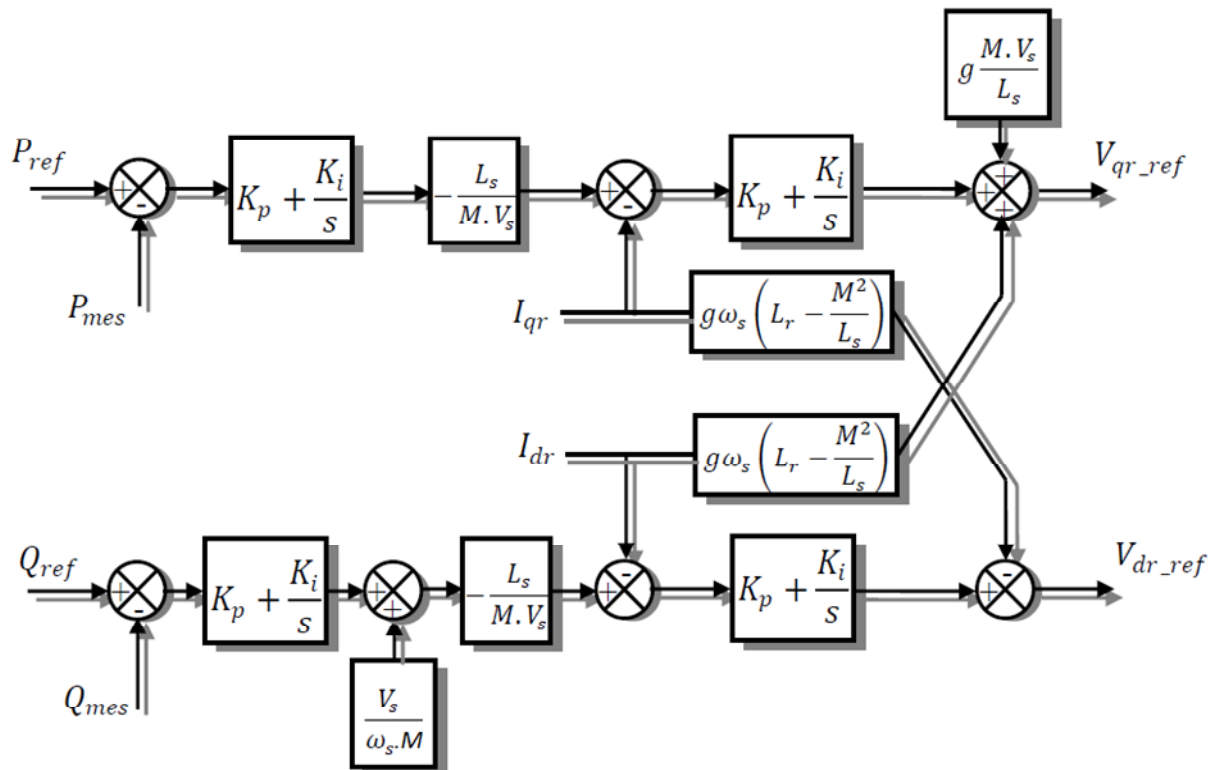


Figure. II.6: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

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

- ❖ Dans notre travail, on adopte le principe de la commande indirecte avec deux régulateurs.

II.5 Résultats de simulation:

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, sans réglage de vitesse avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000W$ entre $t=1s$ et $t=3s$, et une puissance réactive $Q = 1000VAR$ entre $t=2s$ et $t=4s$.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA et entraînée à une vitesse fixe : 1440tr/min.

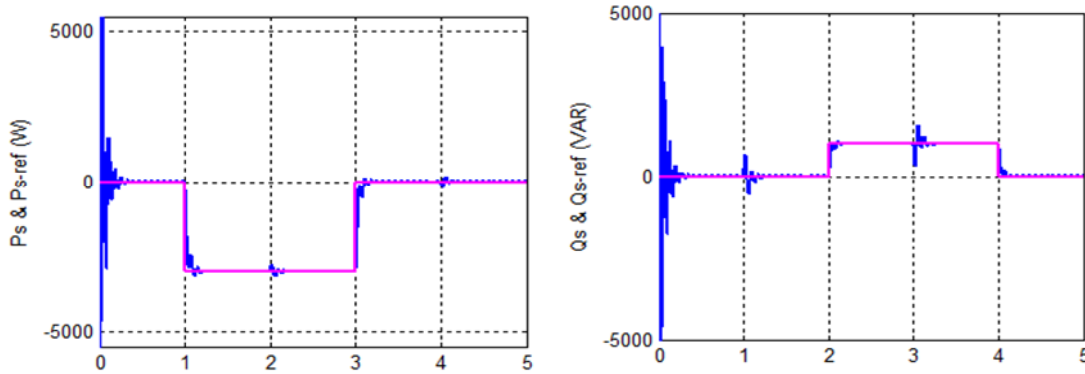


Fig.II.7: La puissance active et réactive statorique et sont reference avec boucle de puissance

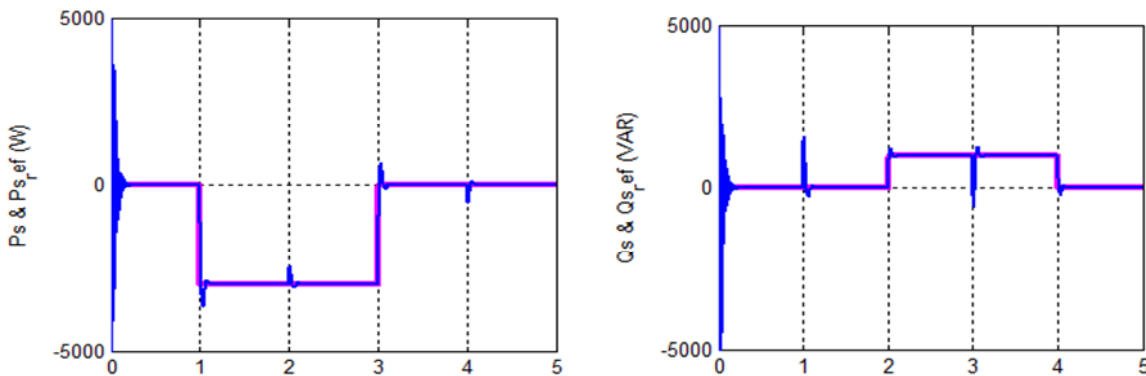


Fig.II.8: La puissance active et réactive statorique et sont reference sans boucle de puissance

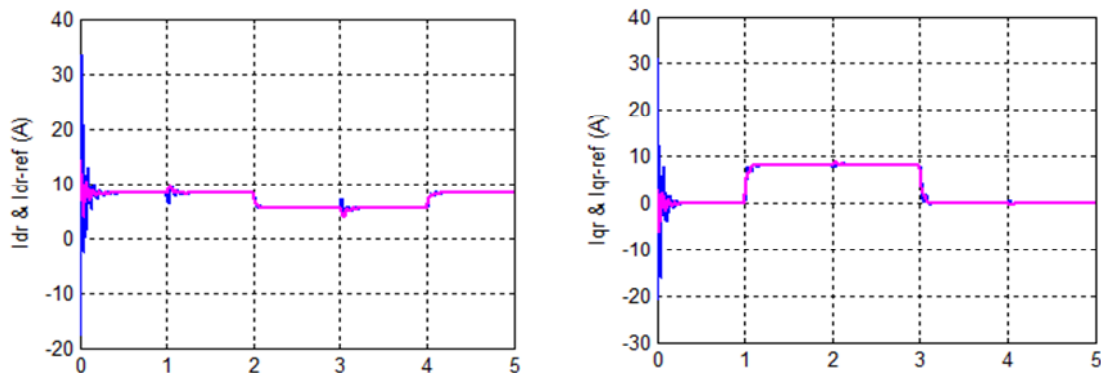


Fig.II.9: Les deux composantes du courant rotorique avec sa reference avec boucle de puissance

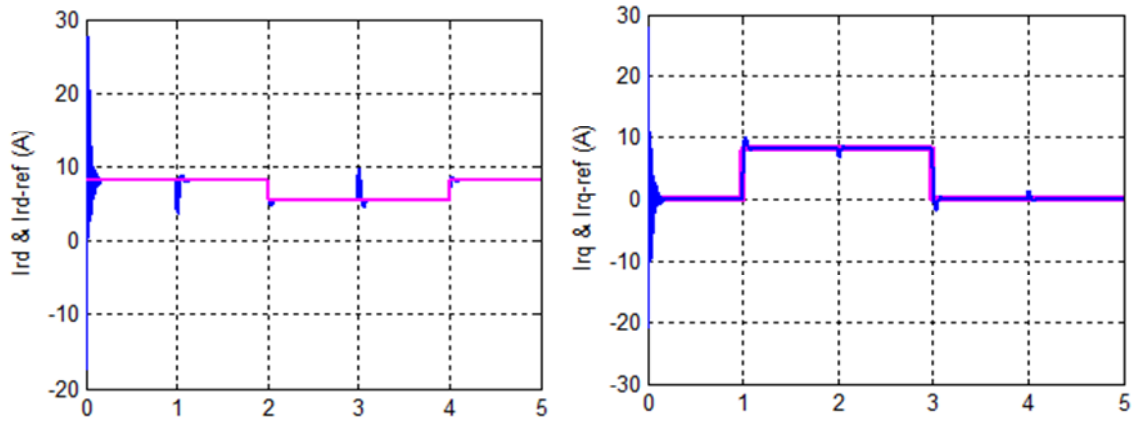


Fig.II.10: Les deux composantes du courant rotorique avec sa reference sans boucle de puissance

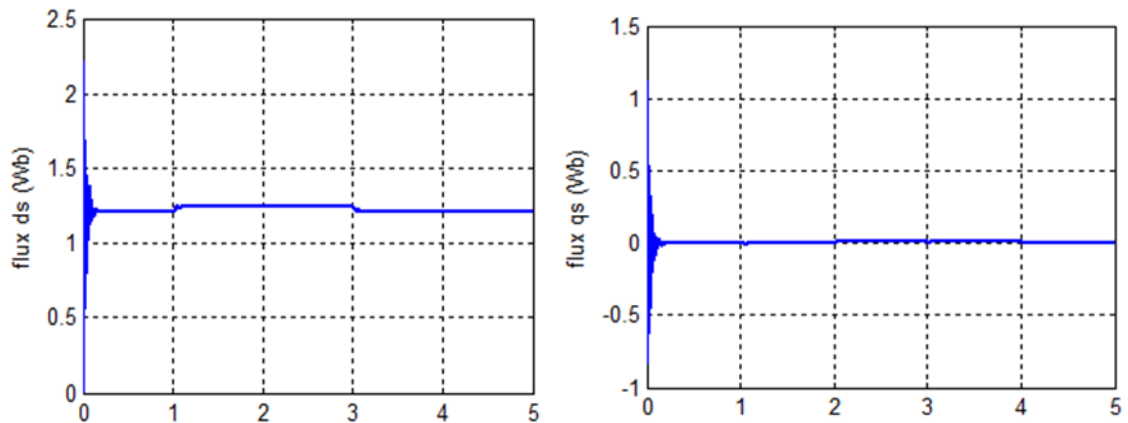


Fig.II.11: Le flux statorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance

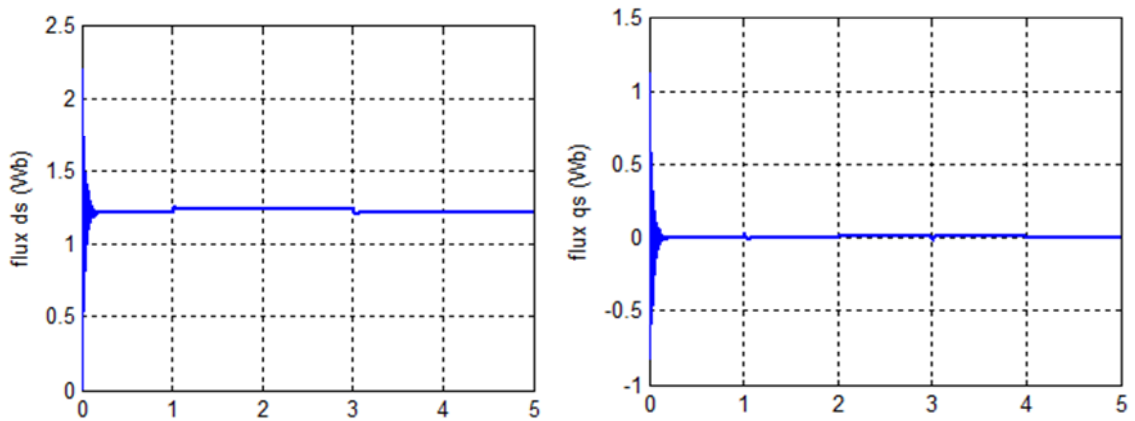


Fig.II.12: Le flux statorique selon l'axe d et q sans boucle de puissance

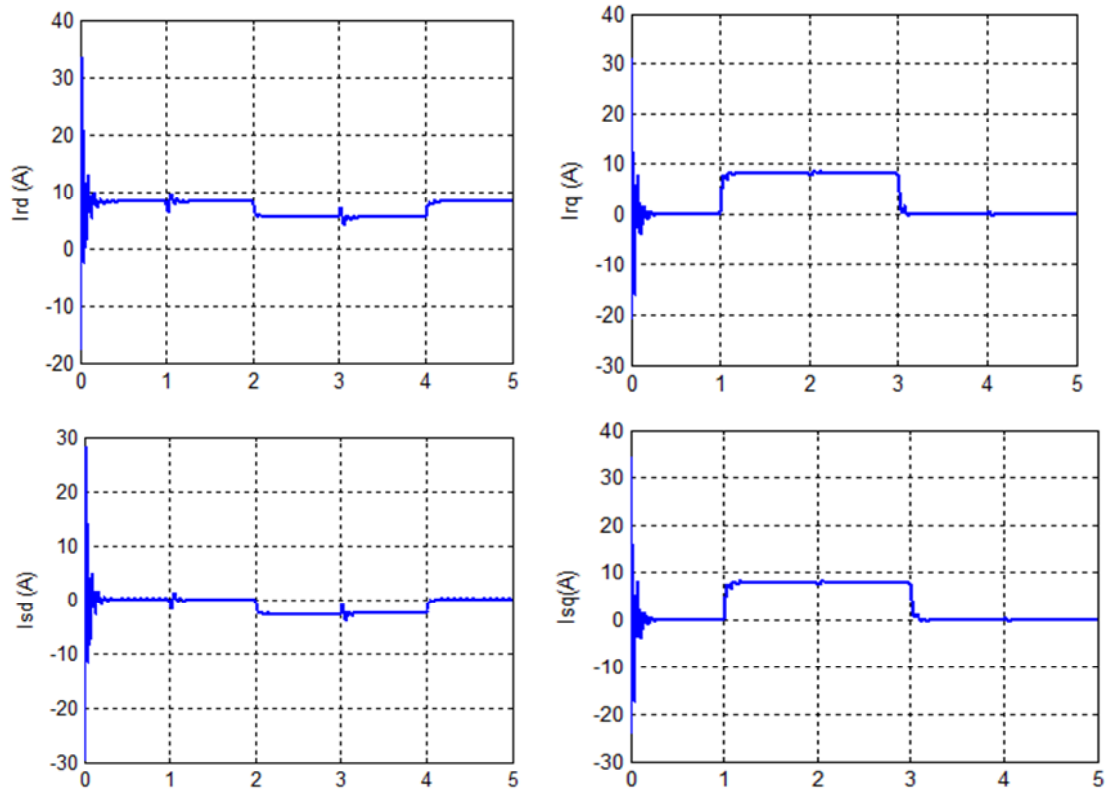


Fig.II.13: Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q avec boucle de puissance

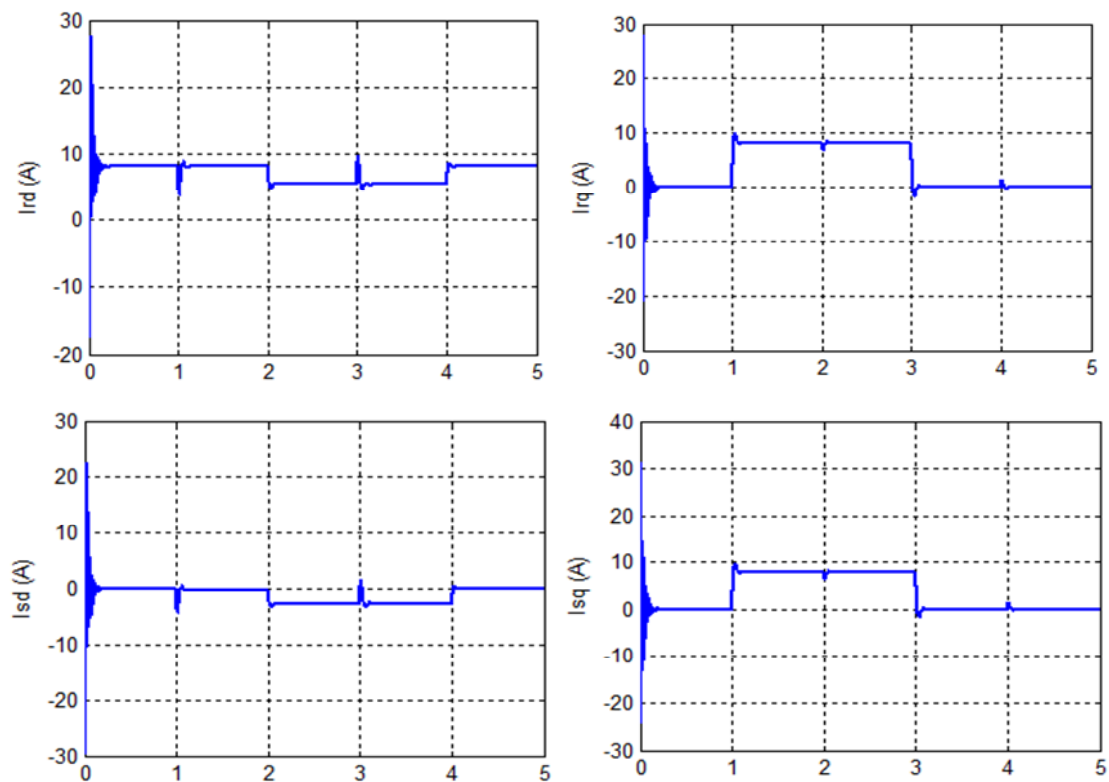


Fig.II.14: Le courant statorique et rotorique selon l'axe d et q sans boucle de puissance

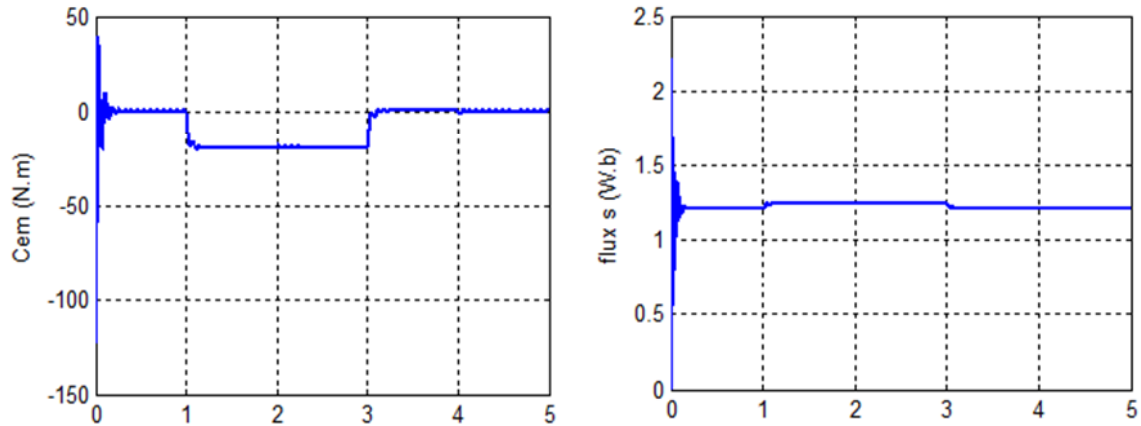


Fig.II.15: Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant avec boucle de puissance

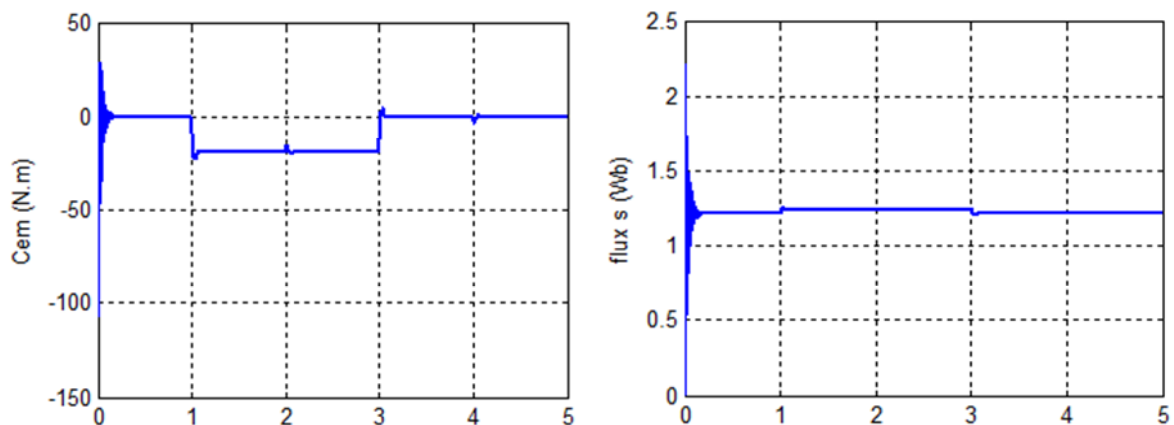


Fig.II.16: Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant sans boucle de puissance

II.6 Interprétations des résultats:

Pour évaluer et tester la technique de contrôle indirecte des puissances active et réactive par des régulateurs PI, une étude de simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB. Dans cette section, on est amené à représenter toutes les figures de simulation qui nous permettent d'évaluer les performances apportées par le système de réglage considéré pour un fonctionnement à vitesse constante. D'après ces résultats on constate que :

On obtient des bons résultats en termes de dynamique et de réponse aux consignes des puissances active et réactive imposées, comme on peut le voir sur les figures (II.7, II.8). Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application des échelons de puissance dues au couplage entre les deux axes de la machine et des fluctuations de puissance pour la méthode en boucle ouverte (sans boucle de puissance), ces oscillations et ces fluctuations de puissances sont bien compensées pour les méthodes en boucle fermée (avec boucle de puissance).

On peut remarquer aussi que le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active et ceci traduit par sa forme identique de celle de la puissance active P_s . Dans ce cas, on peut conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique.

On constate d'après la figure (II.13; II.14) que les composantes directes du courant statorique et du courant rotorique ainsi que les composantes en quadratures de ces courants présentent les mêmes allures, ce qui reflète l'équation (II.8).

II.7 conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons évalué et examiné par simulation les performances des puissances actives et réactives au niveau du stator de la GADA en mode générateur pour un fonctionnement à vitesse constante.

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que la méthode indirecte avec boucle de puissance permet d'obtenir un système de réglage performant de la GADA. Ainsi qu'elle présente l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permet d'assurer la protection de la GADA en limitant les courants.

Nous tiendrons donc la méthode indirecte avec boucle de puissance pour la commande de la GADA au sein d'un système éolien dans le reste de notre travail.

Chapitre

III

**Cascade Reresseur MLI_
Onduleur MLI_ MADA**

III.1 Introduction:

D'après la littérature de la MADA, on trouve deux types de convertisseur qui sont utilisés pour contrôler la puissance de glissement, notamment celui proposé par *Kramer* qui consiste à utiliser un convertisseur AC-AC unidirectionnel en régime hypo-synchrone et celui utilisé dans la méthode de *Scherbius* qui emploie un convertisseur bidirectionnel en régimes hypo/hyper synchrone. Pour une gamme de vitesse de fonctionnement de la GADA autour de sa vitesse de synchronisme, la génératrice asynchrone à double alimentation présente une puissance de glissement réduite et ce qui permet également de réduire les dimensions du convertisseur de puissance. [5]

Dans ce chapitre, notre étude sera basée sur la structure de "cherbius" avec convertisseurs à MLI, nous étudions la cascade : redresseur triphasé à deux niveaux-onduleur triphasé à deux niveaux connecté au rotor. Cette cascade constitue une alimentation réelle de notre machine. Pour cela, nous présenterons d'abord le modèle de l'onduleur de tension à deux niveaux et sa stratégie de commande. Ensuite, nous présenterons le modèle de redresseur de courant et en fin en entamé le modèle du filtre intermédiaire. Le redresseur est commandé par la stratégie d'hystérésis en courant, l'onduleur, lui, est commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à une porteuse bipolaire, quant à la GADA, elle est commandé par le contrôle vectoriel à flux statorique orienté ($\phi_{ds} = \phi$ et $\phi_{qs} = 0$).

III.2 Cascade Redresseur MLI - onduleur MLI – GADA:

La cascade présentée, comporte deux convertisseurs à MLI, chaque convertisseur à six interrupteurs (transistors IGBT) qui peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsion dont la modularité permet de limiter les perturbations.[13]

Dans ce cas, il est possible de contrôler l'écoulement de puissance de glissement dans les deux directions. En plus, la fréquence de sortie du côté rotorique f_r est limitée seulement par la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance qui peuvent être des GTOs , IGBTs.

Le convertisseur à deux niveaux à base des transistors IGBTs (figure III.1) est généralement utilisé aujourd'hui jusqu'à 2 à 3 MW pour une tension de sortie de 690 V par ligne.

La présence d'un grand condensateur dans le bus de tension continu a pour objectif de générer une puissance réactive contrôlable ; la haute fréquence de commutation (au-dessus de 1 kHz) permet de décaler les harmoniques du courant dans le côté rotorique vers les hautes fréquences et ce qui facilite le procédé de filtrage.

D'autre part, la commutation rapide des commutateurs de puissance prévoit une réponse très rapide des puissances active et réactive. Le convertisseur AC/AC avec un bus continu considéré, constitue une solution adéquate pour un fonctionnement de la MADA à vitesse variable dans les quatre quadrants tout en assurant son fonctionnement à une vitesse de synchronisme.[5]

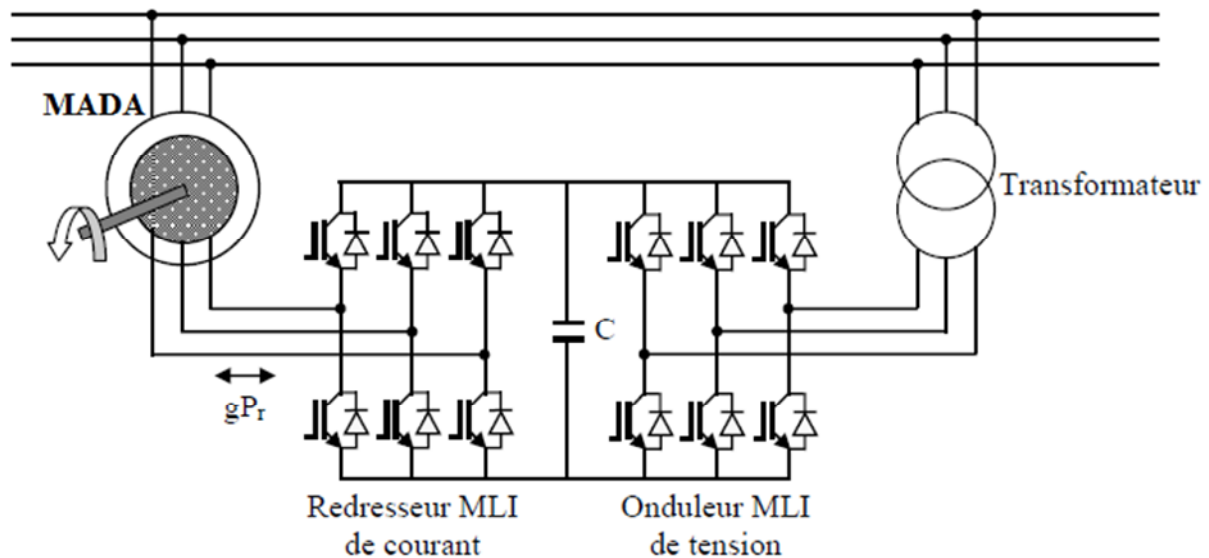


Figure. III.1 : Redresseur MLI de courant associé à un onduleur MLI de tension

III.2.1 Onduleur de tension:

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 qui génère par le redresseur est considérée constante. 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 III.2) car dans le cadre de cette étude nous avons pour but essentiellement de vérifier la faisabilité d'un système tel que décrit précédemment [6].

III.2.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé:

Un onduleur de tension triphasé est constitué de trois cellules (bras) de commutation de deux interrupteurs. Pour chaque interrupteur est formé par un transistor (ou un thyristor) monté en tête-bêche avec une diode de récupération. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuitage de la source, les interrupteurs k_{11} et k_{12} , k_{21} et k_{22} , k_{31} et k_{32} doivent être contrôlé de manière complémentaire [18].

Le schéma structurel de l'onduleur de tension alimentant le rotor de la machine asynchrone à double alimentation est donné par la figure

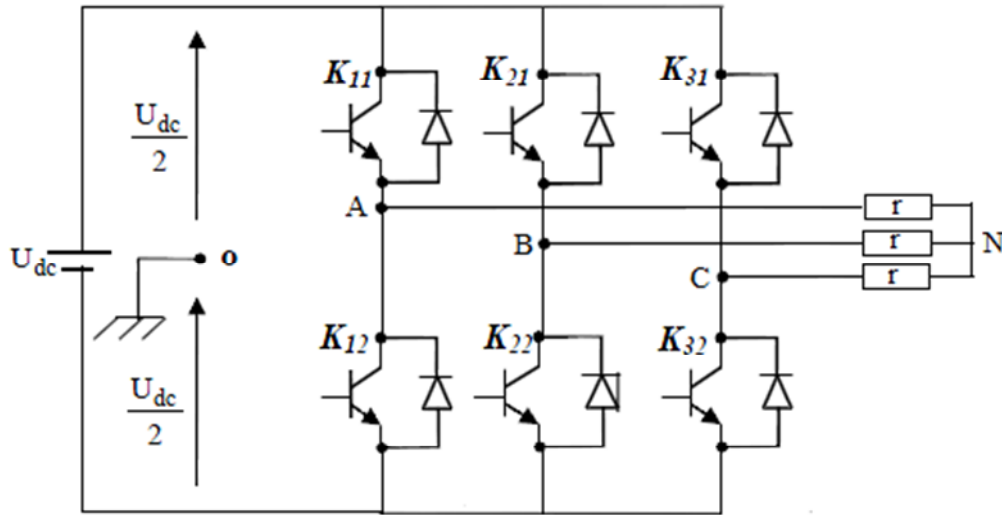


Figure. III.2 : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT.

Pour simplifier l'étude, on supposera que [25] :

- la commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable,
- la charge triphasé est équilibrée, couplé en étoile avec un neutre isolé.

D'où on présente chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel.

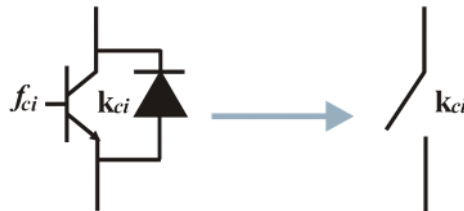


Figure. III.3 : Interrupteur bidirectionnel de paire transistor-diode

On définit la fonction de connexion f_{ci} ($c \in \{1, 2, 3\}, i \in \{1, 2\}$) comme l'état de l'interrupteur k_{ci} , on a :

$$\begin{cases} k_{11} = 1 - k_{12} \\ k_{21} = 1 - k_{22} \\ k_{31} = 1 - k_{32} \end{cases} \tag{III.1}$$

avec :

- $k_{ci} = 1$ si l'interrupteur est fermé,
- $k_{ci} = 0$ si l'interrupteur est ouvert.

L'onduleur est alimenté par une source de tension continue constante, d'amplitude « U_c ». Les potentiels des nœuds « a », « b » et « c » de l'onduleur triphasé par rapport au point milieu fictif « n » sont donnés par les tensions suivantes :

$$\begin{cases} V_{an} = k_{11} U_c \\ V_{bn} = k_{21} U_c \\ V_{cn} = k_{31} U_c \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Les tensions composés délivrées par cet onduleur sont donnés par :

$$\begin{cases} U_{ab} = U_c (k_{11} - k_{21}) \\ U_{bc} = U_c (k_{21} - k_{31}) \\ U_{ca} = U_c (k_{31} - k_{11}) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Pour une charge triphasé équilibrée, couplé en étoile avec un neutre isolé, les tensions simples sont reliés par :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (\text{III.4})$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par:

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Après arrangement les équations des deux systèmes (III.3) et (III.5), on obtient le système matricielle suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{21} \\ k_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Pour déterminer les fonctions « k_{ci} », on présentera dans ce qui suit la stratégie de commande de l'onduleur.

III.2.1.2 Commande triangulo-sinusoidale:

Le principe générale de cette stratégie est de comparer une tension de référence de fréquence f à une signale triangulo-sinusoidale (appelé porteuse) de haut fréquence f_p élevé par rapport a f . Les instants de fermeture et de blocage des interrupteurs coïncident avec les instants d'intersection des deux signaux. La fréquence de commutation est fixée par la porteuse pour déterminer les instants de commutation. Le schéma de principe est donné par la figure (III.4).[27]

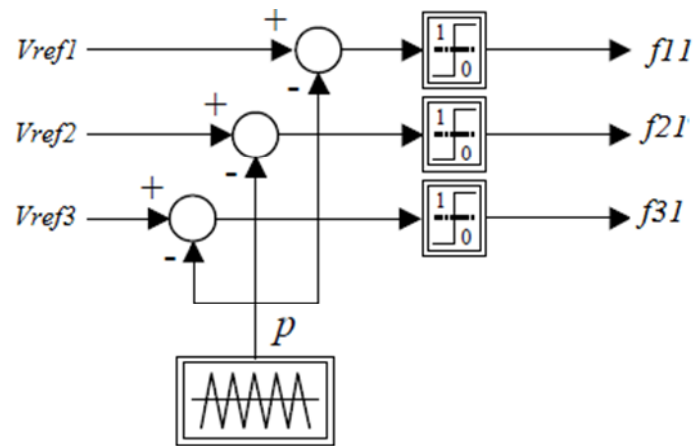


Figure III.4 : Principe de la MLI triangulo-sinusoidale

La figure suivante représente la porteuse bipolaire et les tensions de référence et la commande des interrupteurs pour ($m=6, r=0.8$)

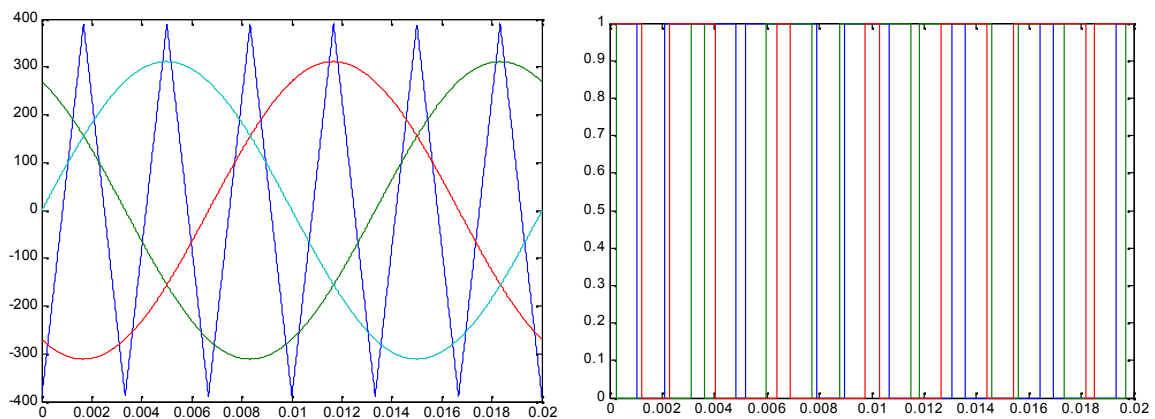


Figure. III.5 : Illustration de MLI triangulo-sinusoidale

Les tensions de référence sont définies par :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \cdot \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} = V_m \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.7)$$

La porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left(\frac{4t}{T_p} - 1 \right) & \text{si } 0 < t < \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left(-\frac{4t}{T_p} + 3 \right) & \text{si } \frac{T_p}{2} < t < T_p \end{cases} \quad (III.8)$$

Dans le cas où les tensions de référence sont sinusoïdales, deux paramètres caractérisent cette modulation:

- L'indice de modulation "**m**" défini comme étant le rapport de la fréquence **f_p** de la porteuse à la fréquence **f** de la tension de référence $m = \frac{f_p}{f}$
- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension "**r**" comme étant le rapport de l'amplitude **V_m** de la porteuse et de la tension **U_{pm}** de référence $r = \frac{V_m}{U_{pm}}$

Notez que l'augmentation de **m** rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées et donc facilite le filtrage. Mais **m** est limité par le temps de commutation des interrupteurs et donc par la largeur minimale des impulsions.

Alors, le choix de **m** procède d'un compromis entre la neutralisation des harmoniques et le rendement de l'onduleur.

III.2.2 Redresseur MLI de courant:

Un redresseur à MLI de courant est alimenté par une source de courant sinusoïdale, débite sur un récepteur de tension continu. Il a donc la structure d'un onduleur de tension. Dans ce cas, le réseau peut être assimilé à une source de **f.é.m** sinusoïdales **e_A**, **e_B**, **e_C** en série avec des inductances pour que l'entrée du redresseur soit alimentée par une source de courant et pour

que l'ondulation de la tension de sortie U_{red} soit faible malgré le caractère haché du courant I_{red} , on monte une capacité aux bornes du récepteur.[18].

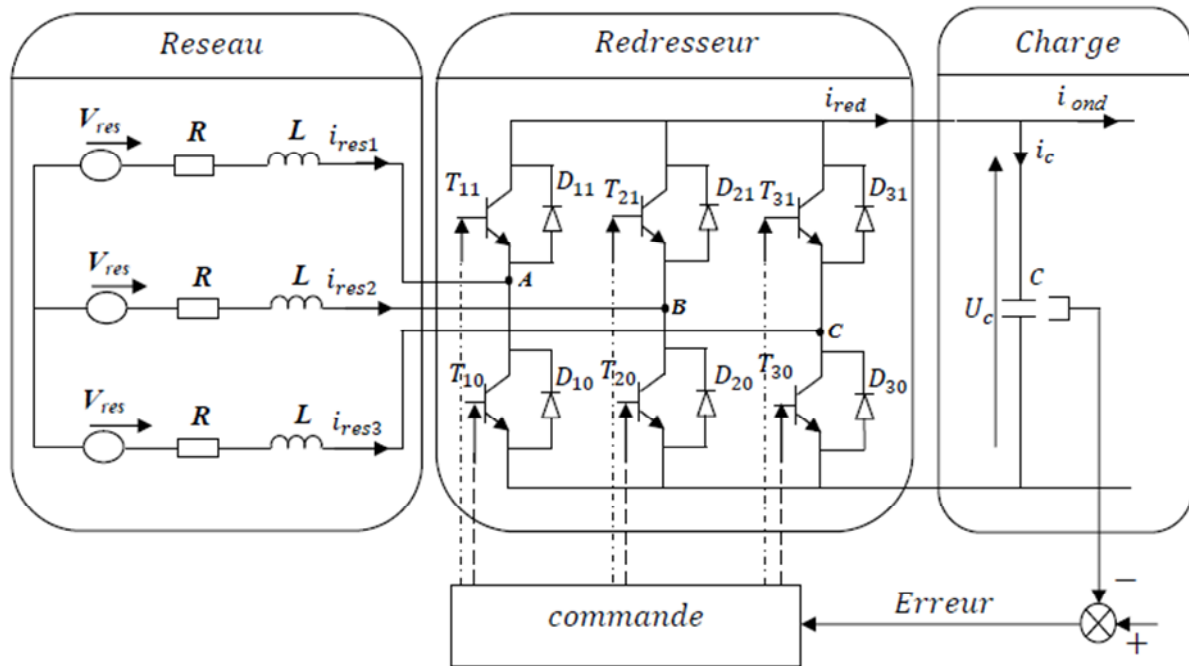


Figure. III.6 : Redresseur MLI de courant triphasé

III.2.2.1 Principe de fonctionnement :

Le redresseur de type pont de Gatz est constitué de transistors IGBT comprenant chacun une diode en antiparallèle d'une manière à assurer la continuité des courants de sources.

Le redresseur à MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur.

La tension de sortie d'un redresseur à MLI est toujours supérieure à sa tension d'entrée.

Le principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI est de garder la tension à la sortie du redresseur égale à une valeur de référence désirée, en utilisant une boucle d'asservissement comme représenté sur la figure (III.6). Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence U_c .

Le signal d'erreur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur. De cette façon, l'énergie peut venir ou retourner à la source alternative s'accordant avec les conditions de la tension de sortie de redresseur mesurée aux bornes du condensateur C [26].

Ce type de convertisseur peut opérer en redresseur ou en onduleur. Quand le courant I_{ch} est positif (opération redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur

demande au bloc de commande plus d'énergie à partir du réseau, le bloc de commande prend l'énergie d'alimentation en produisant des signaux appropriés à l'amorçage des transistors.

De cette façon l'écoulement de courant du côté alternatif vers le côté continu, ainsi, la tension de condensateur est récupéré.

Inversement, quand I_{ch} devient négatif (Opération Onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande à la commande la décharge du condensateur et renvoyé l'énergie vers le réseau.

L'avantage de la commande MLI ne s'arrête pas au contrôle de la puissance active, mais la puissance réactive également, permettant à ce type de convertisseur de corriger le facteur de puissance du réseau. Ainsi, la commande MLI nous permet d'avoir une bonne qualité de signal, ramenant le contenu harmonique vers des fréquences élevées et par la suite la facilité de filtrage.[13]

III.2.2.2 Modélisation de Redresseur [17,18]:

La Figure précédente donne les trois étages du circuit de puissance, le réseau, la charge et le convertisseur à MLI, chaque étage sera présenté par la suite :

❖ La source d'alimentation :

La source est modélisée par une FEM triphasée sinusoïdale en série avec une inductance L et une résistance R qui représentent l'impédance totale de la ligne.

On suppose le réseau équilibré, avec les mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de ligne sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{res1} = R.i_{res1} + L \frac{di_{res1}}{dt} + v_{an} \\ v_{res2} = R.i_{res2} + L \frac{di_{res2}}{dt} + v_{bn} \\ v_{res3} = R.i_{res3} + L \frac{di_{res3}}{dt} + v_{cn} \end{cases} \quad (III.9)$$

Où V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur.

Et les courants de chaque phase du réseau sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{res1} - v_{an} \\ v_{res2} - v_{bn} \\ v_{res3} - v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

❖ Le redresseur à MLI:

Il est représenté au schéma de la Figure (III.6). Les IGBT et les diodes constituant le pont sont supposées idéales. C'est à dire que l'on néglige les phénomènes de commutation. Il est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F_{i1}

$$F_{i1=1} \quad \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert}$$

$$F_{i1=0} \quad \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé}$$

Connaissant l'état de chaque interrupteur, on peut définir la matrice de connexion du pont.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Où v_{dc} la tension continue a la sortie de redresseur à MLI.

De même on peut exprimer le courant continu i_{dc} en fonction des courants d'entrées.

$$i_{dc} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

❖ Modélisation du bus continu

Cet étage est constitué d'une capacité C (pour diminuer les ondulations de la tension redressée).

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitif [13].

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} I_c \quad (\text{III.13})$$

Le courant du condensateur est :

$$I_c = I_{red} - I_{ond}$$

Plusieurs stratégies de commande sont possibles pour les redresseurs du courant à deux niveaux. Dans notre étude on utilise la commande par hystérésis en courant dont l'algorithme est représenté par la figure (III.7)

III.2.2.3 Commande du redresseur en courant par hystérésis:

Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références [26] comme indique la figure (III.7) .

En utilisant la commande par hystérésis en courant dont l'algorithme est le suivant :

$$\text{Si } \varepsilon_k \geq \Delta_i \Rightarrow B_{ki} = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon_k \leq -\Delta_i \Rightarrow B_{ki} = 1$$

On désigne par ε l'écart entre le courant de référence i_{ref} et le courant réel i_{rel}

$$\varepsilon = i_{refk} - i_{relk}$$

Δ : La largeur de la bande d'hystérésis

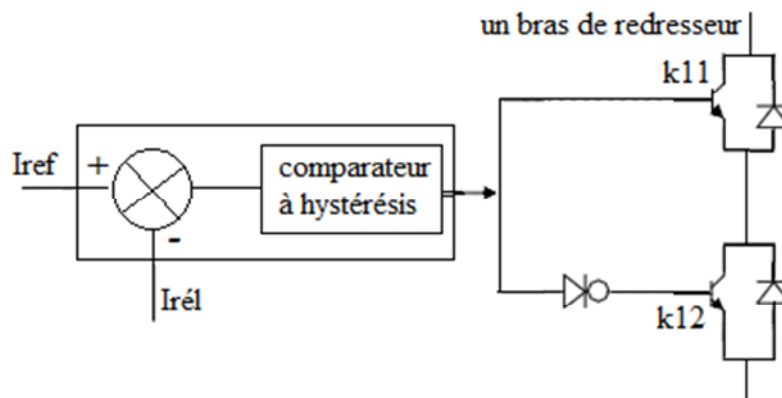


Figure. III.7 : Principe du contrôle par hystérésis

Avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes, la modélisation de la boucle de tension est basée sur le principe de conservation de la puissance instantanée. Cette boucle impose la valeur efficace du courant de référence du réseau [2]

Puissance d'entrée :

$$P_e = \sum_{k=1}^3 (V_{resk} \cdot I_{resk} - R \cdot I_{resk}^2 - \frac{1}{2} \frac{dI_{resk}^2}{dt}) \quad (\text{III.14})$$

Puissance de sortie :

$$P_s = U_{red} \cdot I_{red} = U_{red} (I_c + I_{ch}) \quad (\text{III.15})$$

En applique le principe de la conservation de la puissance et négligeant les pertes dissipée par effet joule dans la résistance R du réseau, on peut écrire :

$$P = \sum_{k=1}^3 V_{resk} \cdot I_{resk} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \frac{dI_{resk}^2}{dt} = U_{red} \cdot I_{red} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$$V_{resk} = \sqrt{2} V_{eff} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}(k-1)) \quad (\text{III.17})$$

$$I_{resk} = \sqrt{2} I_{eff} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}(k-1)) \quad (\text{III.18})$$

En supposant les courants du réseau sinusoïdaux et en phase avec leurs tensions V_{resk} correspondantes, on peut écrire :

$$U_{red} \cdot I_{red} = U_c I_{red} = 3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (\text{III.19})$$

On obtient:

$$I_{red} = \frac{3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff}}{U_c} \quad (\text{III.20})$$

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitive :

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{c} I_c \Rightarrow I_c = c \frac{dU_c}{dt} = I_{red} - I_{ch} \quad (\text{III.21})$$

$$\Rightarrow c \cdot U_c \cdot p = I_{red} - I_{ch} \quad (\text{III.22})$$

$$U_c = \frac{1}{c.p} I_c \tag{III.23}$$

Le modèle de la boucle de tension du redresseur triphasé à deux niveaux est présenté sur la Figure (III.9)

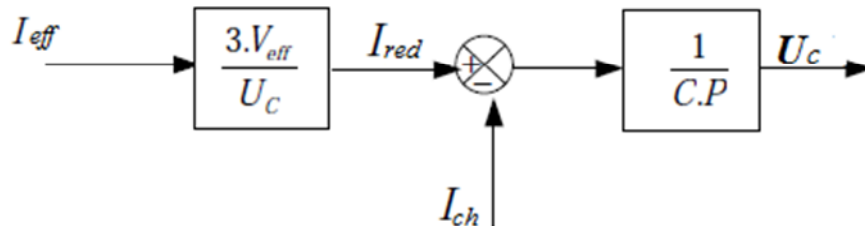


Figure III.9: Modèle de la tension du redresseur triphasée à deux niveaux

La représentation sous forme d'un schéma bloc du dispositif de commande est donnée sur la figure (III.10)

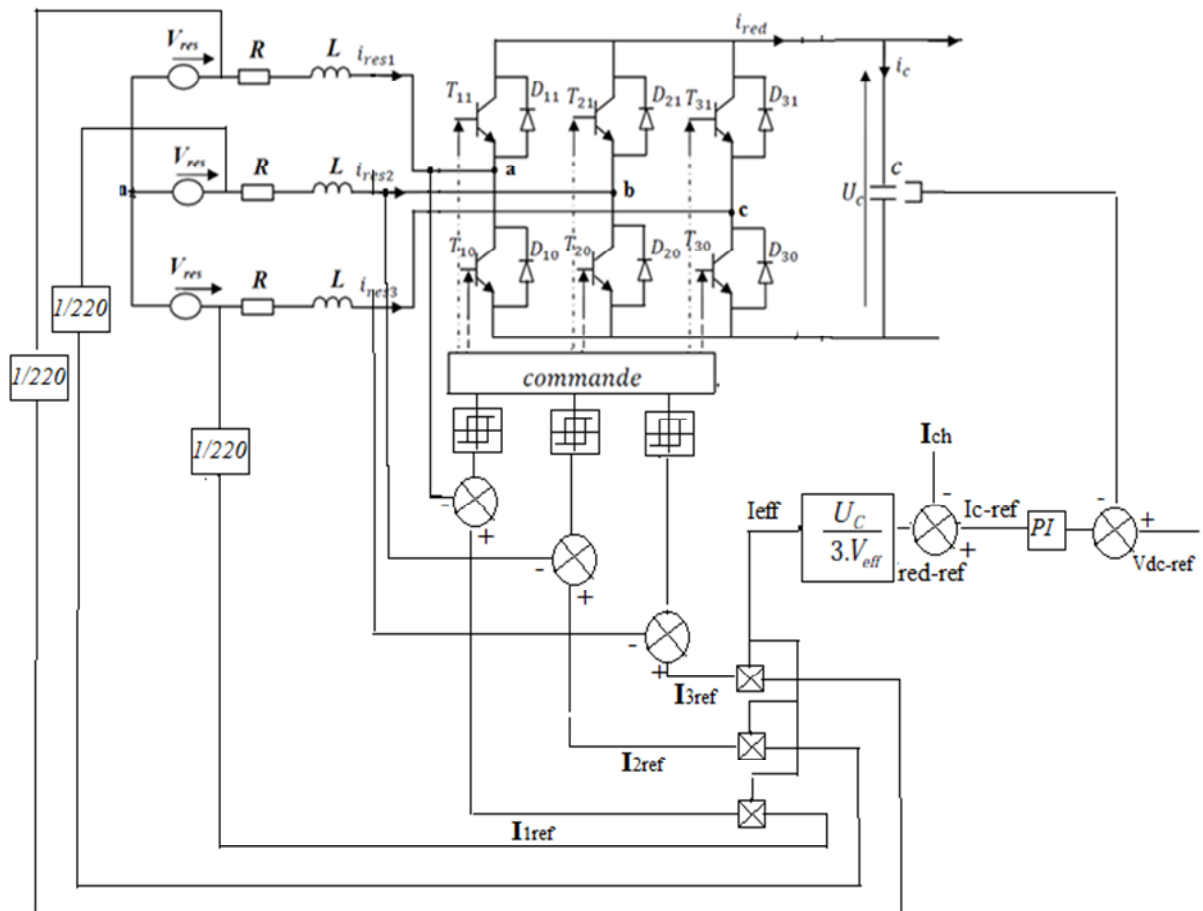


Figure III.10 : Schéma bloc du principe de la régulation du redresseur de courant en hystérésis

III.3 Résultats de simulation:

Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la conduite de la MADA alimentée par une cascade. Le redresseur MLI à deux niveaux coté réseaux commandé par la stratégie à hystérésis en courant, et l'onduleur MLI à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale, avec un démarrage à vide puis avec application d'une puissance active $P = -3000\text{W}$ entre $t=1\text{s}$ et $t=3\text{s}$, et une puissance réactive $Q=1000\text{VAR}$ entre $t=2\text{s}$ et $t=4\text{s}$.

Pour $m=21$:

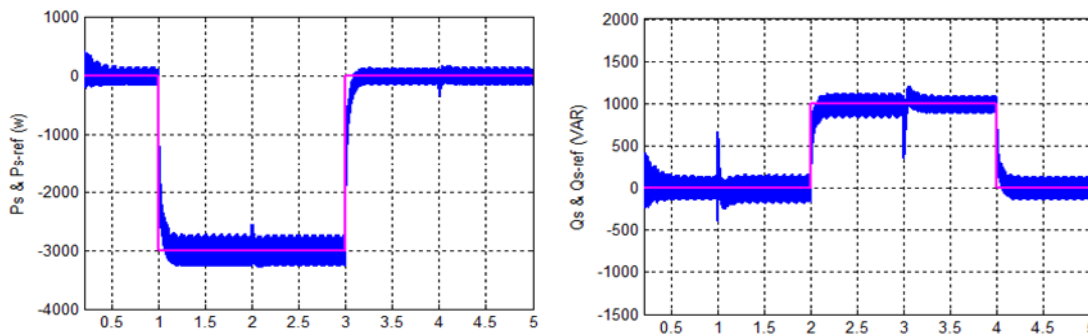


Figure. III.11 : La puissance active et réactive statorique avec leur référence

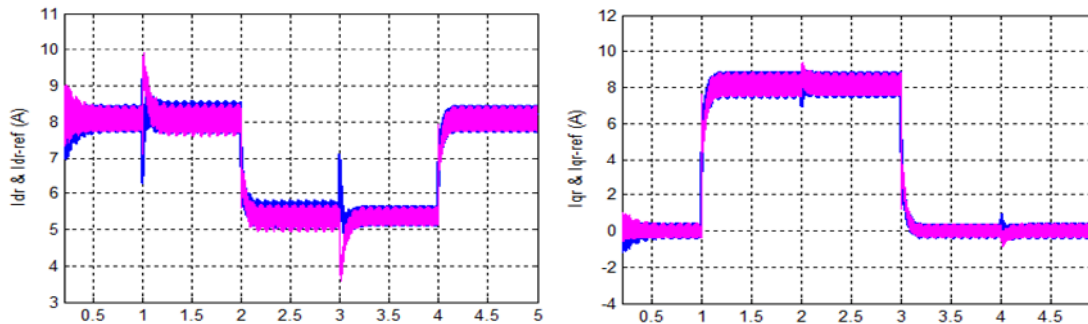


Figure. III.12 : les deux composantes du courant rotorique avec leur référence

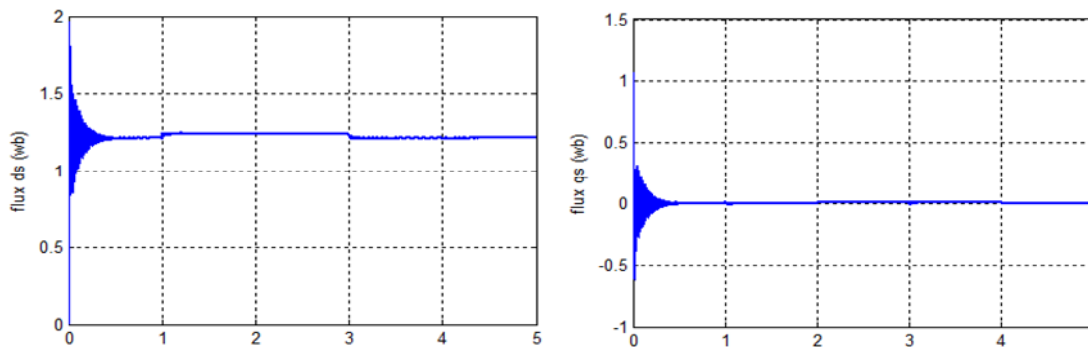


Figure. III.13 : Le flux statorique selon l'axe d et q

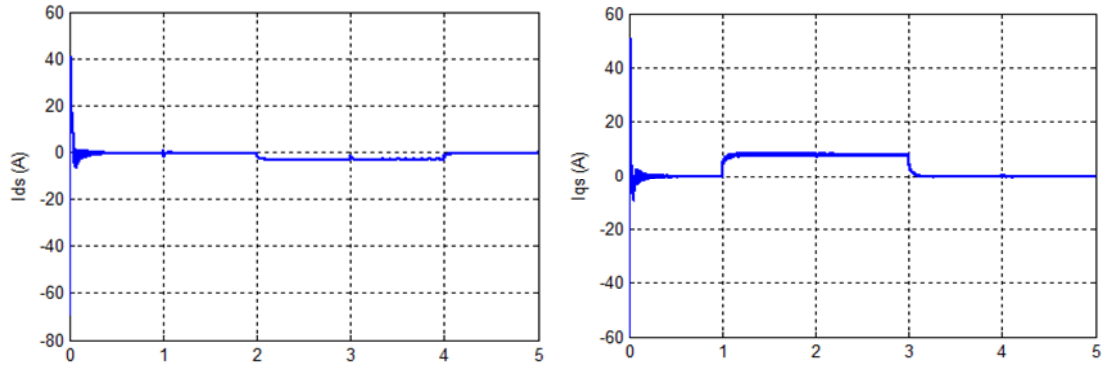


Figure. III.14 : Le courant statorique selon l'axe d et q

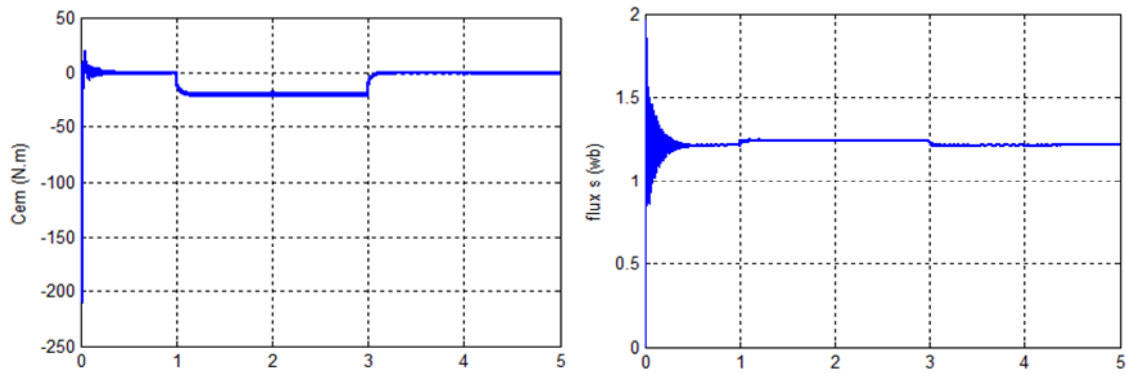


Figure. III.15 : Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant

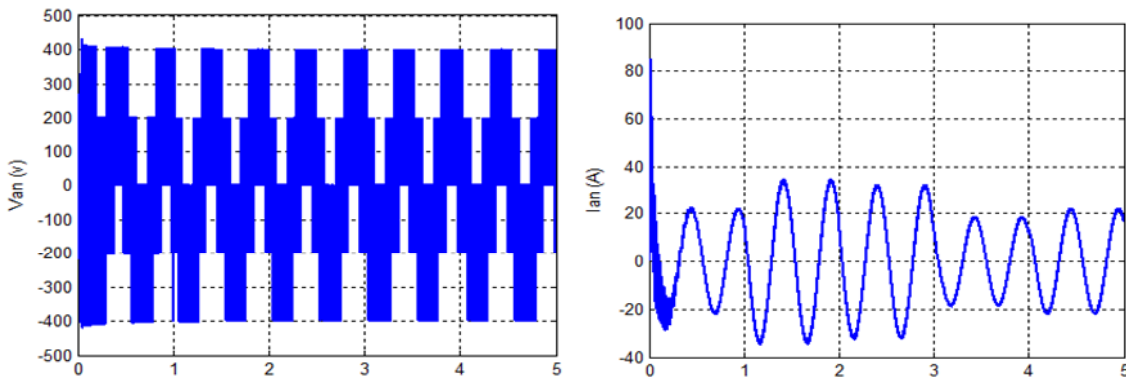


Figure. III.16 : La tension et le courant d'un première phase de l'onduleur

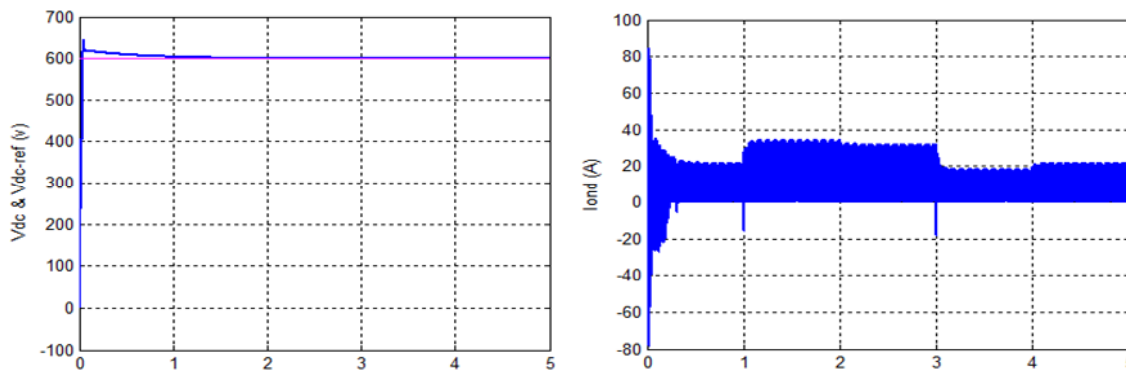


Fig. III.17: La tension Vdc et le courant ondulé

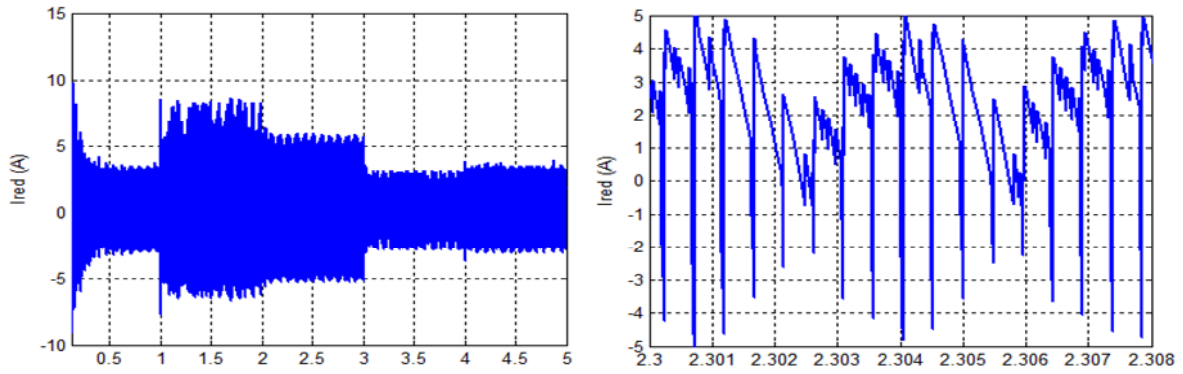


Figure. III.18: Le courant redressé avec un zoom

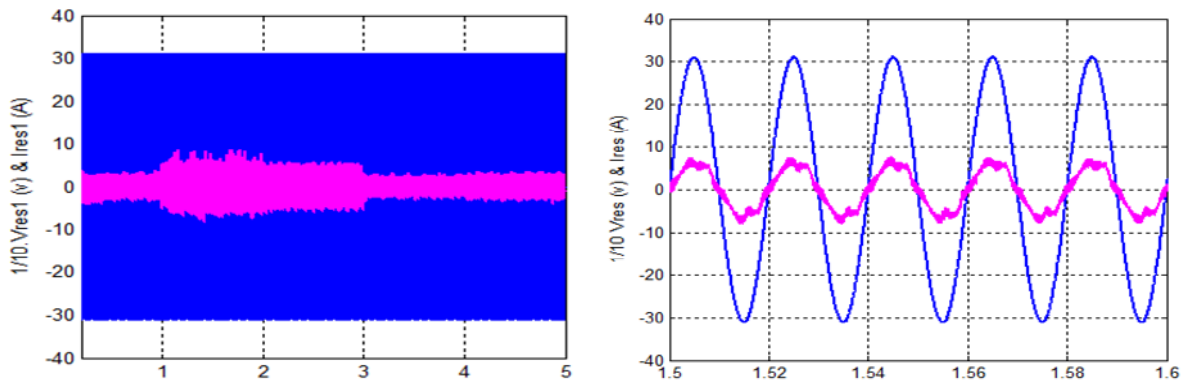


Figure. III.19: Tension de réseau et sont courant avec un zoom

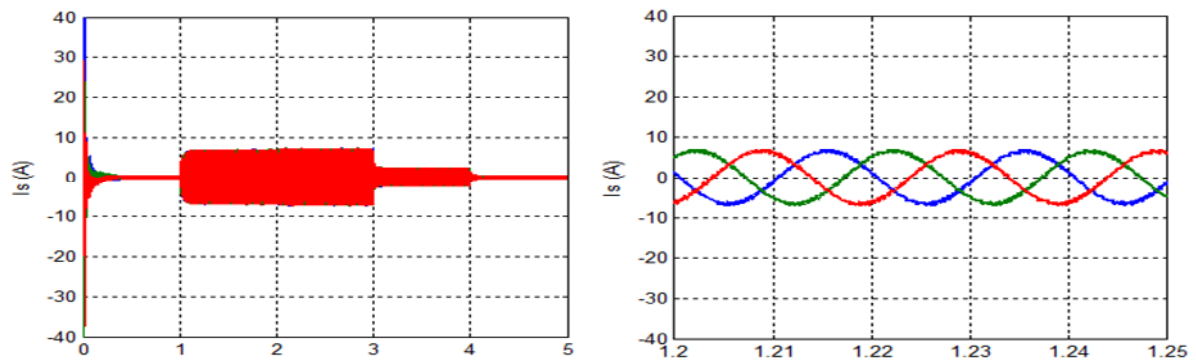


Figure. III.20: Le courant statorique avec un zoom

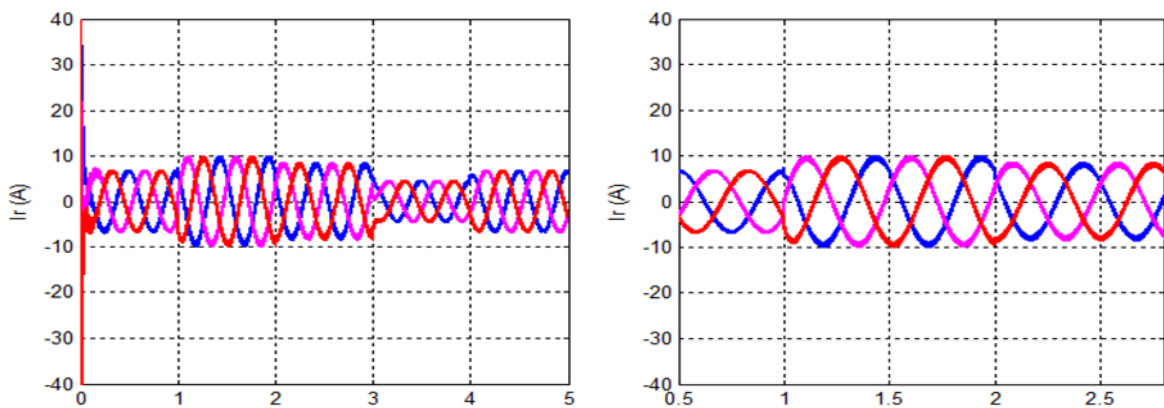


Figure. III.21: Le courant rotorique avec un zome

Pour $m=36$:

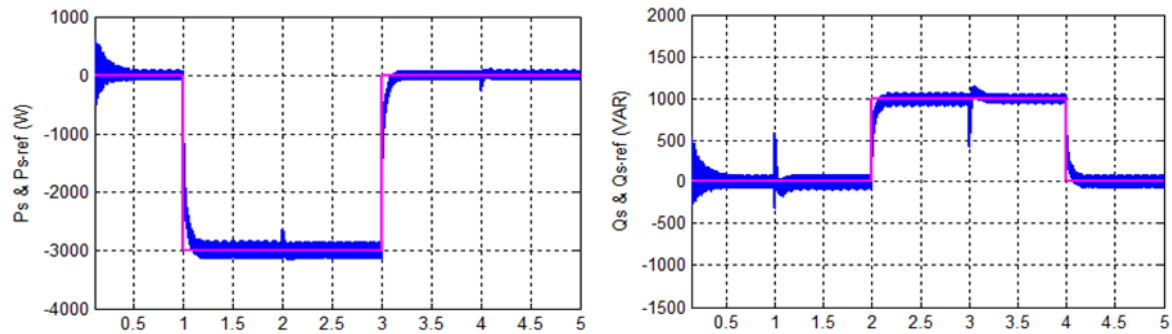


Figure. III.22 : La puissance active et réactive statorique avec leur référence

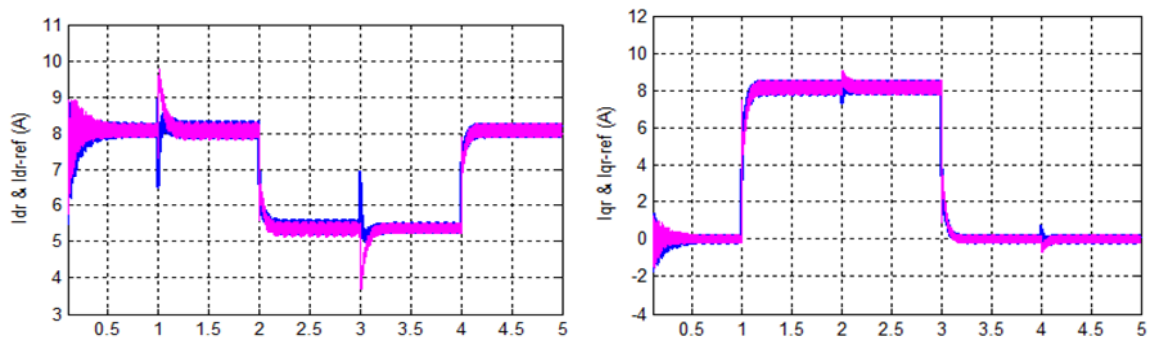


Figure. III.23 : les deux composantes du courant rotorique avec leur référence

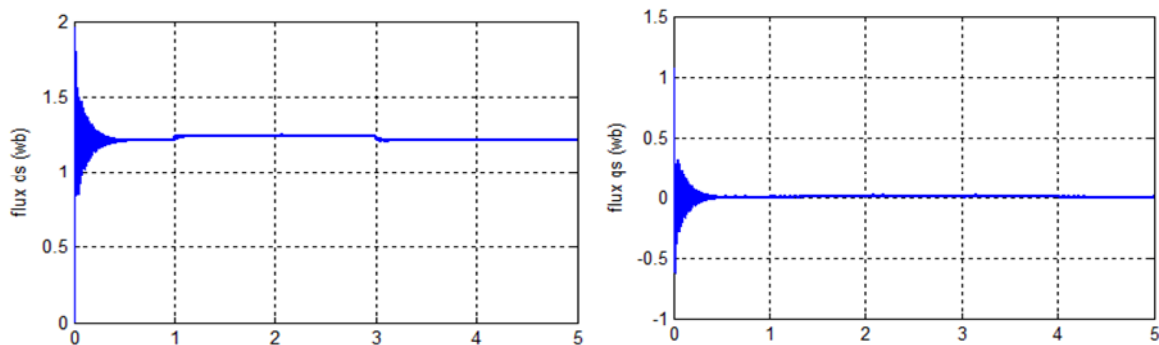


Figure. III.24 : Le flux statorique selon l'axe d et q

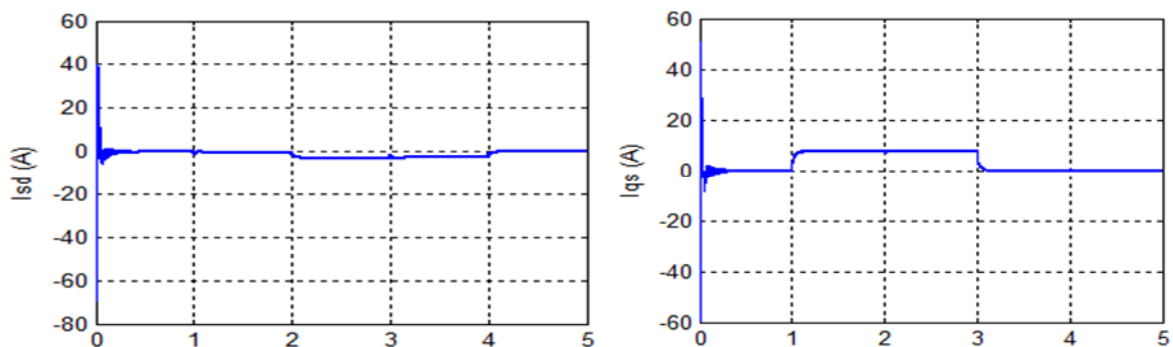


Figure. III.25 : Le courant statorique selon l'axe d et q

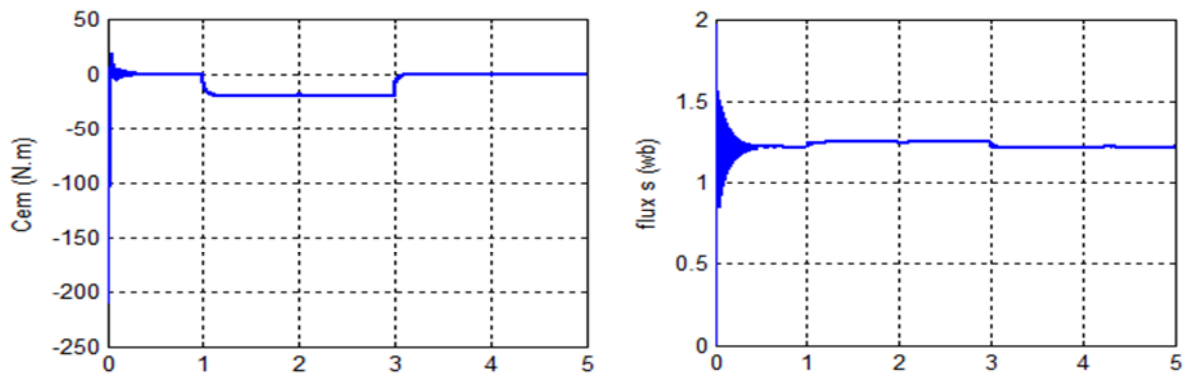


Figure.III.26 : Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant

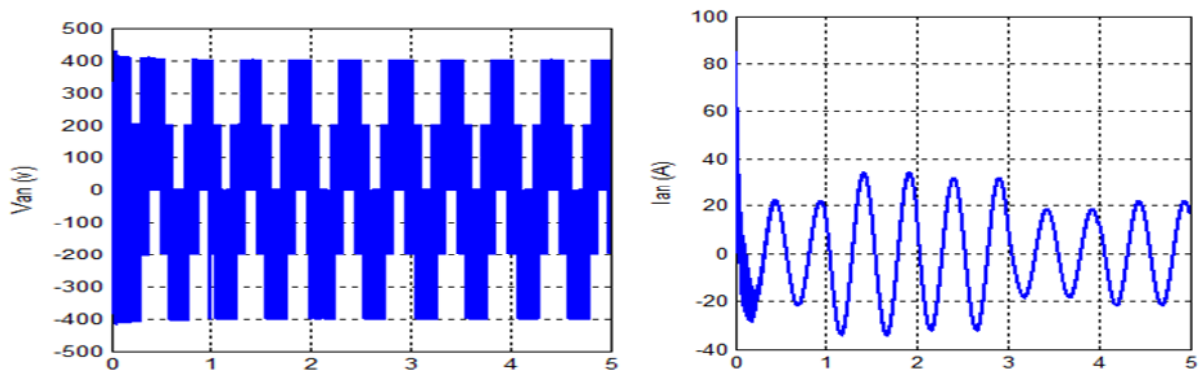


Figure.III.27 : La tension et le courant d'un premiere phase de l'onduleur

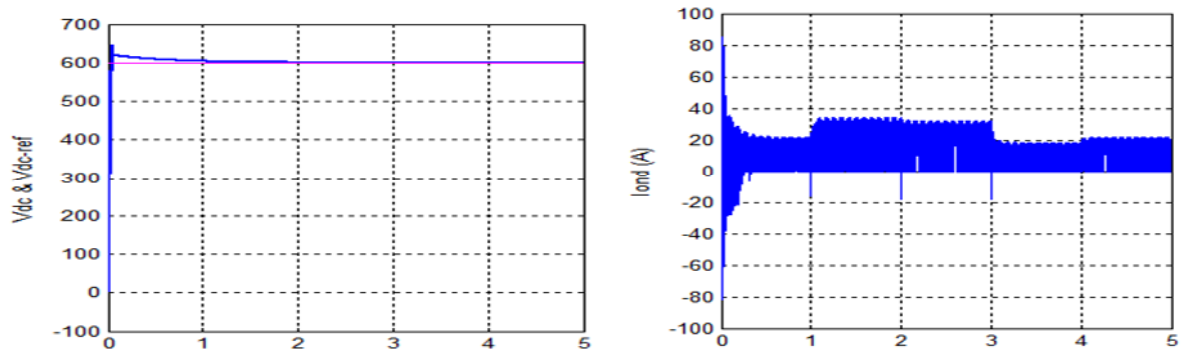


Fig.III.28: La tension Vdc et le courant ondulé

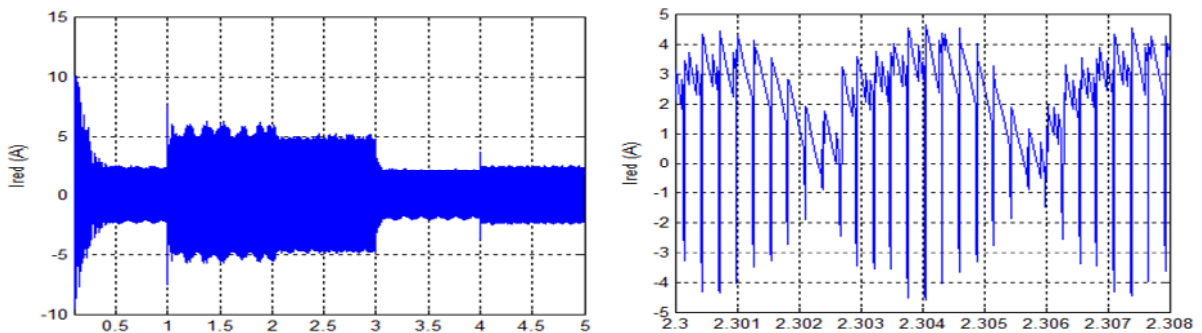


Figure. III.29: Le courant redressé avec un zoom

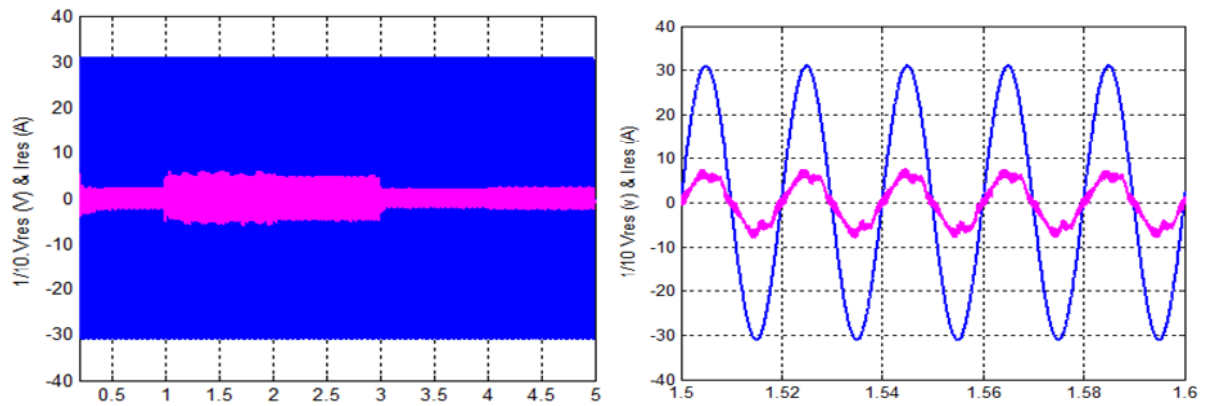


Figure.III.30: Tension de réseau et sont courant avec un zoom

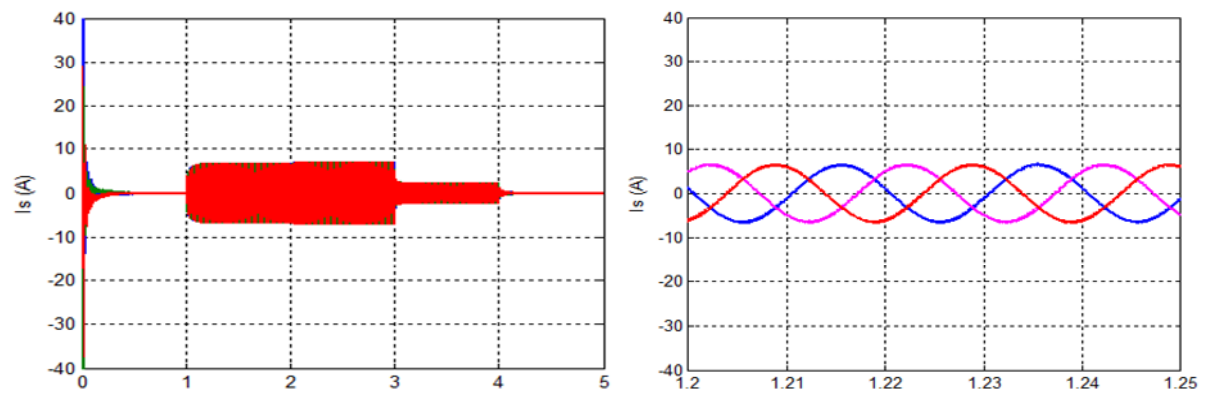


Figure. III.31: Le courant statorique avec un zoom

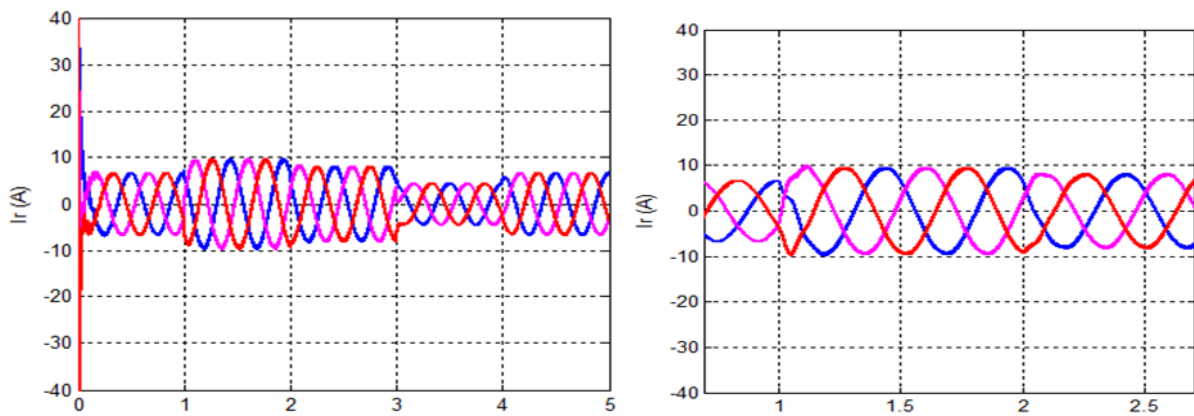


Figure. III.32: Le courant rotorique avec un zome

Pour $m=48$:

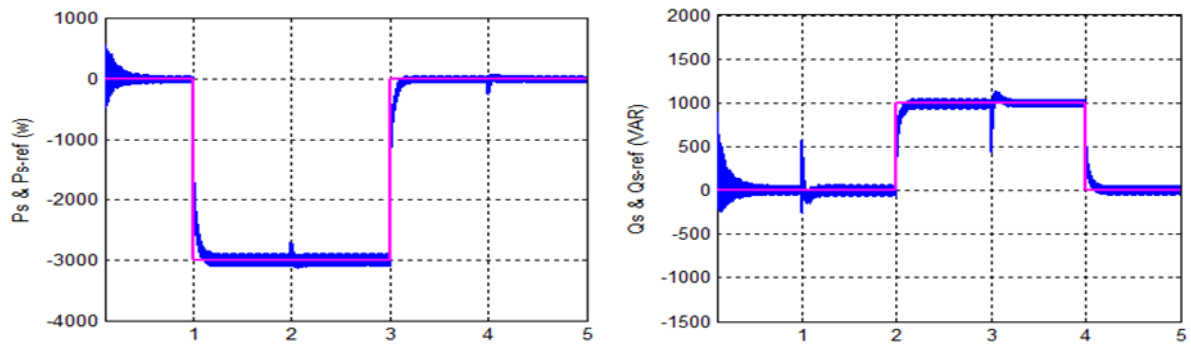


Figure. III.33: La puissance active et réactive statorique avec leur référence

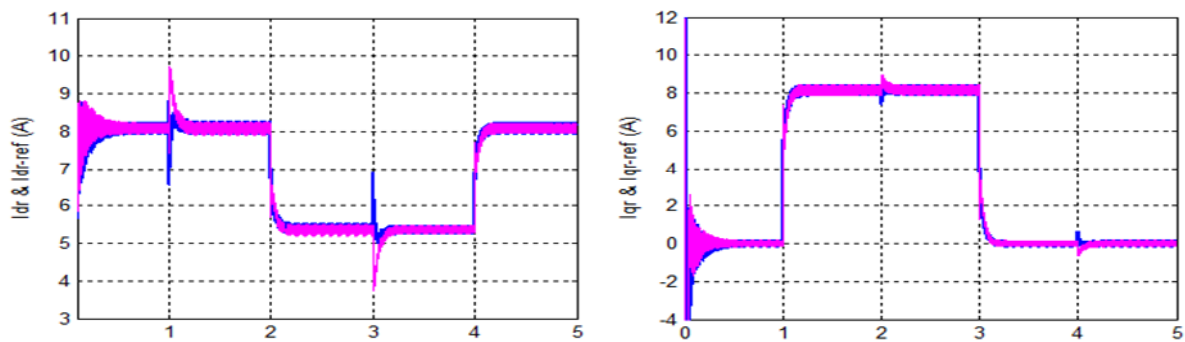


Figure .III.34: les deux composantes du courant rotorique avec leur référence

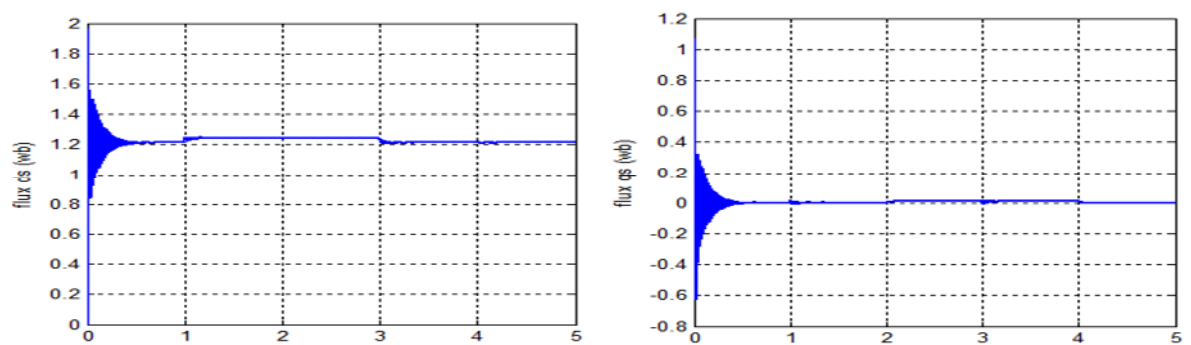


Figure. III.35: Le flux statorique selon l'axe d et q

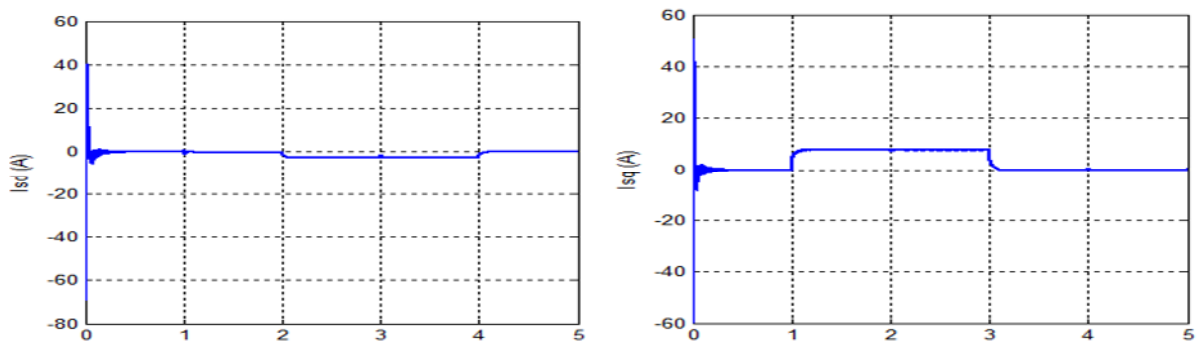


Figure. III.36 : Le courant statorique selon l'axe d et q

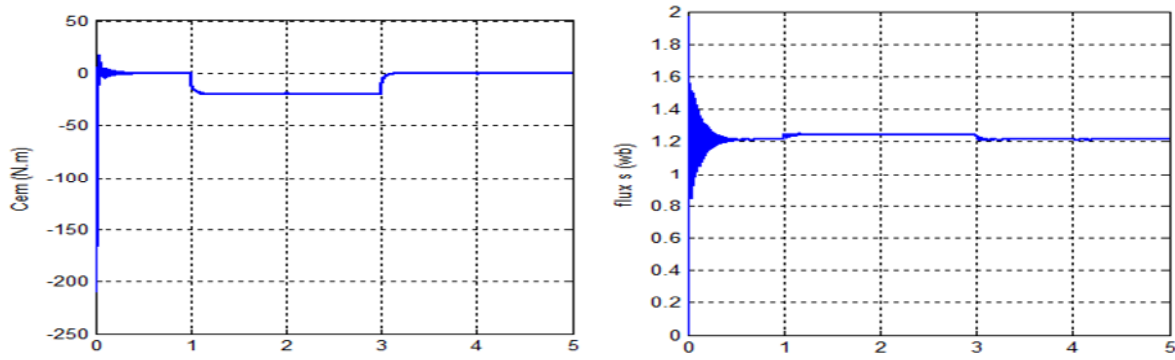


Figure.III.37 : Le couple électromagnétique et le flux statorique résultant

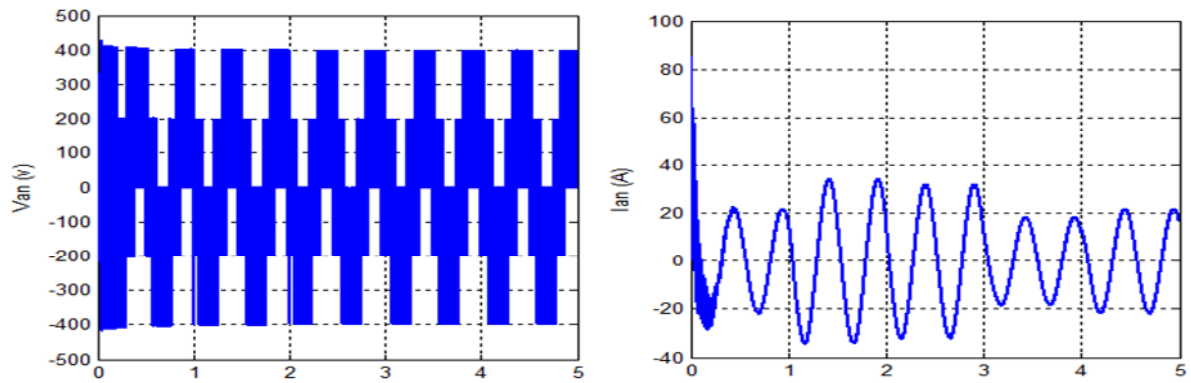


Figure.III.38 : La tension et le courant d'un premiere phase de l'onduleur

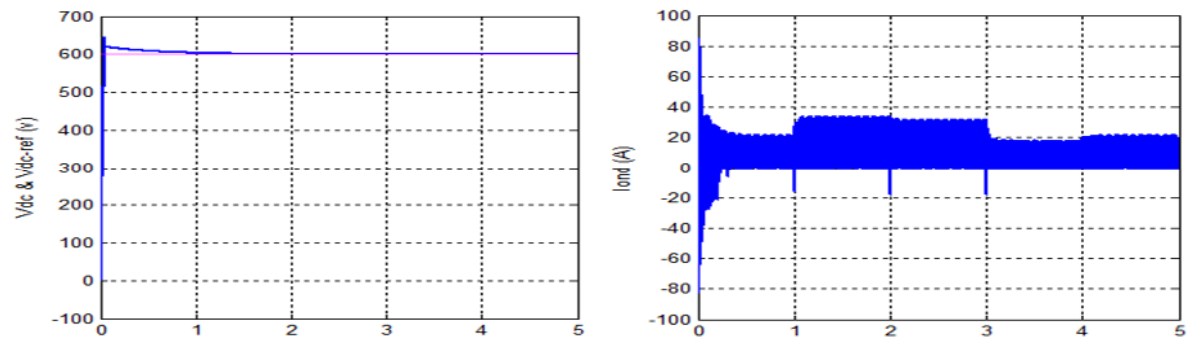


Fig.III.39 : La tension Vdc et le courant ondulé

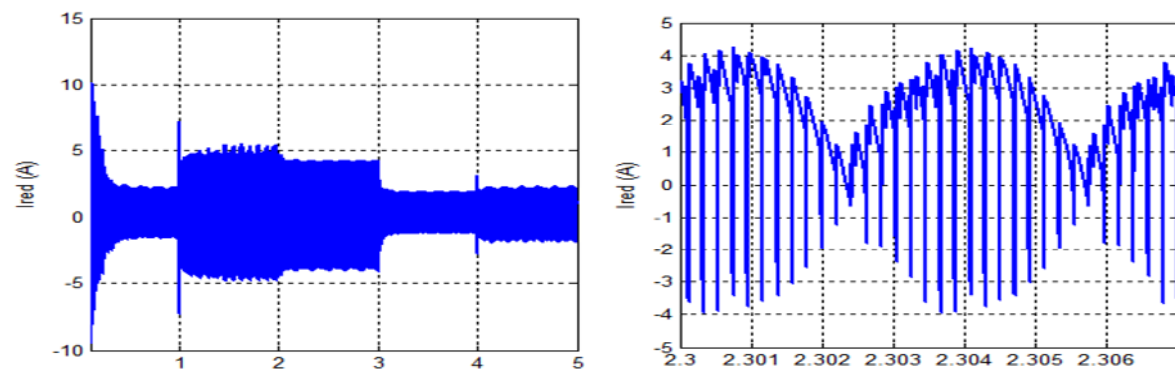


Figure. III.40 : Le courant redressé avec un zoom

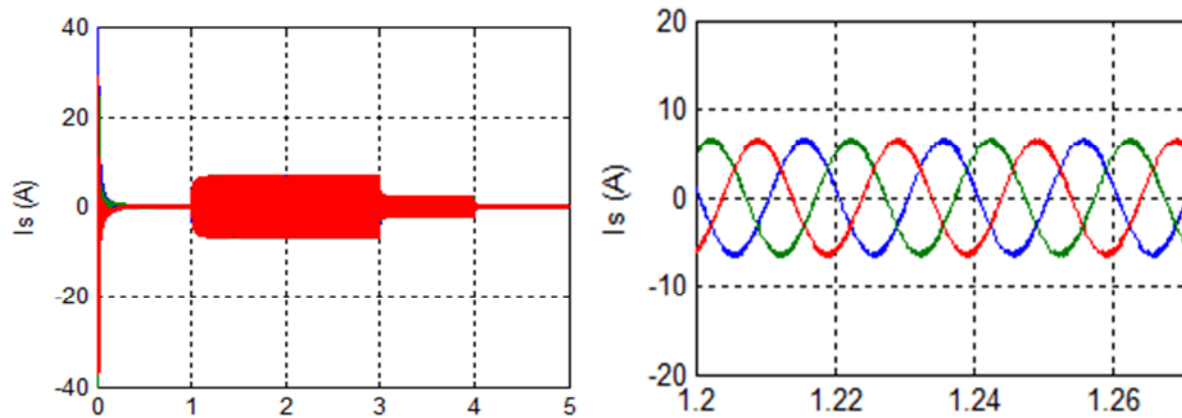


Figure. III.41 : Le courant statorique avec un zoom

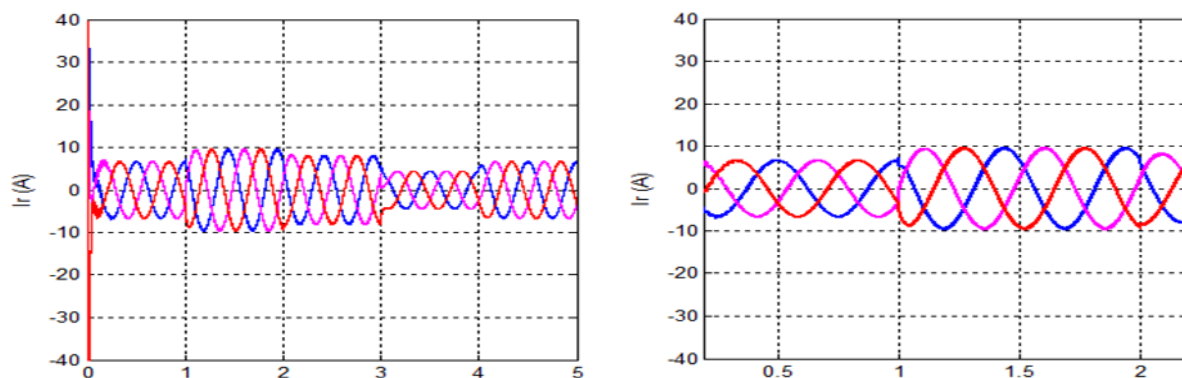


Figure. III.42 : Le courant rotorique avec un zome

III.4 Interprétation des résultants:

Les figures précédentes montrent les variations des différentes grandeurs lorsque l'onduleur rotorique est pris en compte dans les simulations.

- ❖ Un bon suivi de consigne pour les puissances actives et réactives statorique et les courants i_{dr} et i_{qr} s'identifient à leurs références.
- ❖ Le couple électromagnétique atteint au démarrage une valeur maximale de -200N.m
- ❖ La fréquence des courants rotoriques vaut $g.fs$
- ❖ Les courants du réseau est en phase avec les tensions de réseau.
- ❖ La tension à la sortie de l'onduleur est à deux niveaux ou son amplitude dépend de la valeur de la tension du bus continu qui est 600V . On remarque que la tension d'entrée de l'onduleur (tension de bus continu U_c) à deux niveaux atteint sa référence.

III.5 Conclusion:

Dans ce chapitre ont été étudiés les différents composants de la cascade liant le réseau au rotor de la MADA. Il a été d'abord établi une étude sur l'onduleur de tension alimentant le rotor. Celui-ci est à deux niveaux et commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) à une porteuse. Cet onduleur est lui-même alimenté par un bus continu dont la valeur de la tension est maintenue égale à 600 V grâce à un redresseur de courant. Ce dernier est commandé par une MLI à hystériser. Pour ne pas dégrader la qualité du réseau il faut y injecter un courant sinusoïdal en phase avec la tension. Ceci n'est possible qu'en imposant une référence adéquate à la commande à hystérésis. Cette référence doit prendre en compte le maintien de la tension du bus continu à la valeur voulue. Pour cela, une commande est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation.

De manière générale, il est constaté que le but de cette commande est atteint car la tension du bus continu se stabilise autour d'une valeur proche de celle de sa référence. La GADA suit les consignes des puissances actives et réactives. La préservation de la qualité du réseau est vérifiée à travers un courant injecté par la cascade qui est sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Il est ainsi possible de dire que cette commande est applicable dans un dispositif liant la GADA, la cascade (Redresseur, bus continu et onduleur) et la turbine éolienne. Cette étude sera effectuée dans le chapitre suivant en établissant une commande adaptée permettant d'avoir le meilleur rendement possible.

Chapitre

IV

**Asservissement de la chaîne
éolienne**

IV .1) Introduction:

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, Il existe deux grandes familles d'éoliennes, celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation [2]. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées [3]. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle), et électriquement (Machine électrique associé a électronique de commande) [13].

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la turbine éolienne ainsi qu'à sa contrôle. Puis, à l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

IV .2) 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 (Figure IV.1). [16]

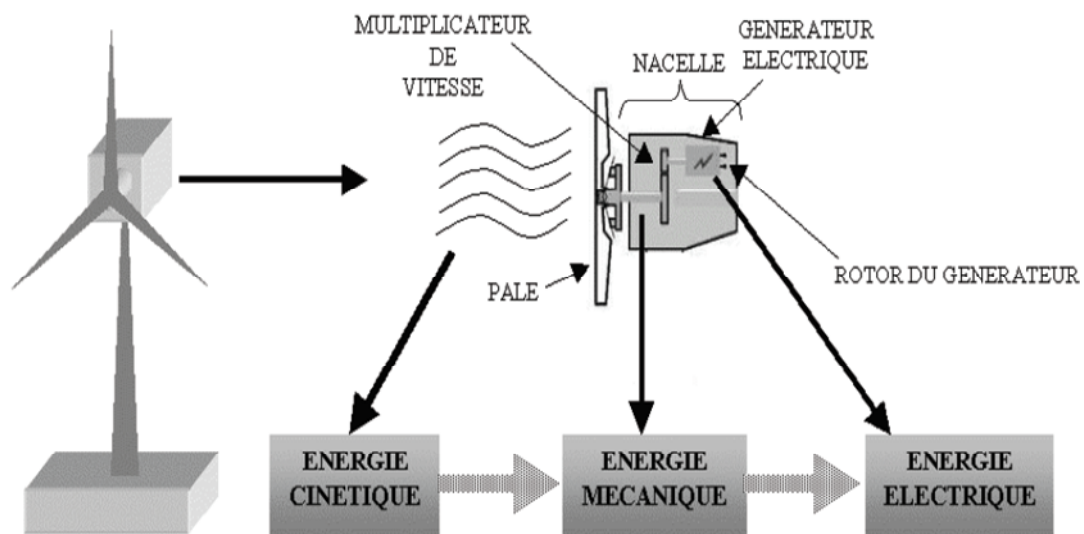


Figure. IV.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée 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 mats et des pales de grandes dimensions [1].

IV .3) Principe de fonctionnement d'une éolienne:

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse de seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage, l'éolienne et commence à tourner. Une puissance P_V est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine.

On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques.[13]

IV .4) Les différent type des éoliennes:

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal [22].

a- Les éoliennes à axe vertical :

ces types d'éoliennes a fait l'objet de nombreuses recherches .Dans ce type l'arbre est perpendiculaire au sol ; il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice)au niveau du sol, donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance ; mais elle présente certaines caractéristiques pénalisantes : elle ne peut pas démarrer seule(nécessité d'un dispositif de lancement), les pales sont plus chères à construire et engendre un niveau de bruit important ;faible rendement aérodynamique, et grand sensibilité de C_p à la vitesse et provoquée une fluctuations importantes de puissance.

Toutes ces raisons ont conduit à l'abandon de la technologie des éoliennes à axe vertical figure (IV.2). Il existe deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de 'Savonius' et le rotor de 'Darrieus' [6].



Fig. IV.2.a : Éolienne à axe verticale type Darrieus

Fig. IV.2.b : éolienne à axe verticale type Savonius

b- Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employée, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ce type d'éoliennes l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilise pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolienne. figure (IV.3) [2].



Figure IV.3 : éolienne à axe horizontal

IV .5) les Principaux composants des éoliennes à axe horizontal:

L'éolienne à axe horizontale (Figure IV.4), étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

- **La tour:** C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- **La nacelle:** Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :
 - Arbre.
 - Multiplicateur.
 - Roulements.
 - Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
 - Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
 - Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle.
- **Les pales:** Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- **Le moyeu:** C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent [6].

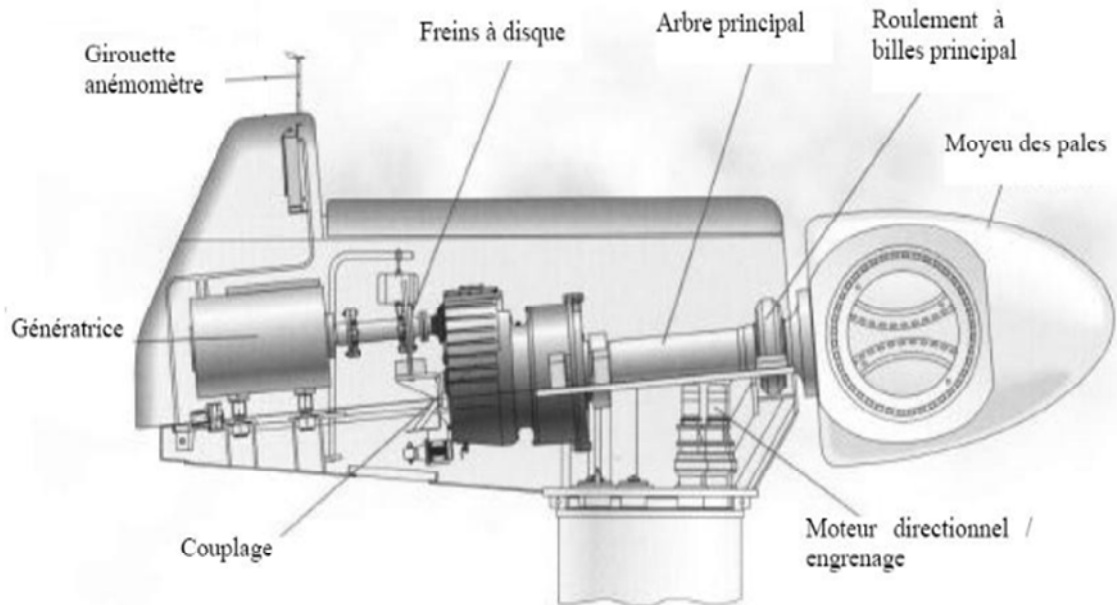


Figure. IV.4: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne.

IV .6) Conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique:[6]

a) Loi de Betz:

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales sont placés dans un air animé à l'infinie amont d'une vitesse V_1 et à l'infinie aval d'une vitesse V_2 .

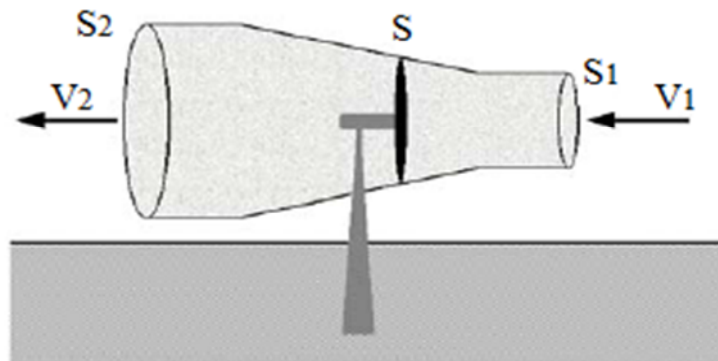


Figure. IV.5: Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (IV.5) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

Désignant par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit:

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = S V \quad (\text{IV.1})$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER:

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{IV.2})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{IV.3})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie Cinétique E_c de la masse d'air qui le traverse:

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2} \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{IV.4})$$

On en déduit:

$$V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (\text{IV.5})$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (IV.2) et (IV.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{IV.6})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{IV.7})$$

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{IV.8})$$

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

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2}) \cdot (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)^2}{2} = C_p \quad (\text{IV.9})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (IV.9), on s'aperçoit que le ratio

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \text{ appelé aussi coefficient de puissance } C_p \text{ présente un maximum de } \frac{16}{27} = 0.59$$

(Figure IV.6) 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 expérimentalement 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.

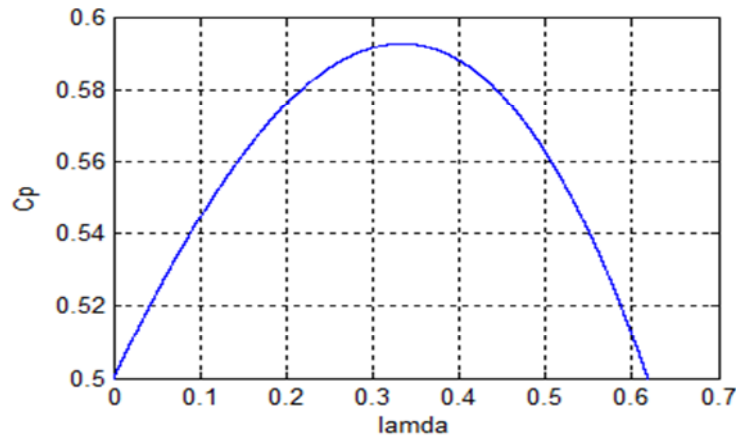


Figure. IV.6: Coefficient de puissance.

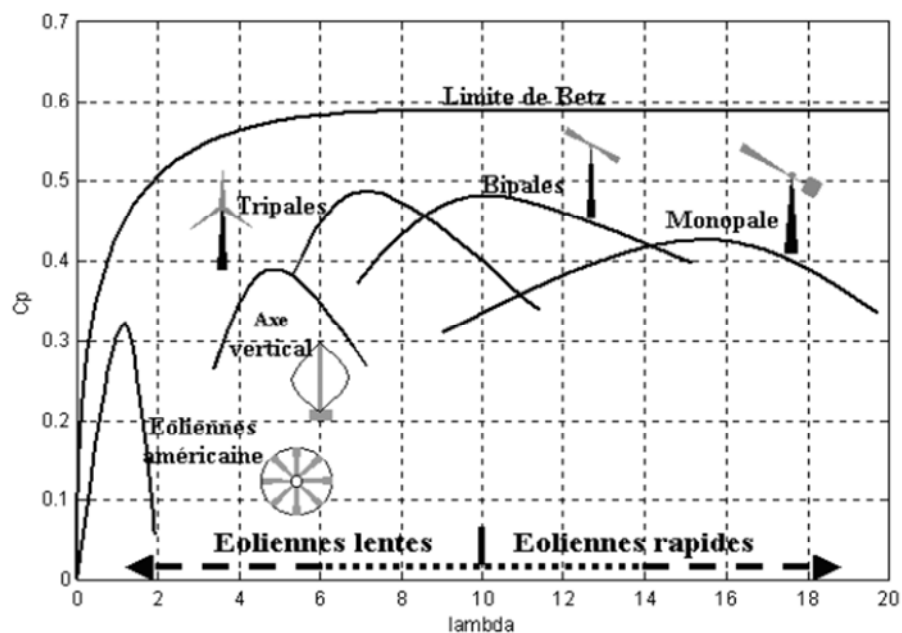


Figure. IV.7: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

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.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur, de plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [2].

b) Production d'énergie mécanique [6]:

En combinant les équations (IV.8) et (IV.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right) \cdot P_{mt} = C_p(\lambda) \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{IV.10})$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G \cdot V_1} \quad (\text{IV.11})$$

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

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.

IV .7) Intérêt de la vitesse variable:

On donne sur la figure (IV.8) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

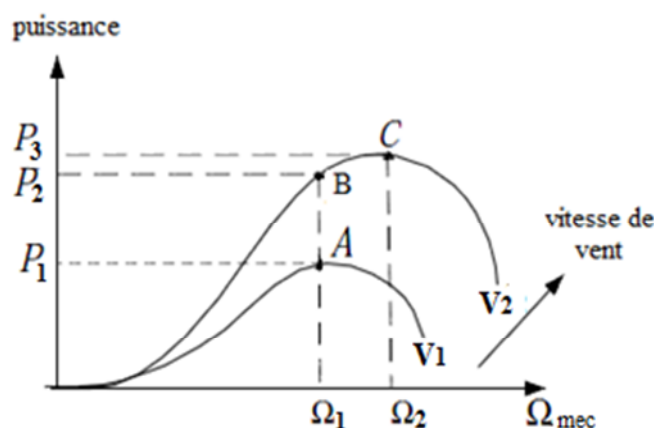


Figure. IV.8 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent

Pour une vitesse du vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence Ω_{ref} calculée pour maximiser la puissance extractible [2,8].

Pour faire mieux apparaître l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent on s'intéresse à la modélisation de la turbine.

IV .8) Modélisation de convertisseur éolienne:

La turbine étudiée comprend trois pales identiques. Elles sont fixées à un arbre d'entraînement qui est relié à un multiplicateur de rapport G . Le multiplicateur entraîne le générateur électrique à travers un arbre.

En considérant que la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales d'où une égalité des forces d'entraînement, nous pouvons remplacer les pales par un même système mécanique. Celui-ci comprend la somme des caractéristiques mécaniques des trois pales.

On obtient alors un modèle global composé de trois sous-systèmes [6] :

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

❖ Modélisation de la turbine

Le vent de vitesse V , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_{aero} [3], s'exprimant par:

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (IV.12)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique, sa valeur dépend de celle de la vitesse relative de l'éolienne (λ).

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 4 kW pour notre simulation.

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas, son évolution en fonction de λ est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques kW. Suite à ces observations, ses variations sont modélisées par l'approximation suivant:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.3)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{IV.13})$$

Avec:

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{V_1} \quad (\text{IV.14})$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (IV.9). La valeur maximale de C_p ($C_{p_{\max}} = 0.5$) est atteinte pour $\beta = 2$ et $\lambda = 9.2$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt}

Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [2]

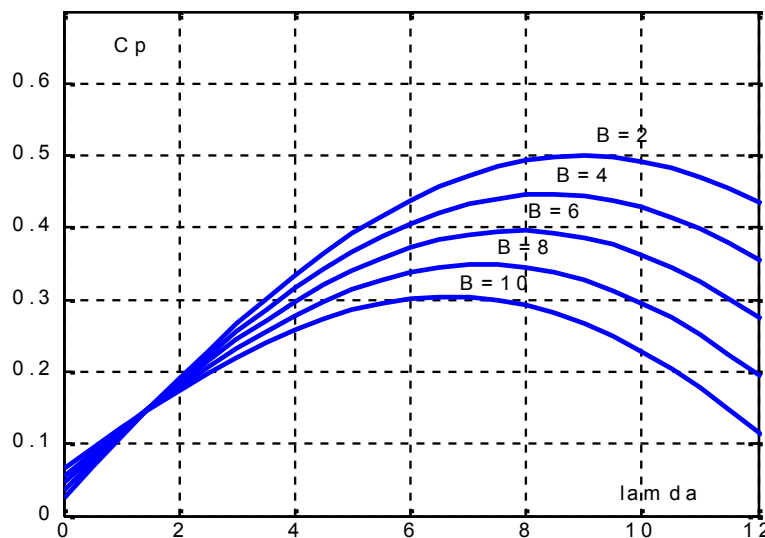


Figure. IV.9 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne

Les expressions de la puissance et la vitesse étant connues, on peut déduire l'expression du couple aérodynamique:

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2 \cdot \Omega_{turbine}} \quad (IV.15)$$

❖ Modèle du Multiplicateur:

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure IV.10), elle est modélisée mathématiquement par les équations suivantes :

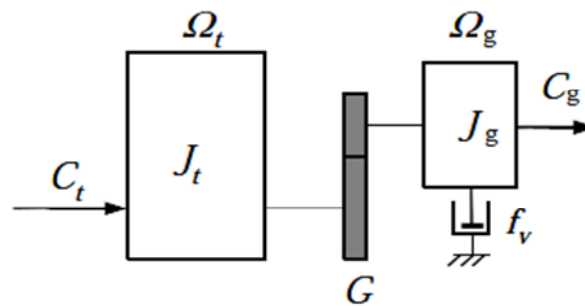


Figure. IV.10 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \quad (IV.16)$$

Avec:

C_g : couple issu du multiplicateur ;

C_{aero} : couple aérodynamique ;

G : Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (IV.17)$$

❖ Equation mécanique de l'arbre:

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

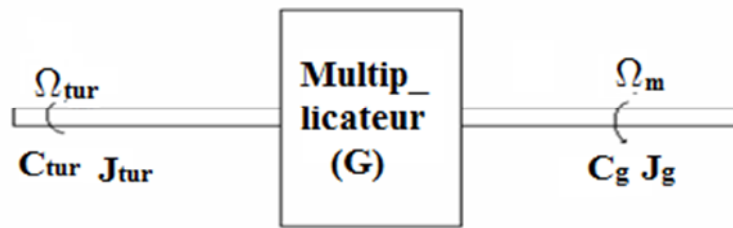


Figure. IV.11 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{IV.18}$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{couples} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{IV.19}$$

Le couple visqueux étant proportionnel à la vitesse, nous aurons:

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{IV.20}$$

Avec:

J : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice ;

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux ;

C_g : le couple issu du multiplicateur .

Schéma bloc du modèle de la turbine:

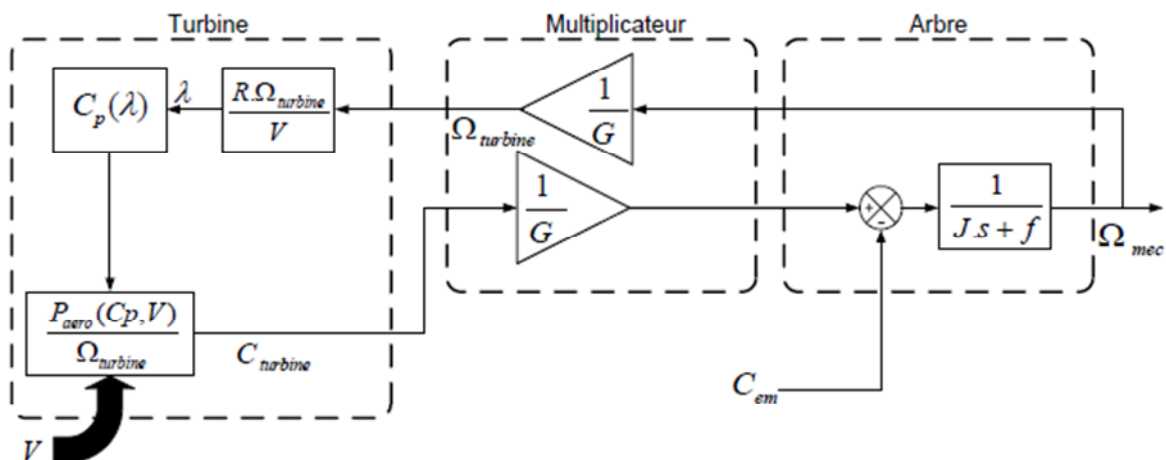


Figure. IV.12: Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

IV .9) les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable:

Il y a trois zones de fonctionnement pour une éolienne [14].

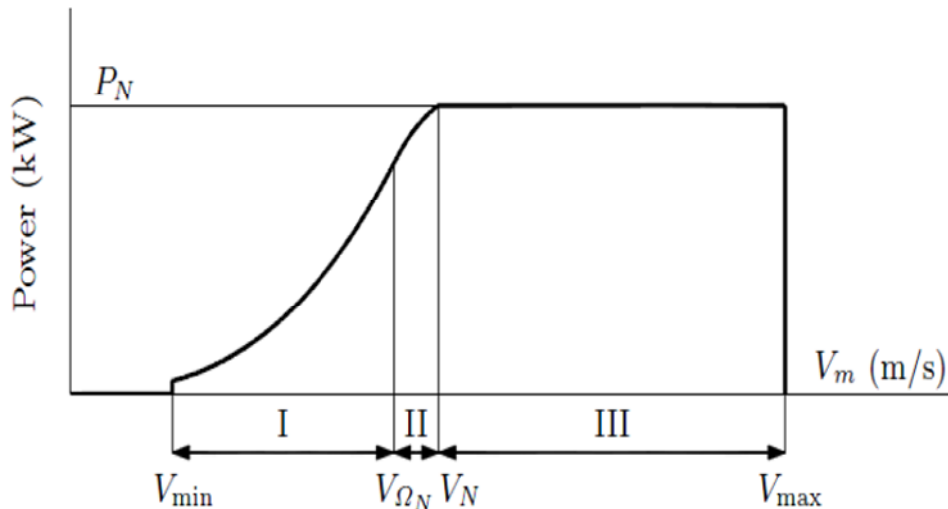


Figure. IV.13 : Caractéristique idéale puissance vitesse d'une éolienne

- **Zone I** : Correspond aux faibles vitesses du vent, la puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (MPPT, Maximum Power Point Tracking).
- **Zone II** : Zone de transition entre la zone de charge partiel (zone I) et la zone de charge nominale (zone II). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits générés).
- **Zone III** : Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales.[14]

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90°. C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante. Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 1 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.[2]

IV .10) Technique d'extraction du maximum de puissance

Commande dans la zone I (optimisation de la puissance)[14]:

Dans cette zone, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique $\lambda = \lambda_{opt}$. Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale $C_{p_{max}}$. La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la MPPT.

IV .10.1) Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

IV.10.2) Commande indirecte de vitesse (sans asservissement de vitesse):

Ce mode de contrôle repose par action sur le couple (commande indirecte de la vitesse) pour recherche du maximum de puissance.

La courbe de rendement aérodynamique maximal est définie dans le plan (Ω_{tur}, C_{aer}) par l'ensemble des points $E(\Omega_{tur-opt}, C_{aer-opt})$ correspondant à l'intervalle des vitesses du vent dans laquelle l'éolienne fonctionne.

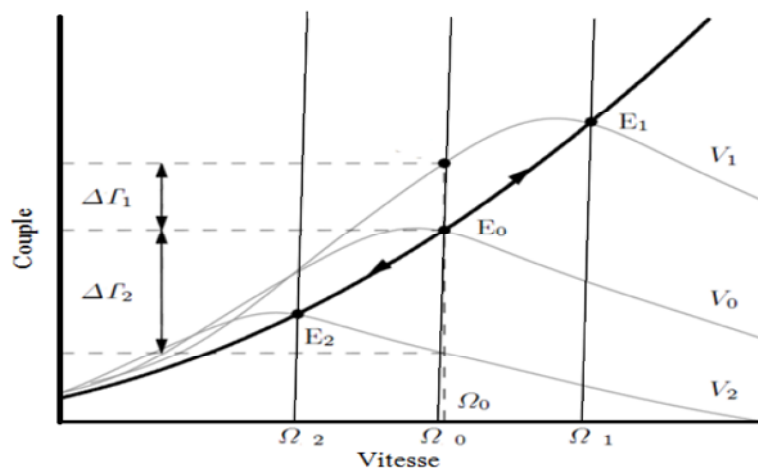


Figure. IV.14: Caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.

$$C_{aero-opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (IV.21)$$

pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G

$$C_{g-opt} = \frac{1}{2.G} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \frac{Cp(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (IV.22)$$

Si le couple électromagnétique est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal.

Cette commande est basée sur une estimation de la vitesse du vent. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit.

$$V = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{\lambda_{opt}} \quad (IV.23)$$

D'où le couple éolien C_{aero} peut être exprimé en fonction de la vitesse du rotor comme suit.

$$C_{aero-opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{Cp(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_{turbine}^2 \quad (IV.24)$$

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

$$C_{aero-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_{turbine}^2 \quad (IV.25)$$

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

$$\frac{C_{turbine}}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (IV.26)$$

En remplaçant $C_{turbine}$ par son expression, on trouve.

$$\frac{K_{opt}}{G} \cdot \Omega_g^2 - C_g - f \cdot \Omega_g = 0 \quad (IV.27)$$

Avec:

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_{turbine} \quad (IV.28)$$

D'où:

$$C_{g-opt} = \frac{K_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g = 0 \tag{IV.29}$$

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

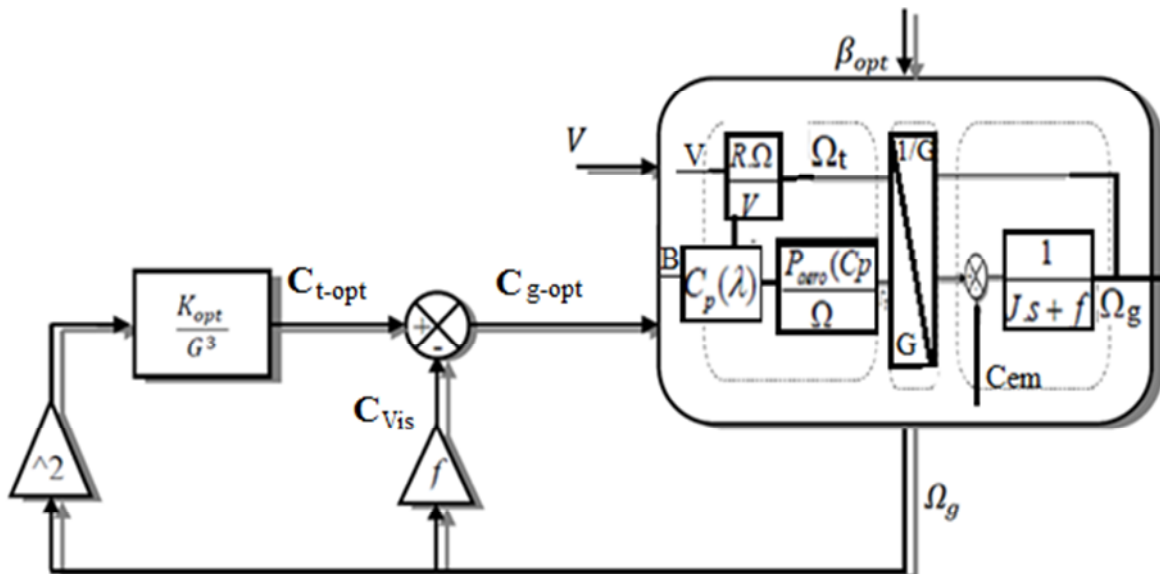


Figure. IV.15: Commande indirect de vitesse (Zone I).

IV .11) Profil de vent:

Le vent étant une grandeur de nature aléatoire, son profil a été choisi d'une manière à prendre en considération les deux modes de fonctionnements hyper- synchrone et hypo synchrone, La figure (IV.16) montre l'allure de la vitesse du vent appliquée.[16]

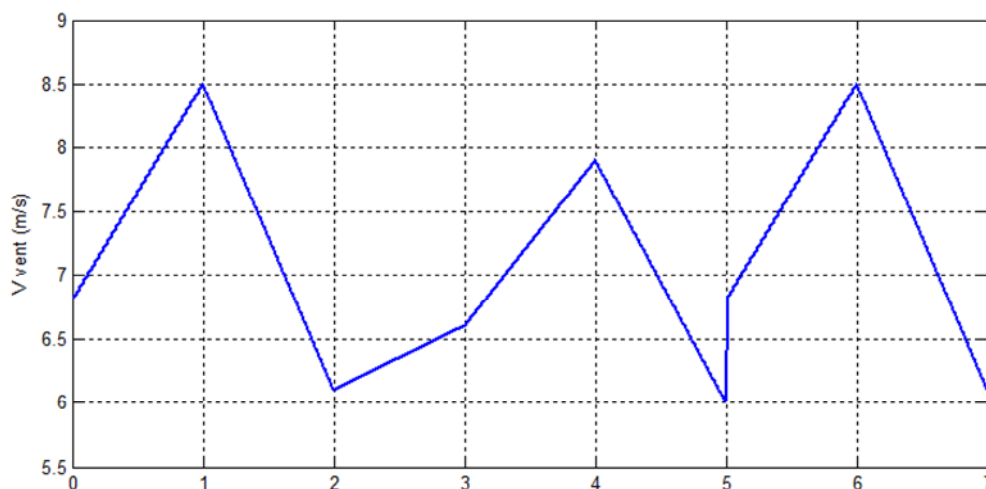


Figure. IV.16 : Profil du vent appliqué à la MADA

IV.12) Résultats de simulation du système de conversion complet:

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. Afin de mieux voir l'évolution des grandeurs mécaniques et électrique lors de la génération de l'énergie éolienne. La MADA a été alimentée par un onduleur au niveau du rotor.

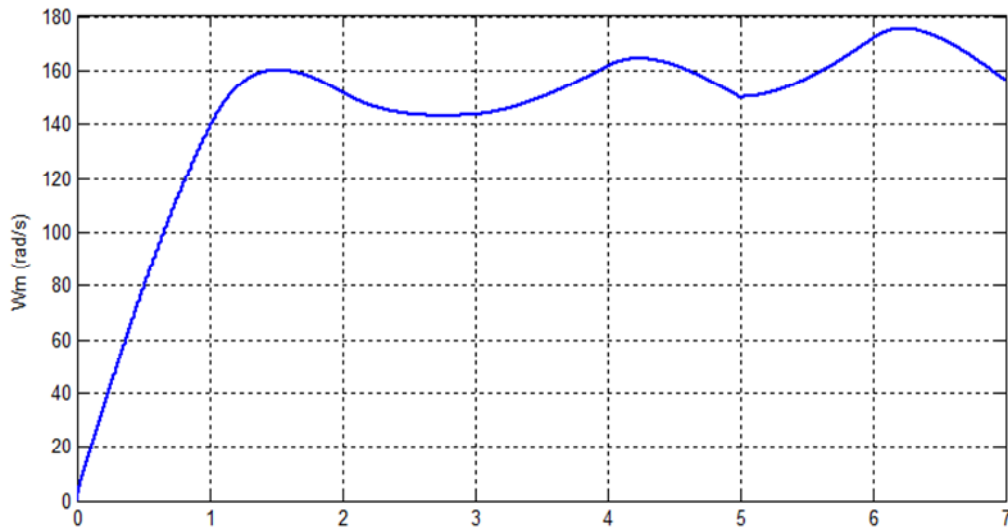


Figure. IV.17: la vitesse du rotor (mécanique)

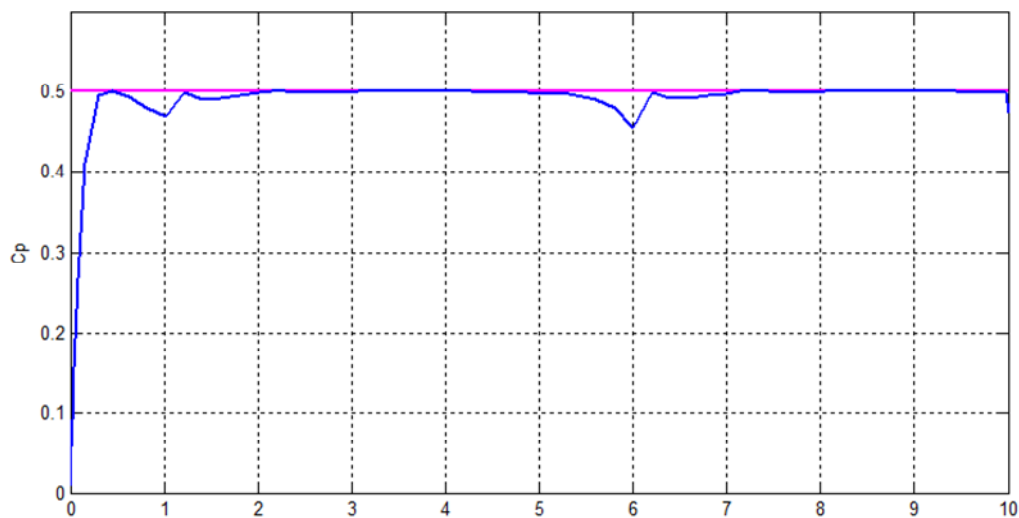


Figure. IV.18: coefficient de puissance de la turbine éolienne et sa référence

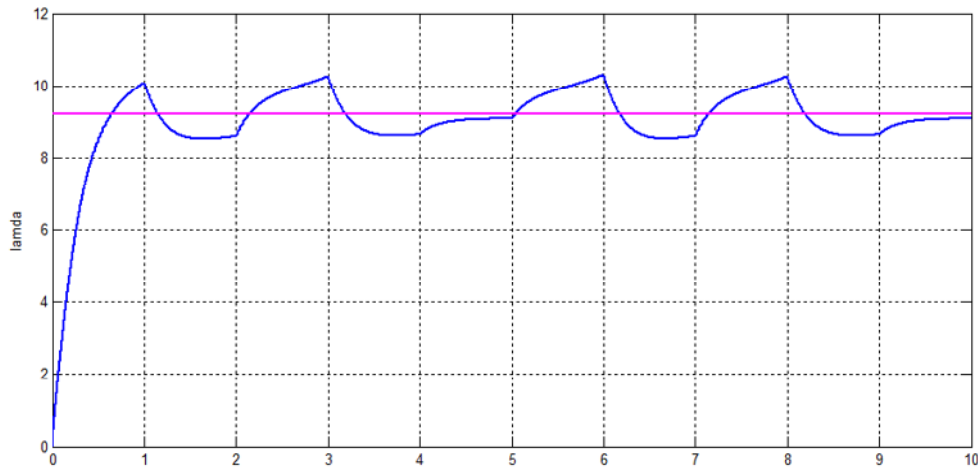


Figure. IV.19: Vitesse relative de l'éolienne et sa référence.

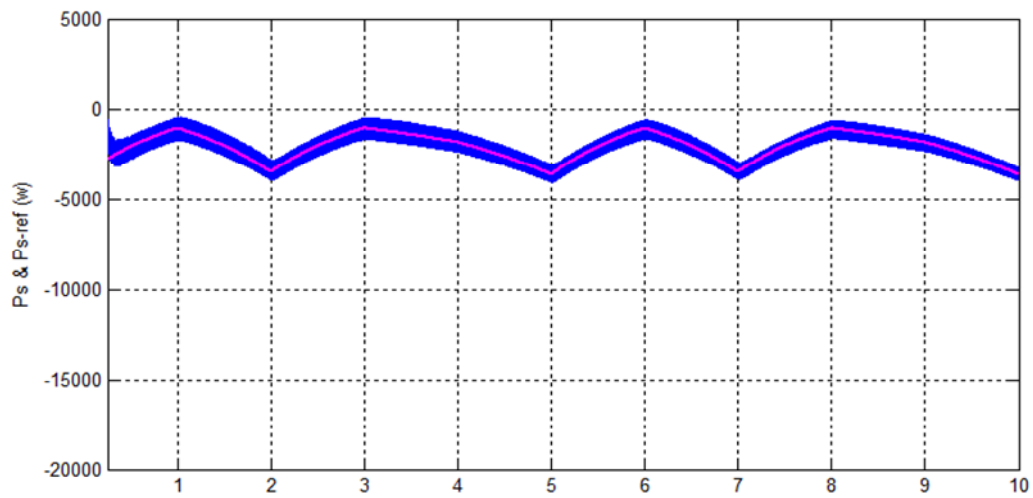


Figure. IV.20: Puissance active statorique et sa référence

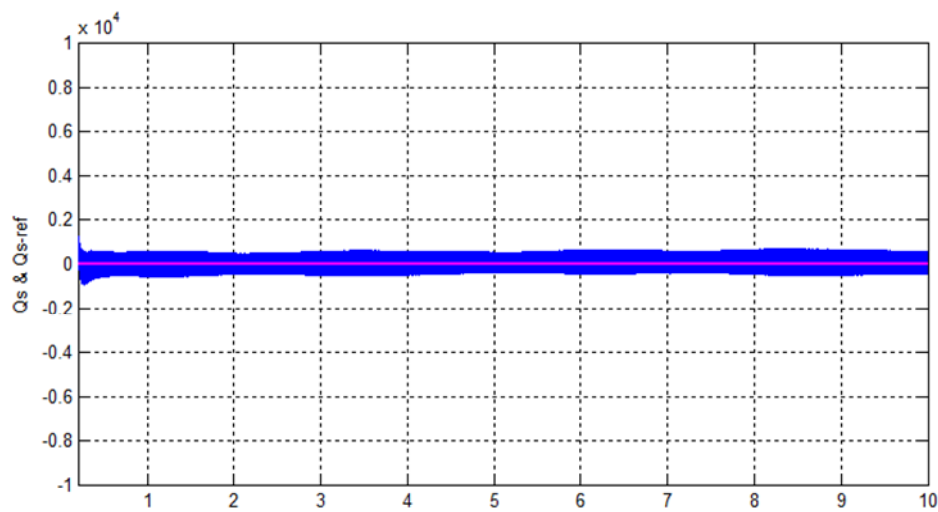


Figure. IV.21: Puissance réactive statorique et sa référence.

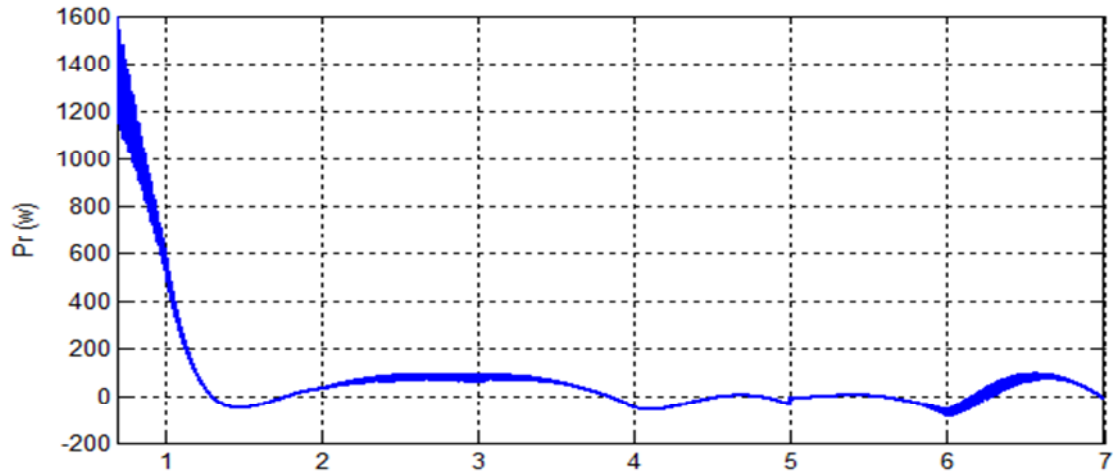


Figure. IV.22: Puissance active rotorique

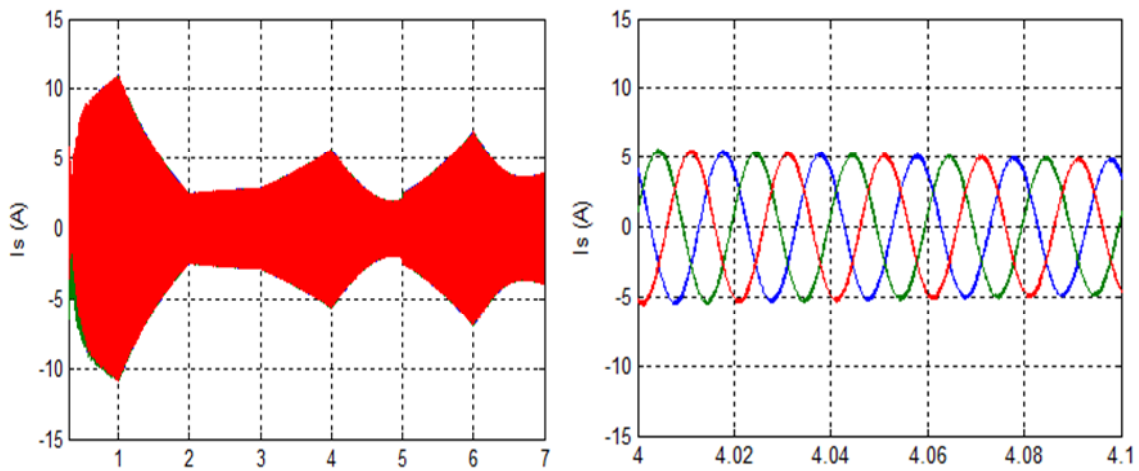


Figure. IV.23: Le courant statorique avec un zoom

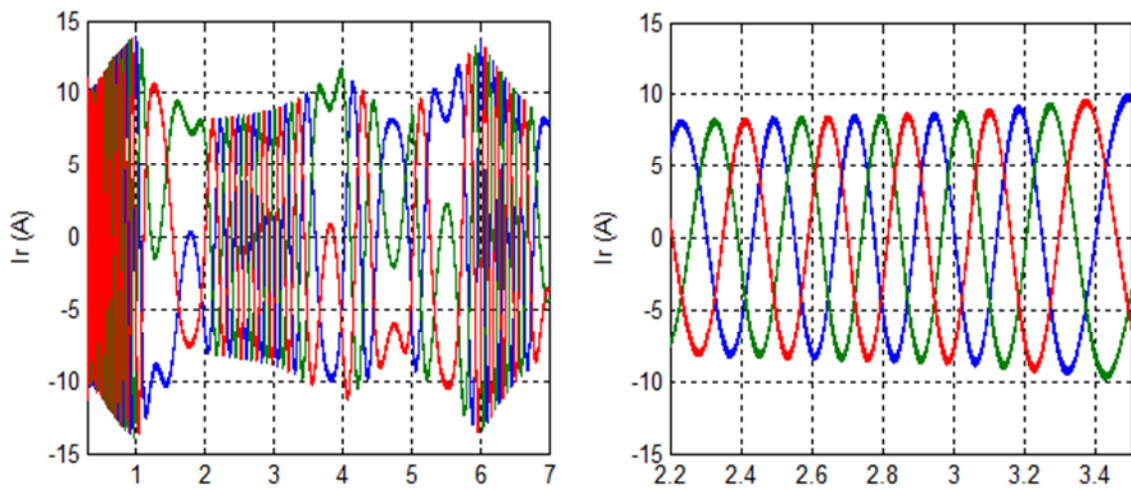


Figure. IV.24: Le courant rotorique avec un zoom

IV .13) Interprétation des résultats:

A travers l'évolution du coefficient de puissance Figures (IV.18), nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta = 2^\circ$), qui nous donne un λ optimale. On remarque que le C_p atteint une valeur maximal de 0.5, 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.

En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine Figures (IV.17), il est constaté que celle-ci reste dans des proportions acceptable.

On constate aussi sur les résultats de simulation une bonne suivre de consigne pour puissance active ainsi que la puissance réactive statorique qui est maintenue nulle par les puissances réelles débitées par la MADA figure (IV.20) et (IV.21).

Les courants statoriques Figure (IV.23), montrent bien que l'évolution de leurs amplitudes suit presque parfaitement l'évolution de la puissance active.

Contrairement aux courants statoriques, le courant rotorique figure (IV.24); en plus de l'évolution de l'amplitude, Nous avons également constaté la variation de la fréquence rotorique qui est mise en évidence par la variation de vitesse

IV .14) Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation d'une turbine éolienne, par la suite nous avons associée à un système de conversion d'énergie constitué d'une machine asynchrone à double alimentation et de convertisseurs d'électronique de puissance, et donc un modèle du système éolien global a été présenté.

Ainsi, nous avons constaté que la MADA est capable d'assurer, par son fonctionnement à vitesse variable, un rendement proche de celui du maximum théorique. Ceci a été réalisé à travers une algorithmme de commande de une l'éolienne qui nous a permis de maximiser la puissance captée.

Conclusion générale:

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une machine asynchrone à double alimentation (Alimentation et commande), ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter son application dans une chaîne de production d'énergie éolienne. Pour ce faire, dans le premier chapitre on a présenté la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab nous confirment la possibilité de double alimentation par la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée.

La génératrice asynchrone est destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien. Il est donc très utile de raisonner en termes de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans le deuxième chapitre est en puissance active et réactive statoriques. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, où on a exprimé les grandeurs statoriques de la machine asynchrone à double alimentation en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor. Des quelles nous avons choisi la structure indirecte en boucle fermée de par sa robustesse et sa capacité à limiter les courants rotoriques donc à protéger le bobinage de la machine et le régulateur PI de par sa simplicité et de ses performances convenables. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances active et réactive statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliqué.

Le troisième chapitre est un complément du chapitre précédent, où on se met dans le cas le plus pratique où le stator de la GADA est alimenté par une source triphasé et le rotor est connecté à un onduleur à MLI à deux niveaux commandée par le stratégie triangulo-sinusoidale. L'alimentation continue de l'onduleur est fourni par un convertisseur triphasé fonctionnant en redresseur sera commandée par une MLI à hystérésis a travers un bus continu. On aura donc une cascade basé sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Conclusion générale

On a présenté dans le dernier chapitre la modélisation d'une turbine éolienne et l'élaboration d'un algorithme de maximisation de la puissance captée du vent à été mis en œuvre, où on a supposé que la vitesse du vent varie légèrement au régime permanent. Il consiste à une estimation de la vitesse du vent correspondante au coefficient de puissance maximal. La chronologie de fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent été illustrée et la puissance est effectivement maximisée.

Nous avons pu noter alors, que la GADA fonctionnait d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Données de la machine asynchrone à double alimentation [2]:

Valeurs nominales : 4KW;220/380 V ; 50Hz ; 1440tr/min

Paramètres :

$$R_s \text{ (résistance de stator)} = 1.2 \Omega$$

$$R_r \text{ (résistance de rotor)} = 1.8 \Omega$$

$$L_s \text{ (inductance de stator)} = 0.1554 \text{ H}$$

$$L_r \text{ (inductance de rotor)} = 0.1568 \text{ H}$$

$$M \text{ (inductance mutuelle)} = 0.15 \text{ H}$$

Constantes mécaniques :

$$J \text{ (moment d'inertie)} = 0.2 \text{ Kg.m}^2$$

$$f \text{ (Coefficient de frottement)} = 0.001 \text{ N.m.s/rad}$$

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

$$\text{Nombre de pale} = 3$$

$$\text{Diamètre d'une pale } R = 3 \text{ m}$$

$$\text{Gain du multiplicateur } G = 7.2$$

Paramètres du filtre :

$$r = 0.01\Omega$$

$$l = 0.012\text{H}$$

Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu :

$$C = 8 \text{ mF}$$

SYNTHESE DU REGULATEUR PROPORTIONNEL INTEGRAL:

La stratégie de commande de la MADA décrite au chapitre II, utilise un régulateur proportionnel intégral *PI*. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en oeuvre et performance. La Figure (A.1) montre un système en boucle fermé corrigé par un régulateur *PI*.

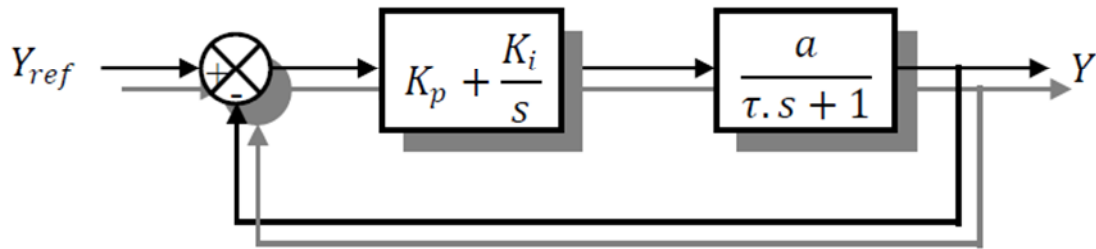


Figure 2.1 Système régulé par un régulateur proportionnel intégral

Ou:

$K_p + \frac{K_i}{s}$: Est la fonction de transfère du régulateur proportionnel intégral.

$\frac{a}{\tau.s + 1}$: Est la fonction de transfère du système à régulier.

τ : Est la constante de temps du système.

La fonction de transfère de l'ensemble système-régulateur s'écrit alors sous la forme suivante.

$$FTBO = \frac{\frac{K_p}{K_i} \cdot s + 1}{\frac{s}{K_i}} * \frac{a}{\tau \cdot s + 1} \quad (A.1)$$

$$\text{On prend : } \tau = \frac{K_p}{K_i} \quad (A.2)$$

$$\text{La fonction de transfère devient alors : } FTBO = \frac{K_i \cdot a}{s} \quad (A.3)$$

$$\text{Ce qui donne en boucle fermée : } FTBF = \frac{1}{\tau_r \cdot s + 1} \quad (\text{A.4})$$

$$\tau_r = \frac{1}{K_i \cdot a} \quad (\text{A.5})$$

Avec:

τ_r : le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide

Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

$$K_p = \frac{\tau}{\tau_r \cdot a} \quad (\text{A.6})$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r \cdot a} \quad (\text{A.7})$$

Cette méthode de synthèse sera utilisée pour la détermination des gains des différents régulateurs utilisés dans la commande de la MADA. Rappelons que la symétrie du système nous permet de calculer un seul régulateur pour les deux axes pour les puissances et pour les courants.

Boucle des courants:

Si on considère l'hypothèse d'un couplage entre l'axe direct et l'axe en quadrature négligeable pour la commande directe, et parfaitement compensé pour les commandes indirectes en boucle ouverte et en boucle fermée, ainsi que tous les termes de perturbation compensés on obtient le système corrigé de la figure ci-dessous.

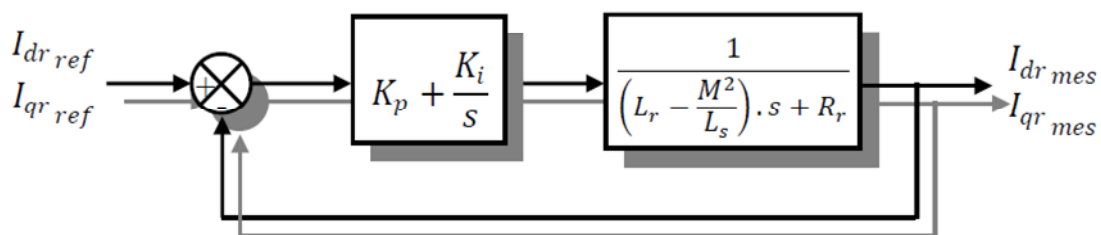


Figure 2.2 Schéma de la régulation des courants rotorique

Boucle des puissances:

Sous les mêmes hypothèses que pour la boucle des courants, on obtient la fonction de transfert à corriger pour le contrôle des puissances comme sur la figure suivante.

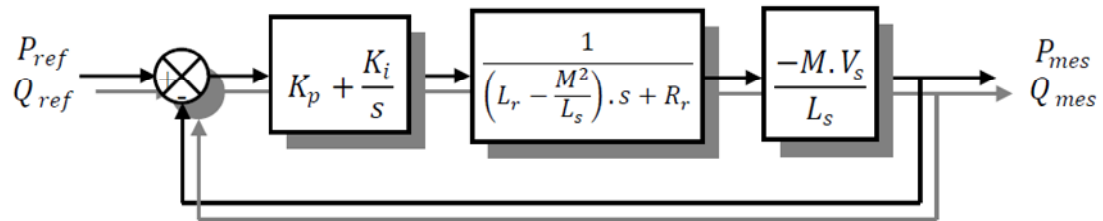


Figure 2.3 Schéma de la régulation des puissances statoriques

Bibliographie

- [1] **Naouel Hamdi** «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» mémoire de magister en électrotechnique; université Mentouri de Constantine. 2008
- [2] **Hamzaoui Ihssen** «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur»; mémoire de magister en électrotechnique ; Ecole Nationale Polytechnique. 2008
- [3] **Arnaud Gaillard** « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service»; thèse de doctorat en Génie Electrique; Université Henri Poincaré, Nancy-I. 2010
- [4] **Frédéric Poitiers** «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne»; Thèse de Doctorat en génie Electrique; Université de Nantes. 2003
- [5] **Dendouga Abdelhakim** «Contrôle des puissances active et réactive de la machine a double alimentation (DFIM)»; thèse de doctorat en électrotechnique ; BATNA. 2010
- [6] **Yacine Abderrahmane Bencherif** «Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne»; mémoire de l'ingénieur en électrotechnique; Ecole nationale polytechnique. 2008
- [7] **Haritza Camblong** «Minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolien dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable»; Thèse de Doctorat en automatique; École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux. 2003
- [8] **Aicha Otmani** «Commande par modulation vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation pour un system éolienne» mémoire d'ingénieur en électrotechnique; Ecole Nationale polytechnique. 2009
- [9] **Rachid Azaizia** «Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux» mémoire de magister en électrotechnique; université de BOUMERDES. 2008
- [10] **Abbas Mourad** «Modélisation et commande d'une MADA alimenté par une cascade à trois niveaux application a l'énergie éolienne» mémoire de l'ingénieur en électrotechnique; Ecole polytechnique. 2006
- [11] **Dendouga Abdelhakim** « Commande par mode glissant de MADA alimente par un onduleur de tension» Mémoire de Magister en Electrotechnique; Université de BATNA
- [12] **Khettache Laid** « Etude et commande d'une système éolienne à base d'une machine électrique double alimentée »; Mémoire de Magister en Electrotechnique; Batna. 2007
- [13] **Farid Merrahi** «Alimentation et commande d'une machine asynchrone a double alimentation application a l'énergie éolienne»; mémoire de magister en automatique; Ecole nationale polytechnique.2007

Bibliographie

- [14] **Metatla Samir** «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA»; Mémoire de Magister en Electrotechnique; Ecole nationale polytechnique. 2009
- [15] **Akel Fethi** «Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne»; mémoire de magister en Electrotechnique; école militaire polytechnique.2009
- [16] **Goudjil Djamel** «Eolienne a vitesse variable basée sur une machine asynchrone a double alimentation»; mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique; université de Bejaia. 2007
- [17] **Mesbahi Tedjani** «Gestion des flux énergétique dans un système de conversion éolienne»; Mémoire de Magister en Electrotechnique; Ecole militaire polytechnique.2011
- [18] **Guenfoud Faycel** «Etude et simulation de l'association onduleur MLI_ Moteur asynchrone alimentée par un redresseur MLI»; mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique; université de M'sila. 2006
- [19] **Benalia Laila** « Commande en tension des moteur a induction double alimentation»; Thèse de Doctorat en électrotechnique; université de Batna. 2010
- [20] **Lilia Abdelhamide** «Contribution a l'étude des performances des générateur électromagnétique utilise dans les systèmes éolienne»; Mémoire de Magister en Electrotechnique; université de Batna. 2008
- [21] **Fawzi Dahoum** «Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation pour l'utilisation dans l'énergie éolienne »; mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique; université de M'sila. 2010
- [22] **Ivan Meny** «Chaine de conversion éolienne de petite puissance»; Thèse de Doctorat en genie électrique; université de Montpellier II. 2005
- [23] **Cherfia Naim** « Conversion d'énergies produit par des générateurs éolienne»; Mémoire de Magister en Electrotechnique; université de Mentouri - constantine. 2010
- [24] **Moussa Siddo Abdeoulaziz** « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne»; Mémoire de l'ingénieur d'états en électrotechnique; Ecole Nationale Polytechnique. 2007
- [25] **Farid Bouchafaa** «Etude et commande de différent cascade à onduleur à neuf niveaux à structeur NPC. Application à la conduite d'une MSAP»; Thèse de Doctorat en genie électrique; Ecole Nationale Polytechnique. 2006
- [26] **Messeguem Walide** « Commande vectorielle de la machine asynchrone avec asservissement u redresseur MLI multi-niveaux»; mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique; université de M'sila.2009
- [27] **Amrouche Azedine** «Asservissement d'un redresseur MLI multi- niveaux» mémoire de l'ingénieur d'état en électrotechnique; université de M'sila. 2006

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DU L'OBTENTION
DU DIPLOME MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

SPECIALITE : INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUE

PROPOSE ET DIRIGE PAR : M^{me}. BELOUNIS Ouassila

PRESENTE PAR : Mekhiche Youcef

Thème :

**L'optimisation de puissance des éoliennes
à vitesse variable**

Résumé :

Ce travail présente la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) connectée au réseau pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour chaque composant de l'éolienne « Turbine, GADA, redresseur et l'onduleur ».

Le stator de « GADA » est directement relié au réseau, par contre son rotor est connecté à un convertisseur de puissance bidirectionnel via une cascade : « redresseur MLI-filtre-onduleur MLI » pour pouvoir contrôler l'échange de puissance entre GADA et le réseau. Le contrôle de puissance active et réactive statorique est réalisé par la commande vectorielle de « GADA » en utilisant des régulateurs PI. La technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Ce travail est subventionné par une partie de simulation qui nous a permis de conclure la validation du modèle obtenu de l'association:« Turbine-Convertisseur AC/DC/AC - GADA ».

Mots clés :

Machine asynchrone à double alimentation, GADA, Eolienne, Commande vectorielle, Onduleur, Redresseur, MLI, Turbine, MPPT.

N° d'ordre : 041