

**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 DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE**

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

THEME

**COMMANDE VECTORELLE D'UNE GENERATRICE
ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION « GADA »
POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE**

Proposé et dirigé par:

Mme. BELOUNIS Ouassila

Présenté par :

**DEHOUM Fawzi
DJEDDOU Lakhdar
CHERIAT El hachemi**

Année Universitaire : 2010 / 2011

Remerciements :

*Nous tenons à remercier tout premièrement **Dieu** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Madame BELOUNIS Ouassila** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont Aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribués à notre formation

*Nos sincères remerciements à **tous les membres du jury** qui on Accepté de juger notre travail.*

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos Amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	2
------------------------------------	---

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE L'EOLIENNE

<i>Introduction</i>	4
<i>I.1. Le vents</i>	5
<i>I.1.1.Direction du vent</i>	5
<i>I.1.2. Expression du vent en un point fixe</i>	5
<i>I.1.3.Vitesse de vent</i>	6
<i>I.2. Définition de l'énergie éolienne</i>	7
<i>I.2.1. Constitution d'une éolienne</i>	8
<i>I.3. Architecture d'une éolienne a axe horizontal</i>	8
<i>I.4. Classification des éoliennes</i>	9
<i>I.4.1. Différents types d'éolienne et leurs utilisations</i>	10
<i>I.4.1.1.Les éoliennes à axe vertical</i>	10
<i>I.4.1.2. Les éoliennes à Axe horizontal</i>	10
<i>I.4.2. Le nombre de pales</i>	11
<i>I.4.2.1. Les éoliennes rapide</i>	11
<i>I.4.2.2 Les éoliennes lentes</i>	11
<i>I.4.3. Le mode de régulation</i>	12
<i>I.4.3.1. La régulation « Pitch »</i>	12
<i>I.4.3.2. La régulation « Stall »</i>	13
<i>I.4.6. Fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable</i>	13
<i>I.4.5. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne</i>	13
<i>I.4.5.1. Systèmes utilisant la machine synchrones</i>	13
<i>I.4.5.2 .Générateurs asynchrones</i>	15
<i>I.4.5.3. Machines synchrones à double alimentation</i>	16
<i>I.4.6. L'couplement mécanique</i>	16
<i>I.5. Avantages et inconvénients</i>	17
<i>I.6.Conversion de énergie da vent</i>	17
<i>I.6.1.Conversion de énergie cinétique du vent en énergie mécanique</i>	18
<i>I.6.2.Modélisation du turbine éolienne</i>	21
<i>Conclusion</i>	24
<i>Bibliographique chapitre I</i>	25

CHAPITRE II : ETUDE ET MODELISATION DE GADA

<i>Introduction</i>	26
<i>II .1 Différentes topologies de la MADA</i>	26
II .1.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless ».....	26
II.1. 2.Machines asynchrones à double alimentation à rotor bobine	27
II .1.2.1.Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	27
II .1.2.2. Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer.....	28
II .1.2.3. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec cycloconvertisseur.....	29
II.1.2.4 : Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec convertisseur MLI	29
<i>II.2. Description de la machine à double alimentation</i>	30
II.2.1. Emploi des machines asynchrone à double alimentation	31
<i>II.3 . Principe de fonctionnement de la MADA</i>	32
II. 3.1 Fonctionnement de la MADA à quatre quadrants.....	32
<i>II.4. Etude de la puissance pour la MADA</i>	34
<i>II.5. Les formes application des machines asynchrone à double alimentation</i>	34
II.5.1. Application moteur	34
II.5.2. Application génératrice	34
II.5.3. Domain d'application de la GADA.....	35
II.5.4. Application de la MADA dans les systèmes éoliens (GADA).....	35
<i>II.6. Modélisation de la machine (génératrice) asynchrone à double alimentation</i>	35
II.6.1. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé	35
II.6.2. La transformée de park.....	36
II.6.3. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q).....	38
<i>II.7. Equation électrique et équation mécanique de la GADA</i>	38
II.7.1. Validation du modèle.....	40
? . Modèle par variation de vitesse	44
<i>II.8. Simulation de GADA</i>	45
<i>II.9. Analyse des résultats de simulation</i>	50
<i>Conclusion</i>	51
<i>Bibliographie chapitre II</i>	52

CHAPITRE III :
**COMMANDE VECTORIELLE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE
A DOUBLE ALIMENTATION**

<i>Introduction</i>	53
III.1. <i>Principe de la commande vectorielle</i>	53
III.1.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé	53
III.1.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	55
III.1.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	56
III.2. <i>Commande directe</i>	57
III.2.1. Type des régulateurs utiliser	58
III.2.1.1. Système régulé par un régulateur PI	58
III.2.1.2 Résultats de simulation.....	60
a. 1) Avec boucle interne.....	60
a. 2) Avec génératrice (GADA).....	61
III.3. <i>La Commande indirecte</i>	63
B_1) commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.....	63
B.1.1) avec boucle interne	63
B.1.2) avec machine (GADA)	66
B-2) Commande indirecte avec boucle de puissance.....	67
B-2.1) Avec boucle interne	68
B.2.2) Avec machine (GADA).....	69
<i>Conclusion</i>	72

**CHAPITRE IV : CASCADE
CONVERTISSEUR AC/AC-GADA –TURBINE**

<i>Introduction</i>	73
<i>IV.1.Modélisation de l'alimentation</i>	73
<i>IV.2.Modélisation partie de puissance</i>	74
<i>IV.2. 1 . Modélisation du redresseur</i>	74
<i>IV.2.2 Modélisation de l'onduleur de tension.....</i>	76
<i>IV.2.2.1 Stratégie de commande de l'onduleur.....</i>	77
• <i>Simulation d'onduleur MLI en générale</i>	78
<i>IV.2.3. Les équations du filtre.....</i>	79
<i>IV.2.3.1 La fréquence de coupure</i>	79
<i>IV.3 Simulation de l'association « Turbine - GADA - convertisseur AC/AC ».....</i>	80
a) <i>Schémas globale de simulation</i>	80
b) <i>Résultats de simulation.....</i>	81
c) <i>Résultats du simulation de l'ensemble « GADA+ commande vectorielle + Convertisseur+(AC/AC)+turbine ».....</i>	83
<i>Conclusion</i>	85

<i>CONCLUSION GENERALE.....</i>	86
---------------------------------	----

<i>ANNEXE.....</i>	
--------------------	--

LISTE DES FIGURES

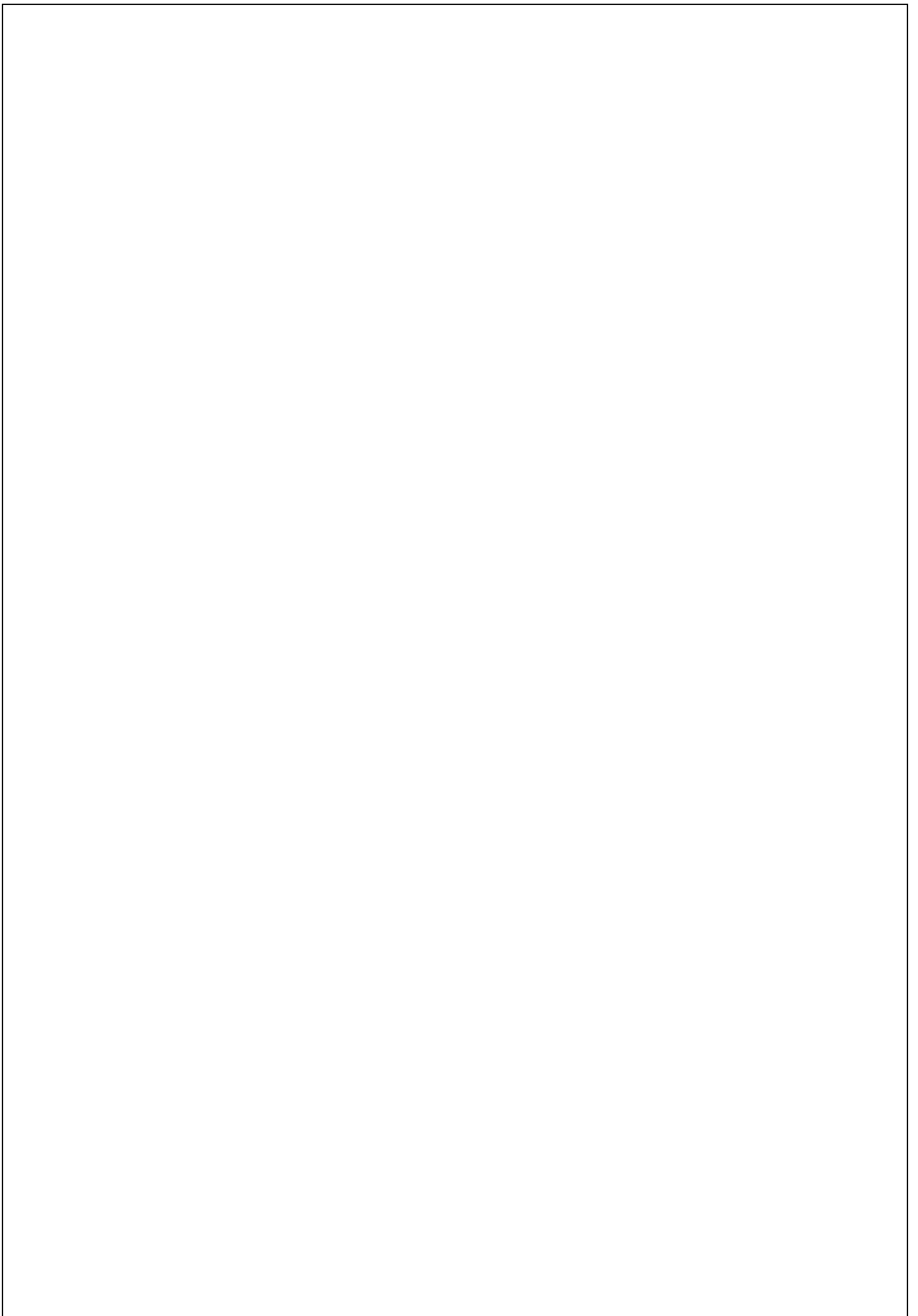
<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>P</i>
<i>CHAPITRE I</i>		
Figure I.1	Ensemble Anémomètre-Girouette	5
Figure I.2	Manche a air d'aérodrome	5
Figure I.3	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie	7
Figure I.4	Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal	8
Figure I.5	Éoliennes à axe horizontal	10
Figure I.6	Éoliennes à axe vertical	11
Figure I.7	Différents nombre des pales	12
Figure I.8	Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI	14
Figure I.9	Génératrice à aimants permanents à couplage Direct	15
Figure I.10	Système éolien basée sur la MAS de type Dahlander	15
Figure I.11	Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable	16
Figure I.12	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	18
Figure I.13	Tube de courant d'air autour d'une éolienne	18
Figure I.14	Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne	20
Figure I.15	Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur	20
Figure I.16	Configuration d'une éolienne	21
Figure I.17	Modèle de la turbine éolienne	22
Figure I.18	Modèle de l'arbre –multiplicateur-turbine éolienne	23
<i>CHAPITRE II :</i>		
Figure II.1	MADA à double stator	26
Figure II.2	MADA Brushless.	27
Figure II.3	MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique	28
Figure II.4	MADA, structure Kramer	28
Figure II.5	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.	29
Figure II.6	Structure de Scherbius avec MLI.	30
Figure II.7	Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	30

Figure II.8	Système à vitesse variable par double alimentation.	31
Figure II.9	Configuration des enroulements et des flux dans une MADA	31
Figure II.10	Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.	33
Figure II.11	Schémas de transformation de park	38
Figure II.12	Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q)	41
Figure II.13	Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)	42
Figure II.14	Flux statorique et rotorique (φ_s ,φ_r)	42
Figure II.15	Courant statorique en système triphasé (a ,b,c)	42
Figure II.16	Courant rotorique en système triphasé (a ,b,c)	43
Figure II.17	Tension d'alimentation statorique	43
Figure II.18	Tension rotorique (a,b,c)	43
Figure II.19	Puissance rotorique (Pr,Qr)	43
Figure II.20	Puissances statoriques (Ps,Qs)	44
Figure II.21	Couple électromagnétique	44
Figure II.22	Vitesse rotorique W_r variable	45
Figure II.24	Courant rotorique et statorique (d , q)	45
Figure II.25	Flux statorique et rotorique	46
Figure II.26	Flux statorique a vitesse variable	46
Figure II.27	Courant Statorique et rotorique en système triphasé (a , b , c)	46
Figure II.28	Puissance statorique (Ps, Qs)	47
Figure II.29	Puissance rotorique (Pr ,Qr)	47
Figure II.30	Couple électromagnétique(N.m)	47
Figure II.31	W_r « vitesse rotorique »	48
Figure II.32	Courant statorique et rotorique (d , q)	48
Figure II.33	Flux statorique et rotorique (d , q)	48
Figure II.34	Flux statorique et rotorique	49
Figure II.35	Puissance statorique	49
Figure II.36	Puissance rotorique	50
Figure II.37	Courant statorique et rotorique triphasé (a ,b ,c)	50
Figure II.38	Couple électromagnétique	50
<i>CHAPITRE III :</i>		
Figure III.1.	Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi	54
Figure III.2 .	Schéma bloc du système à réguler	57
Figure III.3 .	Schémas commande vectorielle directe	58
Figure III.4 .	Schéma de la régulation	58
Figure III.5.	Puissances mesurées et de référence (P active ; Q réactive)	60
Figure III.6.	Courant statorique et rotorique (d ;q)	60

Figure III.7	Courants statorique et rotorique triphasés (a , b , c)	61
Figure III.8	Tension rotorique tréphases (a ,b , c)	61
Figure III.9	Puissances mesurées et de référence (P active , Q réactive)	61
Figure III.10	Courants statorique et rotorique (d , q)	62
Figure III.11	Courant statorique et rotorique triphasés (a , b , c)	62
Figure III.12	Flux statorique et rotorique en forme (d , q)	62
Figure III.13	Couple électromagnétique	63
Figure III.14	flux statorique et rotorique	63
Figure III.15	Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance	64
Figure III.16	Puissances mesure et référence (active P et réactive Q)	64
Figure III.17	Courants statorique et rotorique (d et q)	65
Figure III.18	Courants statorique et rotorique triphasé	65
Figure III.19	Tension rotorique	65
Figure III.20	Puissances active et réactive (mesurées et de référence)	66
Figure III.21	Courants statorique et rotorique (d , q)	66
Figure III.22	Courant statorique et rotorique triphasés (a , b , c)	66
Figure III.23	Flux statorique et rotorique en forme (d , q)	67
Figure III.24	Couple électromagnétique	67
Figure III.25	Flux statorique et rotorique	67
Figure III.26	Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.	68
Figure III.27	Puissance statorique (P et Q)	68
Figure III.28	Courant statorique et rotorique forme (d et q)	69
Figure III.29	Courants statorique et rotorique triphasé	69
Figure III.30	Puissances statoriques active et réactive	69
Figure III.31	Courants statorique et rotorique (d et q)	70
Figure III.34	Couple électromagnétique	71
Figure III.35	Flux statorique et rotorique	71

CHAPITRE IV:

	<i>CHAPITRE IV:</i>	
Figure IV.1	L'ensemble convertisseur- machine.	73
Figure IV.2	Schémas générale de l'association de GADA avec convertisseur AC/AC	74
Figure IV.3	Redresseur à diodes.	75
Figure IV.4	Tension d'alimentation triphasées et la tension redressée Uch	75
Figure IV.5	Représentation d'un onduleur à deux niveaux	76
Figure IV.6	Porteuse et tension d'Alimentation ,et la Commande MLI	78
Figure IV.7	Tension composé Sorte on Onduleur	78
Figure IV.8	Représentation du filtre.	79
Figure IV.9	La tension a la sortie du filtre.	79
Figure IV.10	Schémas de convertisseur AC/AC	80
Figure IV.11	Schémas globale de l'association « Turbine - GADA – convertisseur AC/AC »	80
Figure IV.12	Courants statorique et rotorique avec variation de rapport m	81
Figure IV.13	Résultats de Simulation de convertisseur	82
Figure IV.14	Tension d'entrée de convertisseur	82
Figure IV.15	Puissance statorique et rotorique	83
Figure IV.16	Flux statorique et rotorique	83
Figure IV.17	ZOOM de courant statorique et rotorique	84
Figure IV.18	Tension et courant de phase statorique	85



LISTE DES SYMBOLES

- θ : L'abscisse angulaire entre la phase statorique (A) et la phase rotorique (A) .
- γ : Le facteur d'affaiblissement sur le rotor de la turbine.
- P** : L'opérateur de LAPLACE.
- p : Le nombre de paires de pôles.
- g : La vitesse de glissement.
- f : Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'éolienne.
- V : La vitesse moyenne du vent.
- P_θ : La matrice de la transformation de PARK.
- P : La puissance de l'éolienne.
- J : L'inertie totale de l'éolienne.
- G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.
- ρ : La densité de l'air.
- λ : La vitesse spécifique de la turbine.
- β : L'angle de calage des pales.
- ω_s : La pulsation statorique.
- ω_r : La pulsation rotorique.
- ω : La pulsation mécanique.
- φ_s, φ_r : Les flux statorique et rotorique respectivement.
- $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$: Les flux statoriques direct et en quadrature.
- $\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$: Les flux rotoriques direct et en quadrature.
- λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale de la turbine.
- θ_s : L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à l'axe de la phase statorique (A).
- θ_r : L'abscisse angulaire du référentiel de Park par rapport à la phase rotorique (A) .

Liste des symboles

Ω_T, Ω_g : La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur.

C_r : Le couple résistant.

C_T, C_g : Le couple de la turbine respectivement du générateur.

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

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

f_D, f_L : La portance et la traînée respectivement.

V_s, V_r : La tension simple statorique et rotorique respectivement.

V_{ds}, V_{qs} : La tension statorique directe et en quadrature.

V_{dr}, V_{qr} : La tension rotorique directe et en quadrature.

U_a, U_b, U_c : La tension composée des phases a, b et c respectivement.

T_v : La constante de temps du filtre de Von Karman.

R_s, R_r : La résistance par phase statorique et rotorique respectivement.

R_T : Le rayon des pales de la turbine.

P_s, Q_s : Les puissances active et réactive statoriques.

P_r, Q_r : Les puissances active et réactive rotoriques.

P_T : La puissance convertie par la turbine.

M_{sr}, M_{rs} : Inductances mutuelles stator-rotor.

M_s, M_r : La mutuelle Inductance entre les enroulements statoriques, respectivement rotoriques.

L_v : L'échelle de longueur de la turbulence.

L_s, L_r : L'inductance propre statorique et rotorique respectivement.

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

Liste des symboles

I_s, I_r : Les courants de phase statorique et rotorique.

I_{ds}, I_{qs} : Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.

I_{dr}, I_{qr} : Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.

$C_{p\lambda\beta}, C_{q\lambda\beta}$: Le coefficient de puissance et le coefficient du couple respectivement.

v_t : La composante représentant la turbulence du vent.

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} : Les tensions composées de l'onduleur.

i_c : Le courant dans le condensateur du bus continu.

V_c : La tension du bus continu.

C : Le condensateur du bus continu.

i_{mac} : Le courant modulé par le convertisseur du coté de la machine.

i_{res} : Le courant modulé par le convertisseur du coté du réseau.

R_f : La résistance du filtre.

L_f : L'inductance du filtre.

v_{0t} : La vitesse du vent.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles.

Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire.

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leur est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires.

Dans ce contexte général, cette présente étude s'intéresse à la filière éolienne, qui semble être l'une des plus prometteuses.

Même si les énergies fossiles (pétrole et gaz) ne vont pas être remplacées de sitôt par les énergies renouvelables en Algérie, la part de ces derniers ne cesse d'augmenter, depuis la création du commissariat aux énergies renouvelables (vent) en 1982, et l'élaboration récente des textes législatifs, loi sur les énergies renouvelables, en 2004.

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures [1]. Sans oublier que cette ressource d'énergie n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte chère et elle peut être dangereuse au niveau écologique.

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables".

L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme, oubliée depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 22 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 16 GW et l'Espagne avec 15 GW [2].

Cependant, la technologie des turbines éoliennes semble avoir atteint la limite en matière de taille des hélices. En effet, les plus grandes éoliennes actuellement sur le marché, ont une *hélice* de plus 120 m de diamètre et une *tour* qui dépasse les 100 m de haut, pour produire une puissance électrique de 6 MW environ [2], ce qui l'équivalent d'un immeuble d'environ 50 étages ! Cette contrainte mécanique a poussé les chercheurs à mener une nouvelle voie de recherche qui s'intéresse à l'optimisation et l'amélioration du rendement et des performances des systèmes éoliennes et à leur intégration dans les réseaux électriques.

Organisation du mémoire :

Le présent mémoire est une tentative de faire partie du monde de recherche et étude dans le domaine de l'art d'énergie éolienne. Il débute par :

- Ø un premier chapitre qui donne une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les qualités de l'énergie éolienne plus les types et structure des turbines éoliennes en plus le modèle de vent ,
- Ø et en deuxième chapitre les différentes structures d'alimentation de la GADA (aperçu théorique sur le machine a double alimentation) modélisation et simulation de GADA.
- Ø Dans le troisième chapitre, on donnera une étude , modélisation et simulation de Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à double alimentation.
- Ø Et dans le quatrième chapitre, on donnera une étude et de modélisation et simulation de l'ensemble : Convertisseur (Redresseur, filtre, onduleur MLI de tension)-GADA + CV + turbine .

Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants.

CHAPITRE I :
ETAT DE L'ART DE L'EOLIENNE



CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DE L'EOLIENNE

INTRODUCTION:

Depuis l'utilisation du Moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer.

C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité, Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (Capteur à axe vertical ou à axe Horizontal), Les structures des capteurs sont de plus en plus performances [1].

Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante (pour divers raisons, les éoliennes productrices d'électrices sont des éoliennes rapides à deux ou trois pales) :

- Elles sont plus légères donc moins chères.
- Elles tournent plus vite.

Le multiplicateur de vitesse à utiliser pour l'entraînement du générateur électrique présentera de ce fait, un rapport de multiplication plus faible et sera donc plus léger.

Dans certains cas, il pourra même être supprimé.

Le couple nécessaire pour la mise en rotation d'un générateur électrique est très faible. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines Synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs Éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.... [1]. en générale L'énergie éoliennes est devenue aujourd'hui une réalité.

Les chiffres de son évolution montrent jour après jour l'ampleur de son intégrité dans le Domaine de la production de l'énergie électrique (20 % de la production mondiale en 2000[1]).

Des centrales hybrides solaire-éolien peuvent être envisagées en Algérie, vu le potentiel solaire très important dont nous disposons, le pompage éolien peut aussi être très rentable, non seulement dans la région très ventée **d'Adrar**, mais aussi à travers toute la steppe **Algérienne**.

I.1. LE VENT:

Sous l'action des différences de pression atmosphérique continuellement variables qui existent sur notre planète. L'air ne peut jamais être au repos mais se déplace pratiquement en permanence. Le courant correspondant constitue le vent. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. [2]

I.1.1 Direction du vent :

Le vent souffle en principe des zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grands latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de terre.

Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cyclonique et dans le sens direct autour des aires anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

I.1.2 Expression du vent en un point fixe :

La vitesse du vent en un point $V_0(t)$ peut être décomposée en une somme d'une composante moyenne V (lentement variable) et d'une composante variable représentant les fluctuations [2]

$$V_0(t) = V + V(t). \quad (I-1)$$

Avec V : Vitesse moyenne du vent.

$V(t)$: Les fluctuations (turbulences).

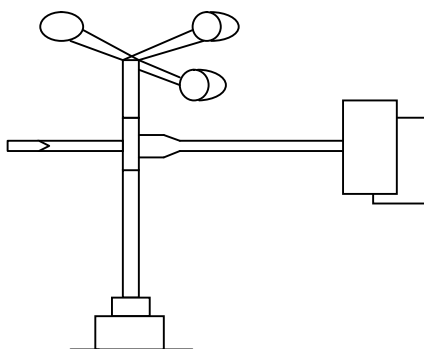


Figure I.1: Ensemble Anémomètre-Girouette

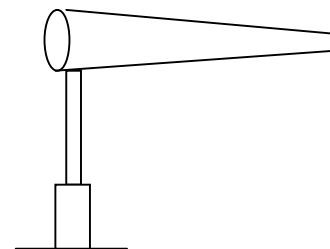


Figure I.2 : Manche à air d'aérodrome

I.1.3 Vitesse de vent : [2]

Une graduation a été établie : l'échelle beaufort qui divise les vents en fonction de leur vitesse en 17 catégories « tableau I.1 »

Degrés	Vitesse de vent	Vitesse de vent	Vitesse de vent	Description	pression
Beaufort	nœuds	m/s	Km/h	générale	En daN/m ²
0	1	0/0.4	<1	calme
1	1/3	0.5/1.5	1/5	Très légère brise	0.13 (1 m/s)
2	4/6	1.6/3.4	6/11	Légère brise	0.8(2.5m/s)
3	7/10	3.5/5.5	12/19	Petite brise	3.2 (5m/s)
4	11/16	5.5/8	20/19	Jolie brise	6.4 (7m/s)
5	17/21	8.1/10.9	29/38	Bonne brise	13(10m/s)
6	22/27	11.4/13.9	39/49	Vent frais	22(13m/s)
7	27/33	14.1/16.9	50/61	Grand frais	33(16m/s)
8	34/40	17.4/20.4	62/74	Coup de vent	52(20m/s)
9	41/47	20.5/23.9	75/88	Fort coup de vent	69(23m/s)
10	48/55	24.4/28	89/102	Tempête	95(27m/s)
11	56/63	28.4/32.5	103/1	Violente tempête	117(30m/s)
12	64/71	32.6/35.9	118/133	Ouragan	160(35m/s)
13	72/80	36.9/40.4	134/149		208(40m/s)
14	81/89	40.1/45.4	150/166		265(50m/s)
15	90/99	45.1/50	167/183		325(54m/s)
16	100/108	50.1/54	184/201		365(54m/s)
17	109/	54.1/60	202/220	Cyclone	470(60m/s)

tableau I.1

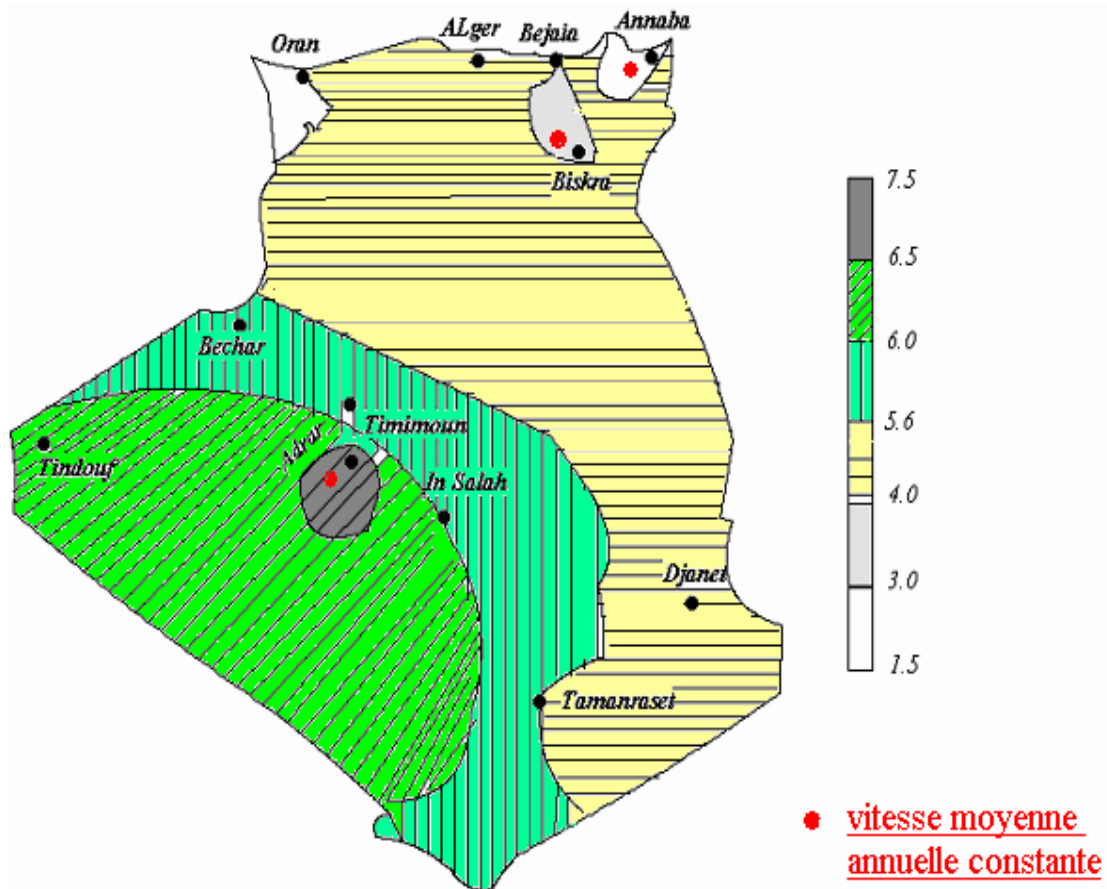


Figure I.3 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie

I.2. DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE : [3]

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent ,Cette énergie est « Renouvelable » c'est-à-dire non dégradé. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Un aérogénérateur, appelé souvent éolienne, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. D'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuse discipline scientifique et du savoir faire de la météorologie à l'écologie.

I.2.1.CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE:

Principe:

Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la Convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [3,4] :

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

I.3. ARCHITECTURE D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL :

Comme l'aérogénérateur à axe horizontal est le plus utilisé, on s'intéresse à la structure interne de cet aérogénérateur. Les trois principaux constituants d'un aérogénérateur à axe horizontal sont : **La tour (mat), la nacelle et les pales** qui sont supportées par le moyeu [12].

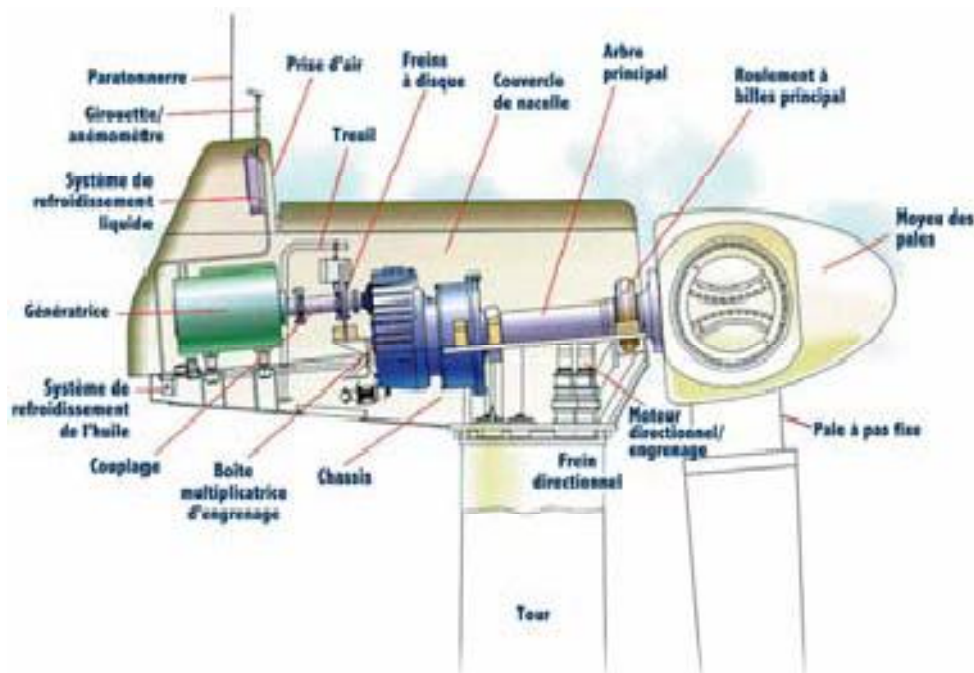


Figure I.4 : Schéma interne d'un aérogénérateur à axe horizontal:

- Ø **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.

- Ø **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.
- Ø **Nacelle** : Elle abrite l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. La figure « Fig. I.4 » présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants.
- Ø **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse entre l'arbre primaire et L'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique
- Ø **L'arbre secondaire** : il comporte un frein mécanique qui permet de freiner le Rotor lors des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- Ø **La génératrice** : elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Ø **Le dispositif de refroidissement** : qui permet d'éviter l'échauffement du système multiplicateur-génératrice
- Ø **Frein à disque** : sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- Ø **Système de mesure** : du vent « anémomètre et girouette » transmet les signaux au système de Contrôle de la turbine.
- Ø **Système de contrôle** : surveille et pilote la turbine.
- Ø **Système hydraulique** : pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- Ø **Paliers** :du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
- Ø **Tour** :en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).
- Ø **Capot de la nacelle** :en structure acier recouverte de composite fibre de verre .

1.4 CLASSIFICATION DES EOLIENNES :[5]

On peut classer les générateurs éoliens selon des différentes catégories [POI 03].

Ces derniers peuvent alors se classer selon :

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc....) ;
- Le mode de régulation (Pitch ou Stall régulation) ;

- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe) ;
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable) ;

1.4.1 Différents types d'éolienne et leurs utilisations

1.4.1.1 Les éoliennes à axe vertical:

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance [3]

En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [3]

1.4.1.2 Les éoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie 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 éolien [4], ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [5].



éoliennes : deux pales

éoliennes trois pales

Figure I.5: Éoliennes à axe horizontal



Structure de Darrieus

Structure de Savonius

Figure I.6 : Éoliennes à axe vertical**a) Structure Savonius (conformément à son inventeur) :**

Son principe de fonctionnement est basé sur le principe de la "traînée différentielle " qui illustre que le mouvement de rotation est dû au fait que l'air en mouvement exerce des pressions très différentes sur les différents corps constituant l'éolienne, et que la force du vent agissant sur la partie concave est très différente de la force s'exerçant sur la partie convexe, créant ainsi un couple moteur sur l'axe.

b) Structure Darrieus :

Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

1.4.2 Le nombre de pales :**1.4.2.1 Les éoliennes rapides :[2]**

Le nombre de pales est ici plus restreint puisqu'il varie entre 2 et 4.

L'intérêt des éoliennes rapides réside dans le fait qu'elles sont, à puissances égales, plus légères que les éoliennes lentes. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Sauf dispositifs spéciaux, il faut un vent de 5 m/s au moins pour qu'elles se mettent à tourner.

Et Caractériser en vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faibles.

1.4.2.2 Les éoliennes lentes :

La figure .I. 7.a représente une éolienne lente. Les pales dont le nombre varie de 12 à 24, couvrent toute la surface de la presque totalité. Le gouvernail ou empennage situé en aval maintient la roue face au vent.

Le diamètre des plus grandes éoliennes de ce genre que l'on construit actuellement oscille entre 5 mètres de diamètre a même été construite aux États-Unis.



a) pales multiples

b) bipales

c) Tripale

Figure I.7 : Différents nombre des pales

1.4.3 Le mode de régulation :

On réalise plus souvent la régulation d'un tel système par la méthode de Pitch régulation (variation de l'angle de calage) ou par la méthode de Stall-régulation (régulation par décrochage Aérodynamique).

Au-delà d'une certaine valeur de la vitesse du vent, la puissance captée par l'aérogénérateur

devient supérieur à ce que peut supporter ses différents éléments, c'est pourquoi la nécessité de la limiter. Deux types de régulation permettent de réaliser cette tâche. [8]

1.4.3.1 La régulation « Pitch » :

Elle consiste à modifier l'angle de calage des pales, c'est-à-dire l'angle d'incidence du vent sur la surface des pales, ce qui a pour effet de modifier la puissance captée.

1.4.3.2 La régulation « Stall » :

Le système de limitation le plus simple et le moins cher est un système de limitation naturel (lié à la forme des pales) dit « stall ». Lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil des pales n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface des pales et par conséquent empêche tout augmentation de la vitesse de rotation. Ce système, certes, est fiable mais peu précis car il dépend de la masse volumique de l'air et de l'état de propreté des pales [8].

1.4.4. Fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable [7] :

Le fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable constitue l'une des plus importantes spécifications des aérogénérateurs, Nous allons respectivement citer en ce qui suit les avantages de l'un par rapport à l'autre :

- ***Fonctionnement à vitesse fixe :***

- Système électrique plus simple ;
- Plus grande fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- Pas besoin de système électrique de commande ;
- Moins cher.

- ***Fonctionnement à vitesse variable :***

- Augmentation du rendement énergétique ,
- Réduction des oscillations du couple ,
- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance ,
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité .

1.4.5 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne :

1.4.5.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

1.4.5.1.1 Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants :

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I-8) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [3].

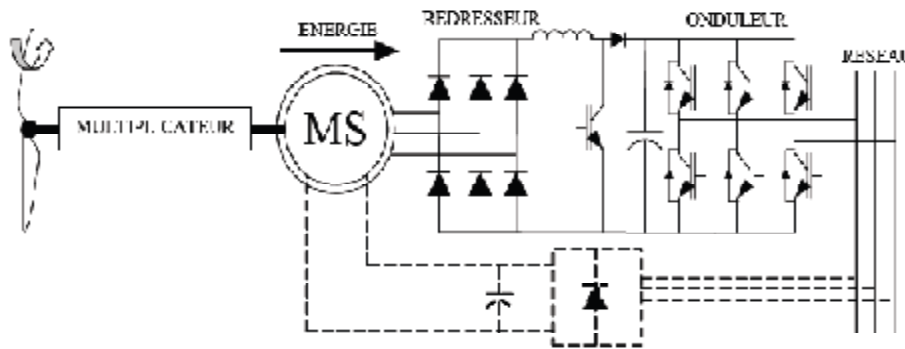


Figure 1-8 : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI

L'exemple de la Figure 1.8 [3] présente une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau. Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les « dv/dt » importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. Notons que l'utilisation de machines synchrones à faible vitesse (grand nombre de paire de pôles) permet de supprimer le multiplicateur de vitesse, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes mais l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent.

I .4.5.1.2 : Génératrice à aimants permanents à couplage Direct :

La vitesse de rotation optimale de la turbine détermine la fréquence d'alimentation f_1 de la génératrice synchrone.

Cette fréquence est produite par le convertisseur. On remarque que les deux convertisseurs doivent transformer toute la puissance produite par la turbine Figure « I.9 ».

Par conséquent, ces convertisseurs sont plus gros que ceux utilisés avec une génératrice asynchrone à double alimentation.

L'entraînement direct permet d'éviter la boîte de vitesses. Cependant, comme la vitesse de rotation est très basse, de l'ordre de 50tr/min, l'alternateur doit être beaucoup plus gros que s'il était conçu pour fonctionner, par exemple, à 1200 tr/min.

Par ailleurs, la génératrice à aimants permanents ne requiert pas de bagues ni de balais et les pertes Joules dans le rotor sont nulles. Globalement, même si la machine est plus grosse, les avantages de ce montage en font la technologie éolienne préférée pour générer les plus grandes puissances (2 MW à 5 MW). [10]

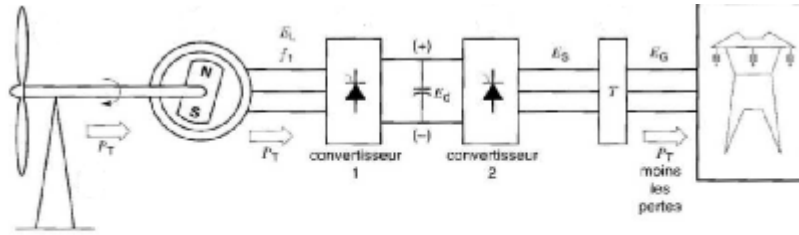


Figure I.9 : Génératrice à aimants permanents à couplage Direct

1.4.5.2. Générateurs asynchrones :

Dans le domaine de la génération d'énergie couplée au réseau, les **machines asynchrones à cage** dominent encore car elles offrent des performances attractives en terme de coût d'investissement, tout particulièrement dans les solutions de base où elles sont directement connectées au réseau. Mais lorsqu'il s'agit de réaliser un entraînement à vitesse variable, on leur préfère plutôt des **machines à rotor bobiné doublement alimentées** qui offrent d'excellents compromis performances / coût.

La tension entre phases des machines est généralement 690 V et peut monter à 960 V en très forte puissance (ex. NEG Micon 2 MW). Le refroidissement du stator est à air ou liquide avec circulation par pompe.

▼ Les machines asynchrones à cage :[9]

- MAS type **Dahlander** qui permet de fonctionner à deux vitesses de rotation (Fig.I.10),
 mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent
- Ø Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
- Ø Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.

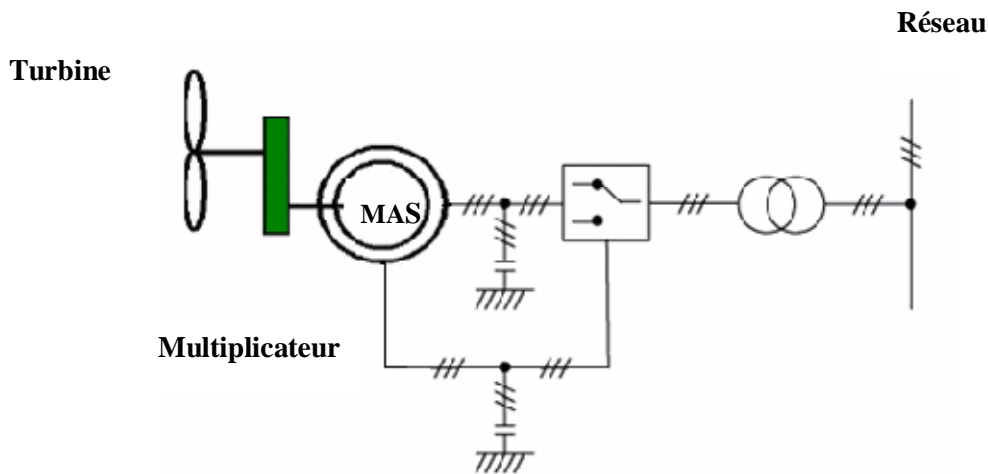


Figure .I.10: Système éolien basée sur la MAS de type Dahlander à deux vitesses de rotation

Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Fig.I.11).

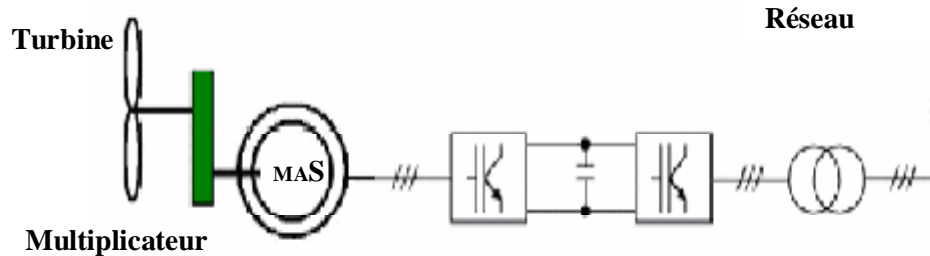


Figure 1.11 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable .

1.4.5.3.Machines Asynchrone à double alimentation (voir chapitre II)

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application.

L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulement rotorique, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70% Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.

Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines Asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie Décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable ;
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant[7].

1.4.6 L'accouplement mécanique :

Si on parle de l'accouplement mécanique c'est qu'on parle d'accouplement entre la génératrice et la turbine, les vitesses de ces dernières ne sont pas égales, et que la vitesse de la génératrice est très grande. On les associe alors avec un multiplicateur de vitesse qui a comme rôle principal d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Mais la présence de ces multiplicateurs de vitesse engendre des problèmes de vibration, de bruits et de coût de maintenance.

Les génératrices à attaque directe sont celles qui n'ont pas de multiplicateurs elles

prennent alors une vitesse de rotation égale à celle de la turbine qui est très faible, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, ce composant lourd et coûteux et présente l'avantage de donner des machines plus compactes avec des charges de maintenance réduites.

1.5 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS : [8]

Le fait que l'énergie éolienne soit attrayante et de plus en plus utilisée comme alternative revient sans aucun doute au fait qu'elle ait des avantages. Cependant, elle en possède aussi des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

1.5.1. Les avantages :

- Ø Aucune rejection de CO₂ ni d'aucun autre gaz polluant ou toxique.
- Ø Renouvelable et abondante, elle constitue l'une des énergies du futur, lorsque les réserves mondiales en énergies fossiles seront épuisées.
- Ø Contrairement au nucléaire, l'exploitation de l'énergie éolienne ne représente pas de risque .
- Ø C'est une source d'énergie locale qui peut répondre aux besoins locaux des zones éloignés.
- Ø En termes de coût de revient, elle est la moins chère parmi toutes les énergies renouvelables.

1.5.2 Les inconvénients :

Le bruit, certes il est nuisible, mais il a fortement diminué du fait des progress réalisés au niveau du multiplicateur mécanique.

La qualité de l'énergie électrique n'est toujours pas bonne, en effet c'est le caractère aléatoire qui en est à l'origine.

1.6 .CONVERSION DE L'ENERGIE DE VENT :

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'un Générateur (Fig. I.12)

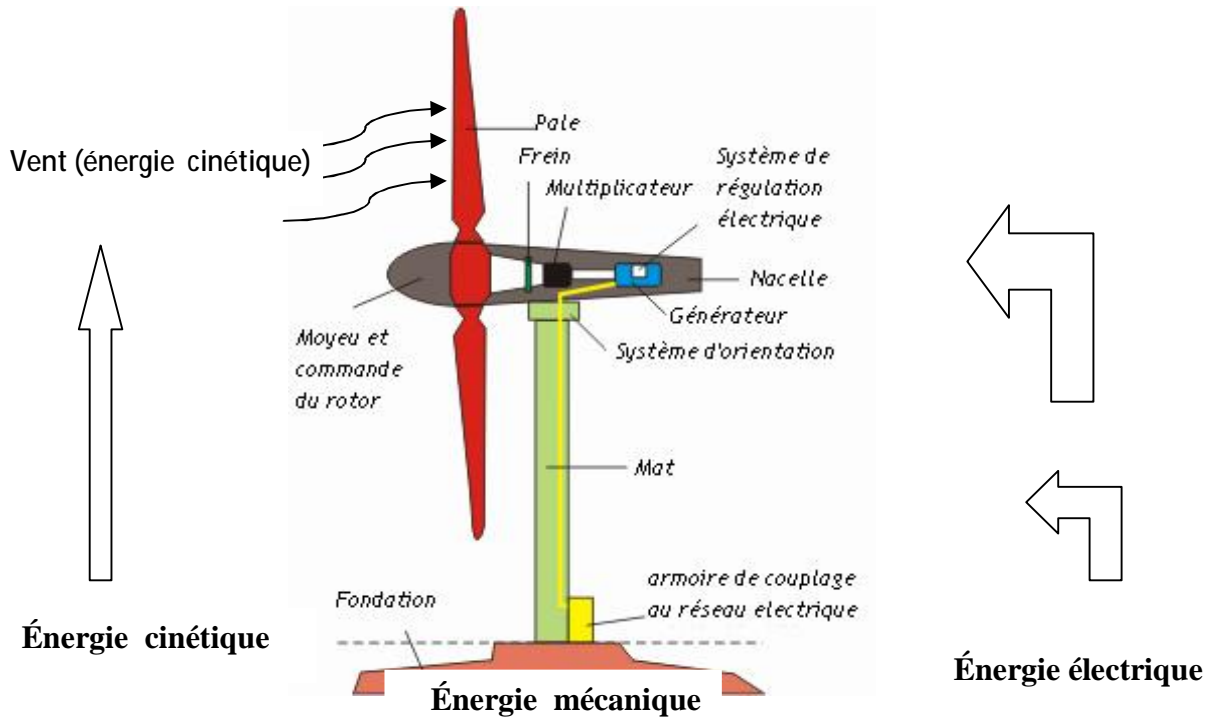


Fig. I.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.6.1 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

1.6.1.1 Loi de Betz :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la **Figure .I .13** sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit $(V_1+V_2) / 2$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:[4]

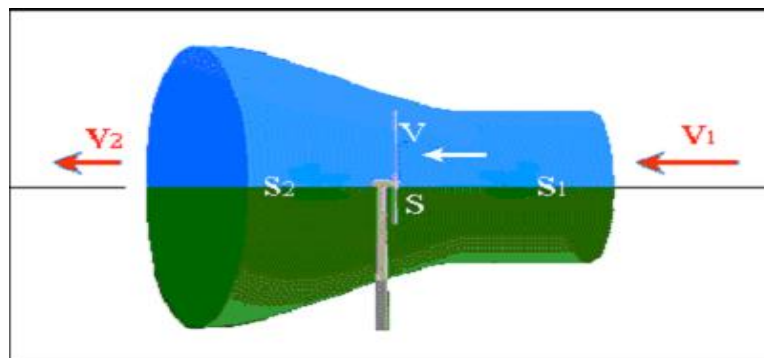


Figure .I .13 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

De la figure I-13 on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{I. 2})$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par:

$$F = \rho \cdot S V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 3})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 4})$$

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 d'où :

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 5})$$

déduit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I. 6})$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (I. 3) et (I. 4) on obtient :

$$P_{aero} = (1/2) \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I. 7})$$

$$P_{aero} = (1/4) \cdot \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (\text{I. 8})$$

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

$$P_{mt} = (1/2) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{I. 9})$$

F « le coefficient de puissance :

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{P_{aero}}{P_{mt}} \\ &= \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \end{aligned} \quad (\text{I. 10})$$

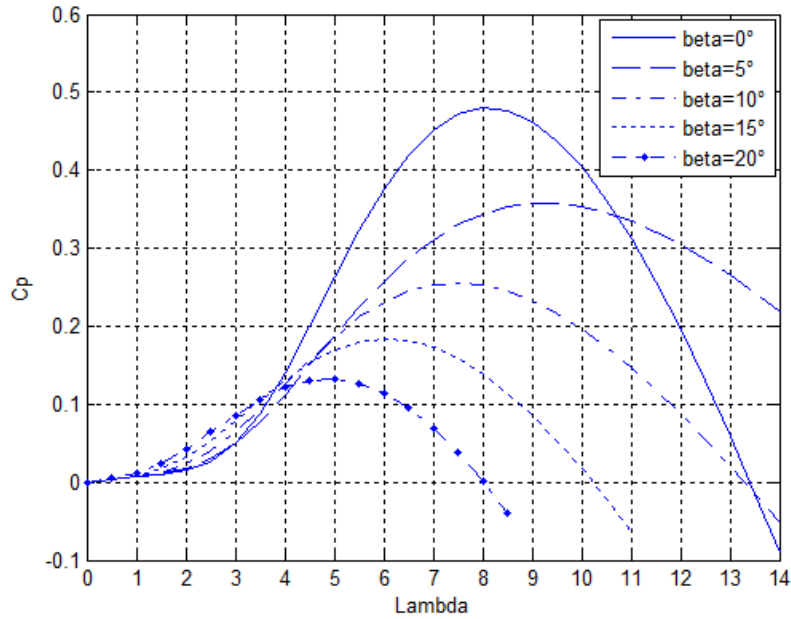


Figure.1.14 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne

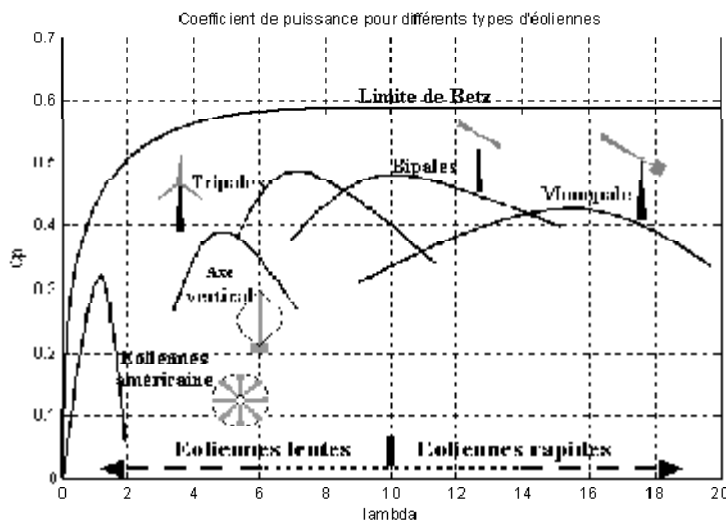


Figure I-15 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur

Ce coefficient présente un maximum de $\frac{16}{27}$ soit 0,59 . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée . Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

En combinant les équations (1.8) et (1.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un Aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) P_{mt} = C_p(\lambda) P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \tag{I. 11}$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{V_1} \quad (\text{I. 12})$$

Ω_{turbine} : vitesse de rotation de la turbine .

R : la longueur (rayon) de la pale

1.6.2 Modélisation de turbine éolienne:

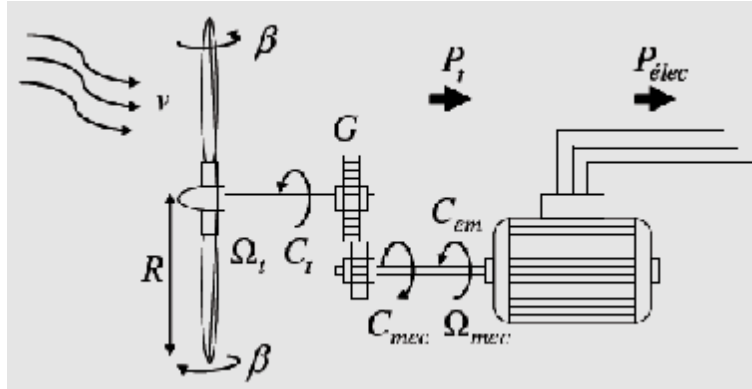


Figure 1.16: Configuration d'une éolienne

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie. Considérons une turbine éolienne munie des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain de vitesse G .

La puissance aérodynamique extraite du vent est donnée par l'équation (1.10), le couple s'écrit alors de la manière suivante :

$$\begin{aligned} C_{aer} &= \frac{P_m}{\Omega_{\text{turbine}}} \\ &= \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{V_1} \right)^2 \rho \pi R^2 V_1^3 \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \end{aligned} \quad (\text{I. 13})$$

1.6.1.2 Partie mécanique :

a) Modèle de la turbine éolienne :

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante:

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot s \cdot V^3}{2} \quad (\text{I. 14})$$

Où ρ : la densité de l'air.

v : la vitesse du vent.

S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la Longueur de la pale.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine Éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (1.11) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . Le ratio de la vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et

$$\lambda = \Omega_t \cdot R / V = \Omega_{mec} \cdot R / (G \cdot V_1) \tag{I. 15}$$

Ω_t : est la vitesse de la turbine.

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \cdot [(C_2/\lambda_i) - C_3 \cdot \beta - C_4] \cdot e^{-(C_5/\lambda_i)} + C_6 \cdot \lambda \tag{I. 16}$$

Avec
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1}$$

$C_1=0.5176$; $C_2=116$; $C_3=0.4$; $C_4=5$; $C_5=21$; $C_6= 0.0068$.

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure «1.9 ». La valeur maximale de C_p ($C_{pmax}=0.48$) est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale

λ_{nom}

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{(0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot)V^3}{\Omega_t} \tag{I. 17}$$

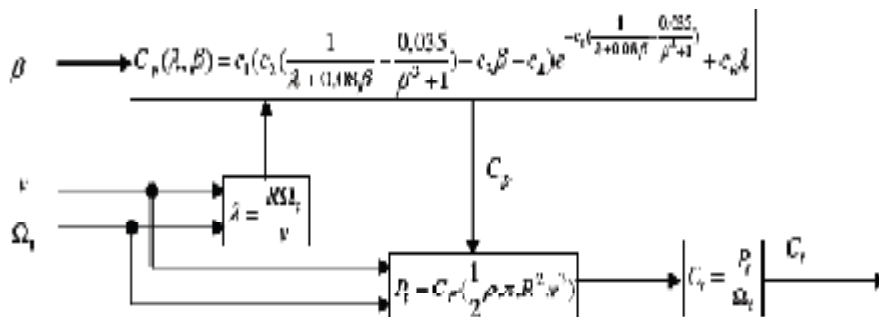


Figure 1.17 : Modèle de la turbine éolienne

b) Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les Pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur, [1].

$$C_{mec} = C_t / G \tag{I. 18}$$

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur .

c) Modélisation de l'arbre de la turbine :[7]

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f * \Omega_{mec} \tag{I. 19}$$

J : Inertie totale des parties tournantes (Kg.m²).

f : Coefficient de frottements visqueux.

C_T = *C_{mec}* + *C_{em}* : Couple total de l'éolienne.

C_{em} = Couple électromagnétique du générateur en (N.m)

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique *C_{em}* a un signe négatif. L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté Générateur c'est-à-dire :

$$J = (J_{turbine} / G^2) + J_g \tag{I. 20}$$

G : le gain du multiplicateur.

J_g : l'inertie de la génératrice électrique.

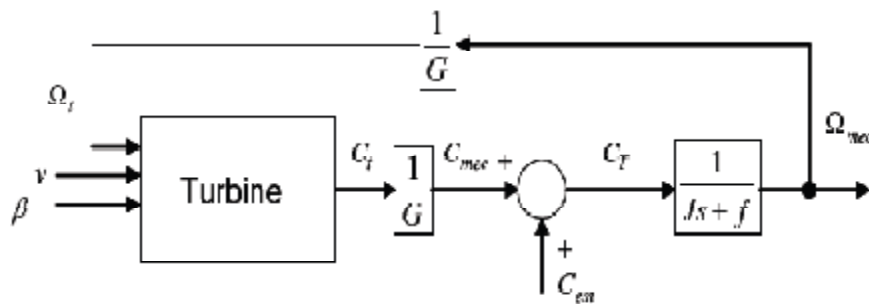


Figure 1.18 : Modèle de l'arbre –multiplicateur-turbine éolienne

CONCLUSION :

Dans cette chapitre , on a présenté un état de l'art de éolien (Vent, direction de Vent, vitesse de vent ...) et sur les systèmes de conversion éolien (convertir de énergie cinétique du vent en énergie Mécanique et énergie mécanique en énergie électrique) le Qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes :

les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal ,rapides et lentes,

Et la Modélisation d'une turbine éolienne, plus les types des Machines asynchrones en généralement.

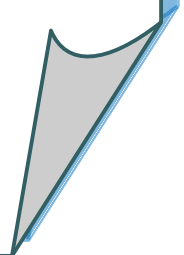
Nous avons utilisé le développement théorique des systèmes éoliens connu par la Théorie de BETZ qui donne les performances d'un système éolien avec un coefficient

Théorique de 0.48 Maximum qui reste inatteignable pour les éoliennes Industrielles actuelles.

Bibliothèque chapitre I

- [1] G.SALLOUM, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation" thèse de doctorat, INP TOULOUSE, 13 Mars 2007.
- [2] LES Éoliennes "théorie conception et calcul pratique " livre ; D.LE GOURIERES Editions du moulin Cadiou , docteur en Universités Françaises 2010 .
- [3] F.POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [4] étude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne mémoire de magister par : AKEL FETHI 10/03/2009.
- [5] S.METATLA,"Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA)", mémoire de magistère, ENP, 2009.
- [7] F.MERRAHI, "Alimentation et commande d'une MADA (application à l'énergie éolienne)", mémoire de magistère, ENP, 2007.
- [8] Mémoire de Fin d'Etude, 2007, Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation.
- [9] Techniques de l'Ingénieur (**Aérogénérateurs électriques**).
- [10] Wildi Sybille "Electrotechnique" 4^{eme} édition.

CHAPITRE II :
ETUDE ET MODELISATION
DE GADA



CHAPITRE II : ETUDE ET MODELISATION DE GADA

INTRODUCTION:

La machine asynchrone à bagues présente l'avantage d'être mieux adaptée à la variation de vitesse. Des dispositifs primitifs, comme les plots résistifs et le hacheur rotorique, ont été introduits afin d'assurer le fonctionnement à vitesse variable de cette machine. Toutefois, ces dispositifs ne présentent qu'une plage de variation de vitesse limitée et un rendement global réduit. Plus tard, le montage en cascade hyposynchrone de la machine à bagues vient d'améliorer le problème du rendement. Enfin, suite à une large évolution des composantes de l'électronique de puissance et de la commande numérique, deux structures ont émergées pour l'alimentation de cette machine pour varier sa vitesse : la première consiste à coupler le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un convertisseur AC/DC/AC (redresseur – onduleur) ; deux armatures sont. C'est la double alimentation de la machine, structure présentant une bonne flexibilité et un nombre suffisant de paramètres de réglage [1].

Les éoliennes à base des génératrices asynchrones double alimentée fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau qui donné lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

II .1 Différentes topologies de la MADA .

II .1.1 : Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless »

Cette machine est à double stator figure « II.1 ». Un bobinage transite la puissance il a une grande section et est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation. Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques [2], [5].

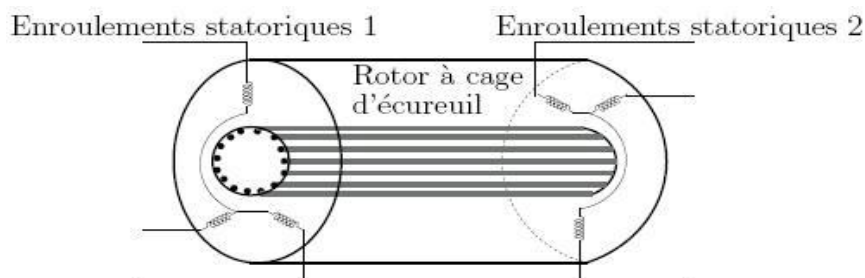


Figure II.1: MADA à double stator.

Cette machine présente l'intérêt de fonctionner à vitesse variable. Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux. Cependant la machine a un stator plus volumineux et plus complexe à réaliser (Figure « II.2 »).

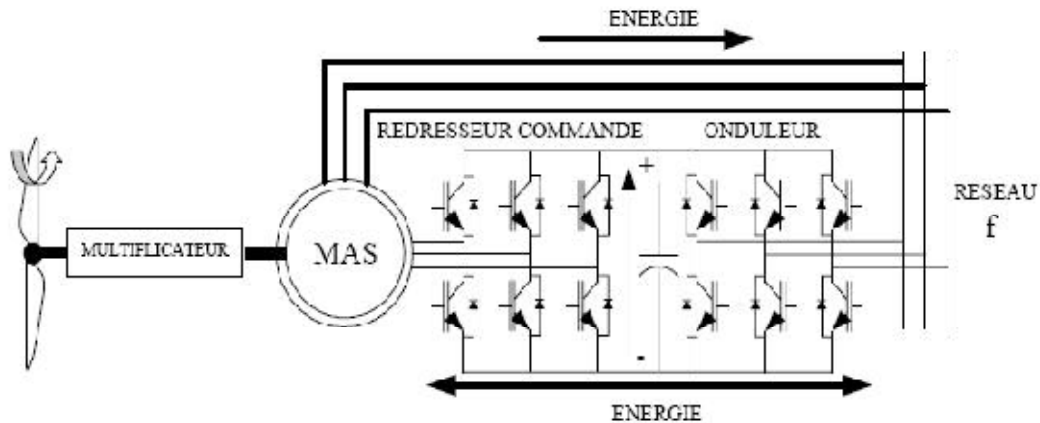


Figure II.2: MADA Brushless.

Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum. Cependant si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur.

II .1.2 : Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné

La MADA à rotor bobiné est une machine qui a un stator identique aux machines asynchrones classiques. Son rotor est bobiné en étoile dont l'accès se fait grâce à un contact glissant. Le contrôle du fonctionnement de la machine se fait grâce à une fraction de la puissance nominale circulant dans le rotor. Cela implique un convertisseur réduit et donc moins coûteux. Il existe différents systèmes décrits ci-dessous :

II .1.2.1 : Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure « II.3 », le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

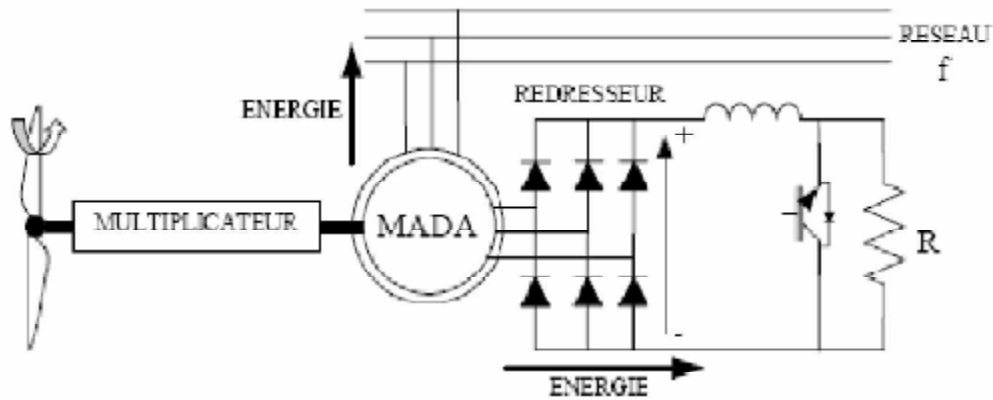


Figure II.3 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. [6]

II .1.2.2 : Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer, Figure « II.4 »)

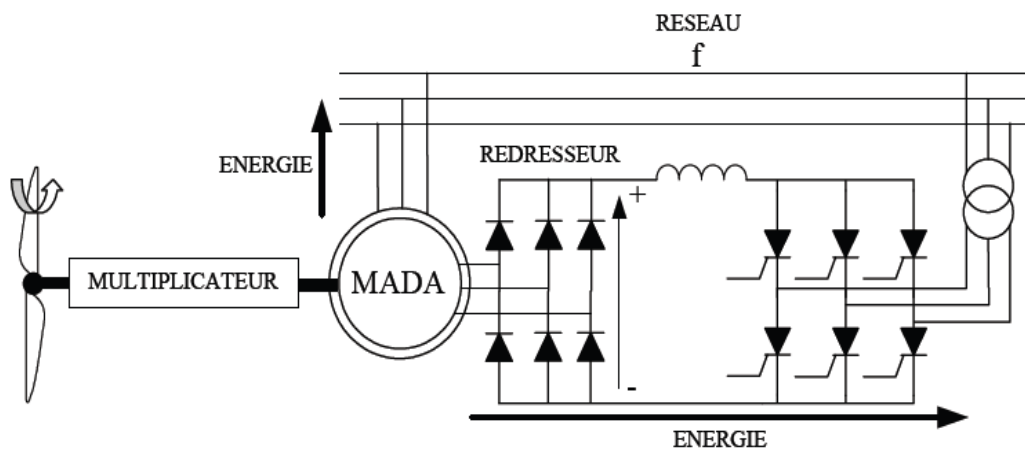


Figure II.4 : MADA, structure Kramer

L'ensemble « redresseur-onduleur » est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Comme dans le cas de la machine Brushless, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%.

L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT (§ II .1.2.4). [2]

II .1.2.3 : Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le réseau et le rotor on utilise un cycloconvertisseur Figure « II.5 ».

L'ensemble est appelé structure Scherbius [2]. Grâce à la bidirectionnalité du convertisseur, la plage de variation de la vitesse est doublée (de 70 à 130 % de la vitesse de synchronisme).

L'utilisation des thyristors dans se montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance. [5]

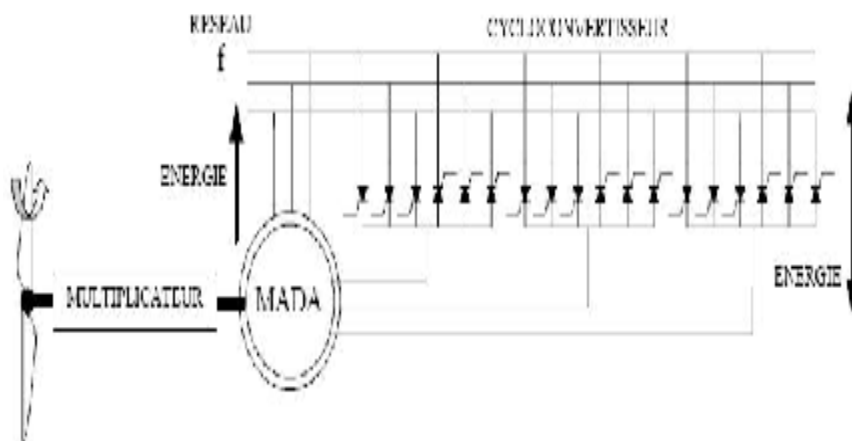


Figure II.5 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

II.1.2.4 : Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec convertisseur MLI

Cette structure Figure « II.6 » repose sur le même principe que la précédente. À la place du cycloconvertisseur on utilise un montage redresseur / Onduleur. Les transistors IGBT utilisés dans ce montage sont commandés à l'ouverture et à la fermeture, ceci implique la possibilité d'utiliser la MLI. Avec une commande appropriée, il est possible d'atténuer les harmoniques non nulles et d'améliorer le facteur de puissance.

Tout en ayant la même philosophie de fonctionnement que la structure « Brushless » le dispositif « Scherbius » offre une simplicité de fonctionnement (présence d'un seul bobinage au rotor et au stator et donc un faible coût de fabrication et de maintenance).

Le glissement est compris entre $[-30, +30]$ %, le convertisseur et donc dimensionné pour 30% de la puissance nominale. La puissance produite n'est pas limitée à la puissance nominale car le rotor au fonctionnement hypersynchrone produit de l'énergie et la fournit au réseau. Cependant la commande MLI entraîne des gradients de tension importants d'où la présence de courants rotoriques de fréquences élevée responsable de pertes fer plus importantes. Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien.

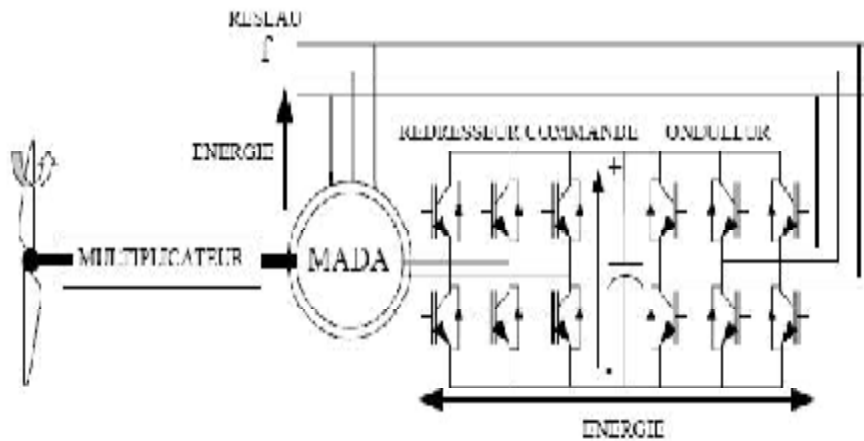


Figure II.6: Structure de Scherbius avec MLI.

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

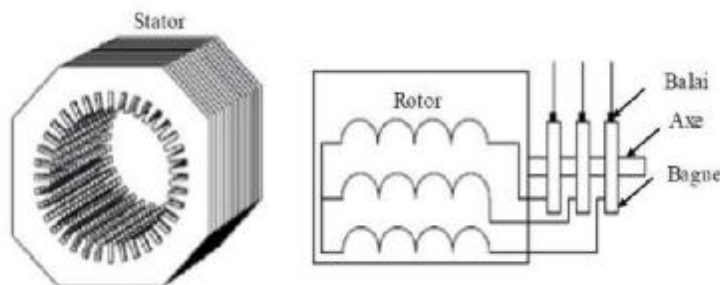


Figure II.7 : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure II.7) .

II.2.1. Emploi des machines asynchrones à double alimentation :

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné 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. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hyposynchrone [2].

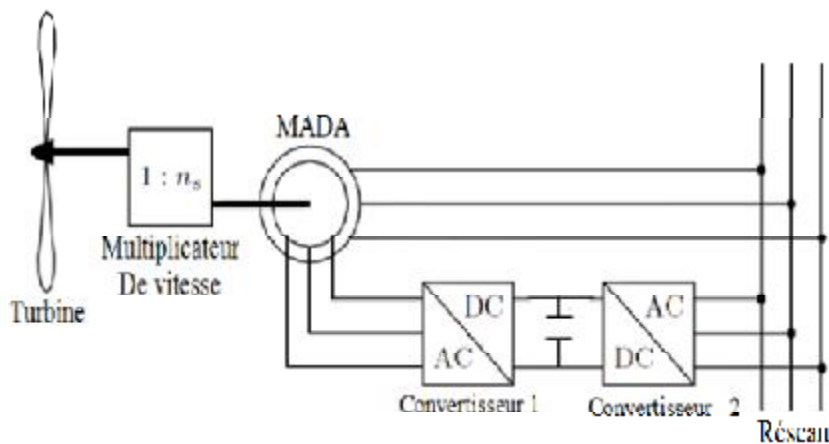


Figure II.8 : Système à vitesse variable par double alimentation

Nous verrons comment nous pouvons utiliser la "réversibilité" de ce principe afin de faire fonctionner la machine asynchrone à double alimentation en générateur à vitesse variable. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

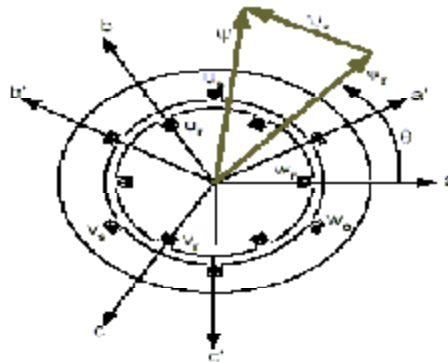


Figure.II.9 : Configuration des enroulements et des flux dans une MADA

II.3.1. Principe de fonctionnement de la MADA:

Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. La puissance P_s est fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P_s$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste gP_s sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g)P$ [3].

Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m. créés au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} = \frac{(W_s - W)}{W_s}$$

N_r et N_s : sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

W_s et W sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

Le courant dans le stator et le rotor est défini comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$(I_r / N_r) = (I_s / N_s) \quad (\text{II.2})$$

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

$$(S_r / S_s) = (I_r / I_s) \cdot (E_r / E_s) = g \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II-3) montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g [3].

II. 3.2 Fonctionnement de la MADA à quatre quadrants :

La figure « II.10 » montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure Scherbius **onduleur PWM+Redresseur**). P_{RES} est la puissance délivrée ou fournie par le réseau, P_S la puissance transitant par le stator, P_R la Puissance transitant par le rotor et P_{MEC} est la puissance mécanique.

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hyposynchrone. En mode moteur hypersynchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement génératrice, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hyp-synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper-synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [2].

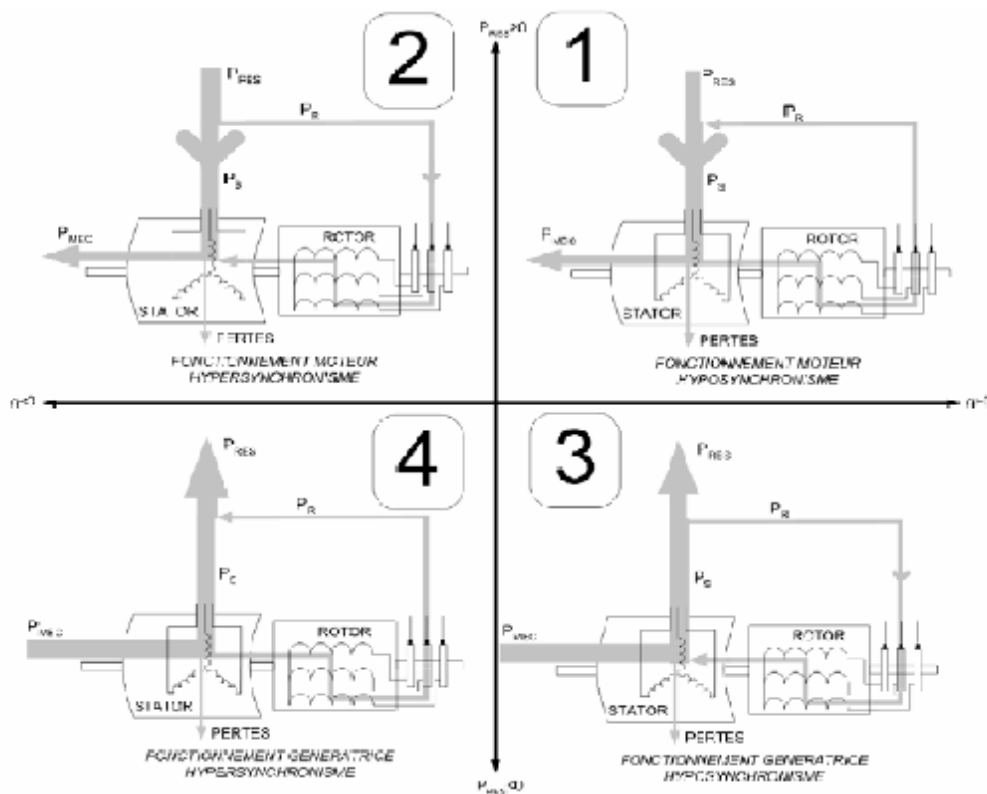


Figure II.10 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

II. 4. Etude de la puissance pour la MADA :

Les puissances (en ignorant les pertes) de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$Pr = -gPs .$$

$$Pm = -(1-g) Ps .$$

Type de fonctionnement	Moteur $Pm < 0$	Générateur $Pm > 0$
<i>hypo synchrone</i> $Ps = -(Pm + Pr)$	$Ps > 0$ $Pr < 0$	$Ps < 0$ $Pr > 0$
<i>hyper synchrone</i> $Pm = -(Ps + Pr)$	$Ps > 0$ $Pr > 0$	$Ps < 0$ $Pr < 0$

II.5. Les formes Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

II.5.1. Application moteur :

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et Asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine .en générale La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

II.5.2. Application génératrice (Fonctionnement en génératrice à vitesse variable)

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement de la MADA, il est préférable de négliger toutes les pertes. En tenant compte de cette hypothèse, la puissance P qui est fournie au stator traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie égale à

$(1 - g)P$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance composée de deux convertisseurs statiques séparés par un bus continu. Ce réseau reçoit donc

$(1 + g)P$. Une fois le rotor est connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, le nombre de spires de bobinage et le courant statorique .

II. 5. 3. Domaine d'applications de la GADA :

La machine à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la Machine asynchrone classique et synchrone. Surtout en ce qui concerne la gamme de la Vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée Par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la Commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La GADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et Navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [1].

II. 5. 4. Application de la MADA dans les systèmes éoliens (GADA):

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7a 1,3 fois la puissance nominale.

II. 6. Modélisation de la machine (génératrice) asynchrone à double alimentation :

La modélisation d'une machine électrique est phase primordiale de son développement .les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Dans ce chapitre sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machin asynchrone (génératrice) à double alimentation dans le référentiel lié au champ tournant. Ce dernier nous a permet d'obtenir un modèle mathématique adapté de GADA et commande par utilise la puissance active et réactive mesure au niveau de rotor de la GADA.

II.6.1.Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralise :

Description :

La machine « GADA » asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques (A_s, B_s, C_s) Décalées entres elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (A_r, B_r, C_r) .

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa} = -R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = -R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = -R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{array} \right.$$

Equations magnétiques : les équation magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Ls] & [Msr] \\ [Msr] & [Lr] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -Is \\ Ir \end{bmatrix} \text{ avec } [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} ; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$[Ir] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} ; [Is] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

$$; [Ls] = \begin{bmatrix} ls & Ms & Ms \\ Ms & ls & Ms \\ Ms & Ms & ls \end{bmatrix} ; [Lr] = \begin{bmatrix} lr & Mr & Mr \\ Mr & lr & Mr \\ Mr & Mr & lr \end{bmatrix}$$

$$[Msr] = [Mrs] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et Cette le stator ,avec θ écart angulaire les axes des ces dernières .

II. 6. 2. La transformée de Park :

Appelée souvent transformation des deux axes ,cette transformation a été présente par **PARK** en 1929 lors de l'étude de la machine asynchrone comme moyen de simplifier les équations de celle-ci . fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- * Homopolaire (indice o) ;
- * D'axes directs (indice d) ;
- * D'axes en quadrature (indice q).

L'idée de Park repose sur le fait qu'un champ tournant Créé par un système triphasé peut l'être aussi à l'idéntique par deux courants **Id** ,et **Iq** ,et deux tension . la transformation qui traduit ce passage est donné par :

$$[V]_{dq0} = [P(\theta_a)] \cdot [V]_{abc} \quad \text{et} \quad [I]_{dq0} = [P(\theta_a)] \cdot [I]_{abc}$$

$[P(\theta_a)]$ est la matrice de Park :

$$[P(\theta_a)] = \sqrt{2/3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}. \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\theta = \int \omega_{\text{coor}} dt$ Angle entre le système d'axes (d, q) et le système d'axes (O_a, O_b, O_c).

Wcoor : Vitesse angulaire de rotation du système d'axe biphasé par rapport

D'axe triphasé. au système

$[V_d]$ est le vecteur des tensions du système biphasé d'axes direct ;

$[V_q]$ est le vecteur des tensions du système biphasé d'axes quadrature .

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 :

$$[P(\theta_a)]^{-1} = \sqrt{2/3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & -\sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}. \quad (\text{II.5})$$

Ou encore : $[V_s] = [P(\theta_a)]^{-1} \cdot [V_d]$.

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

Equation matricielle :

Tension :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Courant :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

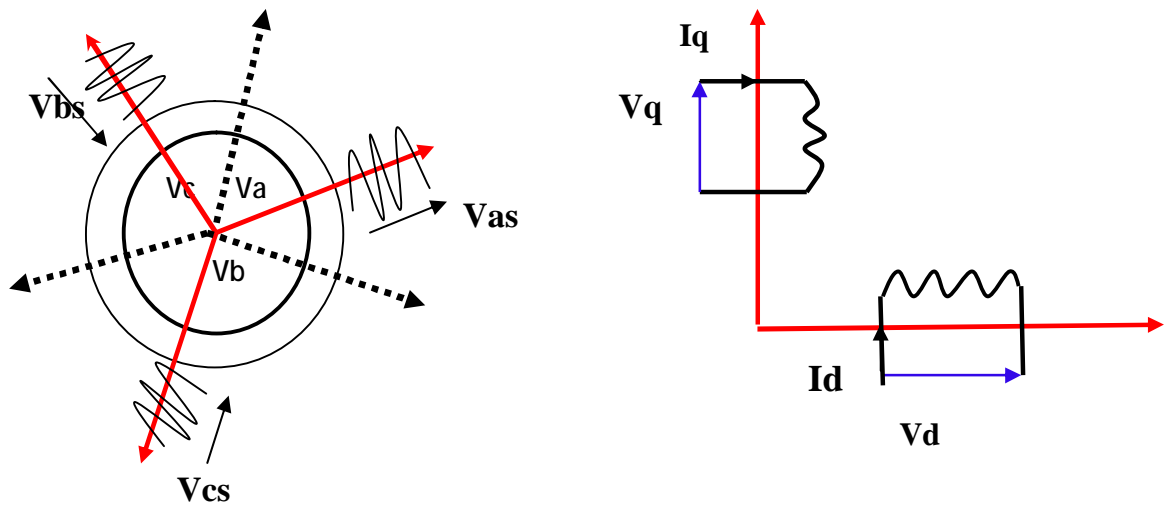


Figure II.11 : Schémas de transformation de park

II. 6. 3. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q) :

La théorie de la génératrice asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de **Park** qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé a des axes perpendiculaires (biphasés), appelés l'axe direct d et axe quadrature q . Pour des raisons de simplification ; nous considérons les **hypothèses** simplificatrices suivantes:

- ✚ La machine sera supposée idéale, c'est à dire que les ampères-tours seront supposés distribués
- ✚ sinusoïdalement le long de l'entrefer de la machine et que les harmoniques d'espace seront négligés ;
- ✚ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau ;
- ✚ Les pertes dans le fer (par hystérésis et courant de Foucault) seront négligées
- ✚ La saturation du circuit magnétique sera négligée ;
- ✚ Les grandeurs homopolaires seront considérées comme nulles.

II. 7. 1. Equations électriques et l'équation mécanique de la GADA :

Les équations générales de la machine asynchrone classique dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante .

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 8})$$

Avec respectivement :

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

ω_s et ω_r : sont les pulsations rotoriques ; des grandeurs électriques statoriques et rotoriques

$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}$ et ϕ_{rq} : sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé leurs expressions sont données par .

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

En introduisant le système d'équations des flux magnétiques (2.13) dans celui d'équations électriques (2.12), et en réarrangeant tout, on trouve :

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

L_r et L_s : sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

M : l'inductance mutuelle.

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

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II. 11})$$

Avec respectivement :

- C_{em} : Le couple électromagnétique ;
- C_r : Le couple résistant ;
- f : le coefficient de frottement visqueux de la GADA ;
- Ω : la vitesse de rotation de l'axe de la GADA ;
- J : l'inertie des parties tournantes.

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

$$\begin{cases} C_{em} = -p (I_{sq}\Phi_{sd} - I_{sd}\Phi_{sq}) \\ C_{em} = -p \frac{M}{L_r} (I_{sq}\Phi_{rd} - I_{sd}\Phi_{rq}) \\ C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rq}\Phi_{sd} - I_{rd}\Phi_{sq}) \end{cases} \quad (II. 12)$$

- Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

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

$$\begin{cases} P_r = V_{rq} I_{rq} + V_{rd} I_{rd} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (II. 14)$$

- **II. 7. 2. Validation du modèle :**

II.7.2.1. Système d'état du modèle :

A partir des équations (II,12) et (II,13) le modèle peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$\mathbf{V} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{L} \cdot \frac{d\mathbf{I}}{dt} \quad (II. 15)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & W_s L_s & 0 & -W_s M \\ -W_s L_s & -R_s & M W_s & 0 \\ 0 & W_r M & R_r & -W_r L_r \\ -W_r M & 0 & W_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} + \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

En mettant (II. 16) sous forme d'état, on trouve :

$$\frac{d}{dt} [\mathbf{I}] = -[\mathbf{L}]^{-1} \{ [\mathbf{V}] - [\mathbf{G} \mathbf{1}] [\mathbf{I}] \}$$

$$L = \begin{bmatrix} -Ls & 0 & M & 0 \\ 0 & -Ls & 0 & M \\ -M & 0 & Lr & 0 \\ 0 & -M & 0 & Lr \end{bmatrix} ; G1 = \begin{bmatrix} -Rs & Ws.Ls & 0 & -Ws.M \\ -Ws.Ls & -Rs & M.Ws & 0 \\ 0 & Wr.M & Rr & -Wr.Lr \\ -Wr.M & 0 & Wr.Lr & Rr \end{bmatrix}$$

II.7.2.2. 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 résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d’une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasés parfaite, l’une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d’amplitude de $(220 \text{ v} * \sqrt{2}; 100 * \pi \text{ rad/s}; 50\text{Hz})$, et l’autre au niveau du rotor avec une amplitude de $(12 * \sqrt{2} \text{ v}; 4 * \pi \text{ rad/s}; 2\text{Hz})$ et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraînée à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min.

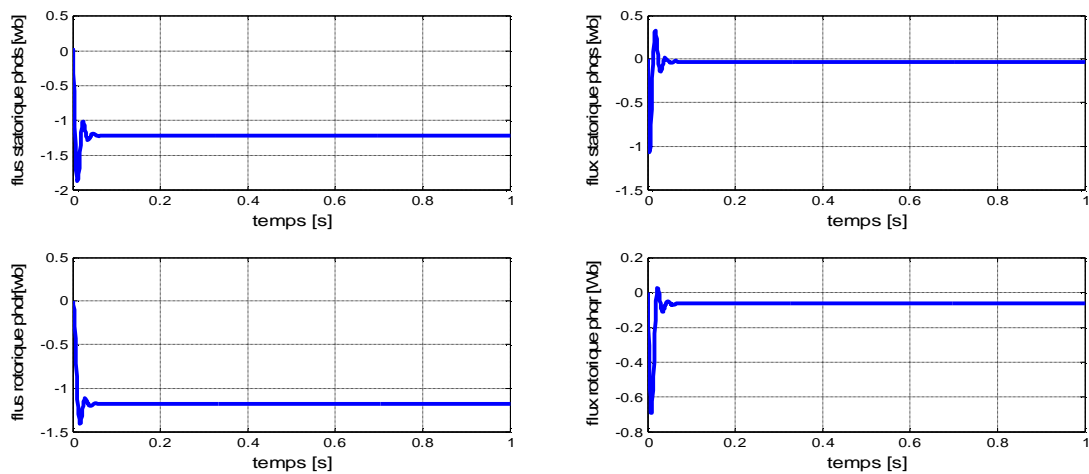


Figure II.12 : Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q)

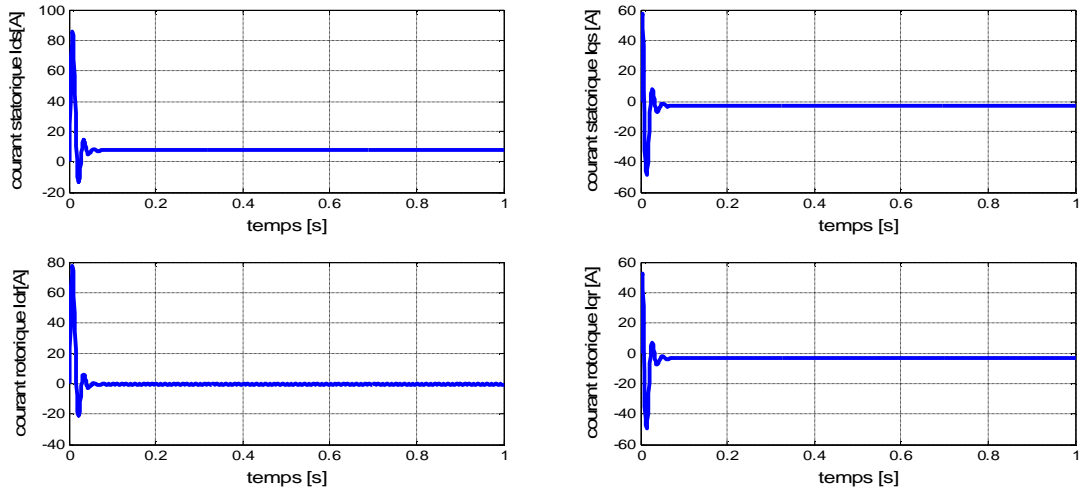


Figure II.13 : Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)

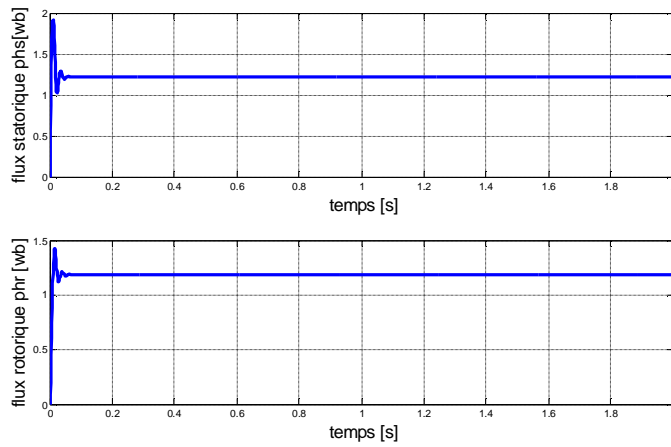


Figure II.14 : Flux statorique et rotorique ($\phi_s ; \phi_r$)

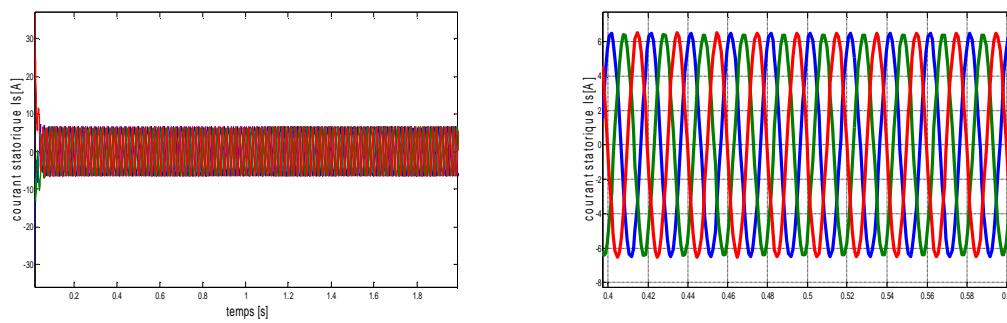


Figure II.15 : Courant statorique en système triphasé (a ,b,c)

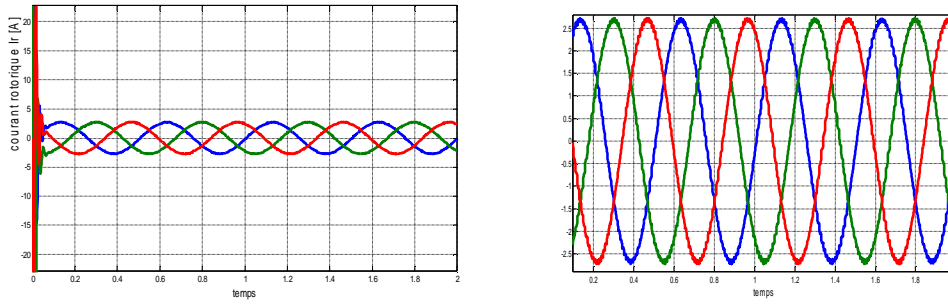


Figure II.16 : Courant rotorique en système triphasé (a ,b,c)

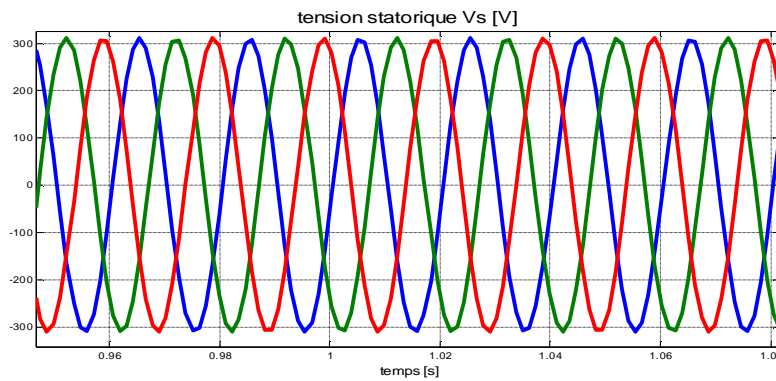


Figure II.17 : Tension d'alimentation statorique

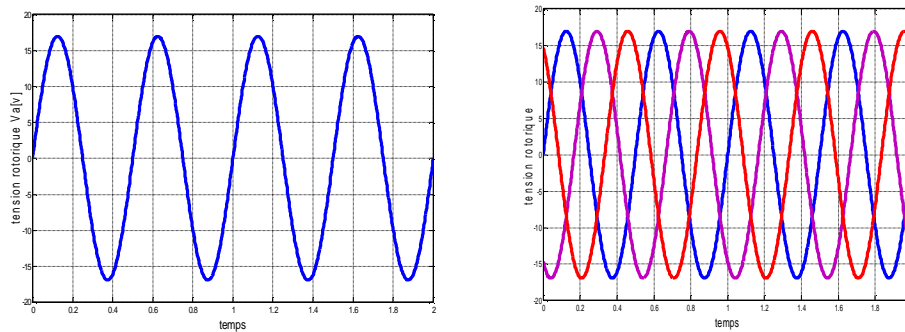


Figure II.18 : Tension rotorique (a,b,c)

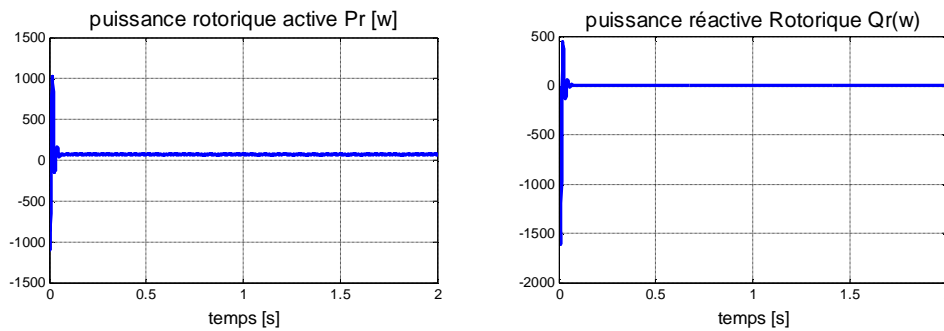


Figure II.19 : Puissance rororique (Pr,Qr)

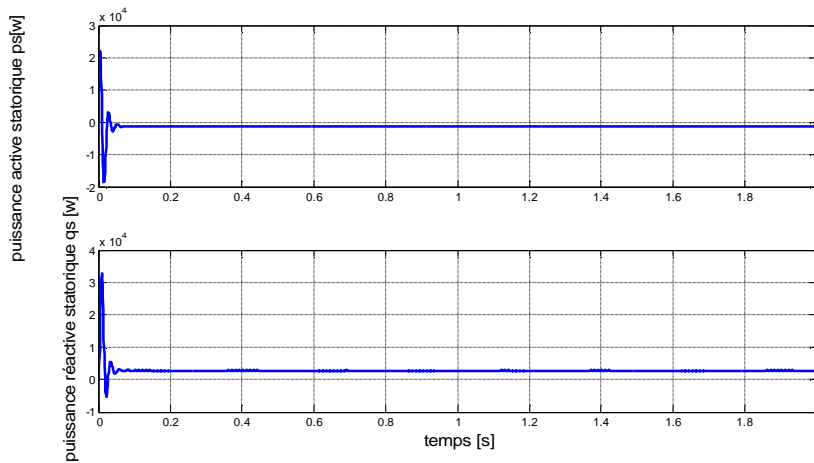


Figure II.20 : Puissances statoriques (Ps,Qs)

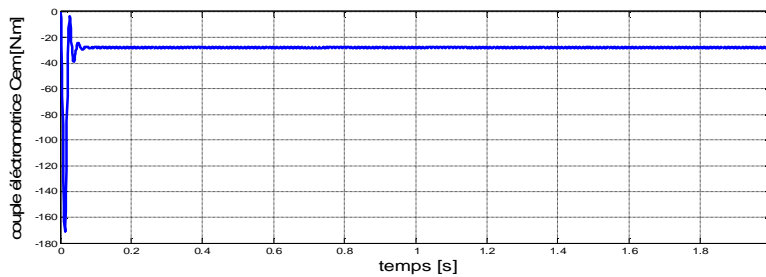


Figure II.21 : Couple électromagnétique

? *Modèle par variation de vitesse :*

Ø *deux vitesses différentes, régime hypo synchrone)*

$$V = G2.I + C.I + L \cdot \frac{dI}{dt} \tag{II.17}$$

$$\begin{bmatrix} Vsd \\ Vsq \\ Vrd \\ Vrq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Rs & WsLs & 0 & -WsM \\ -WsLs & -Rs & MWs & 0 \\ 0 & 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Rr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Isd \\ Isq \\ Ird \\ Irq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & WrM & 0 & -LrWr \\ -WrM & 0 & WrLr & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Isd \\ Isq \\ Ird \\ Irq \end{bmatrix}$$

$$+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} -Ls & 0 & M & 0 \\ 0 & -Ls & 0 & M \\ -M & 0 & Lr & 0 \\ 0 & -M & 0 & Lr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Isd \\ Isq \\ Ird \\ Irq \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

$$G2 = \begin{bmatrix} -R_s & W_s L_s & 0 & -W_s M \\ -W_s L_s & -R_s & M W_s & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_r M & 0 & -L_r W_r \\ -W_r M & 0 & W_r L_r & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \cdot W_r$$

En mettant (II.18) sous forme d'état, on trouve :

$$\frac{d}{dt} [I] == [L]^{-1} \{ [V] - [G2][I] - [C][I] \}$$

II. 8. Simulation de GADA :

En varier la vitesse mécanique \implies varier la vitesse rotorique :

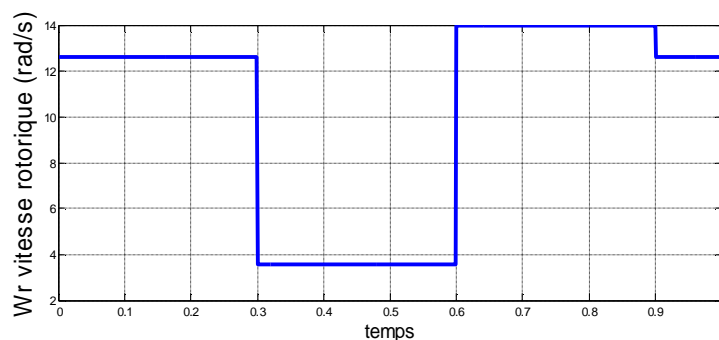


Figure II.22 : Vitesse rotorique W_r variable

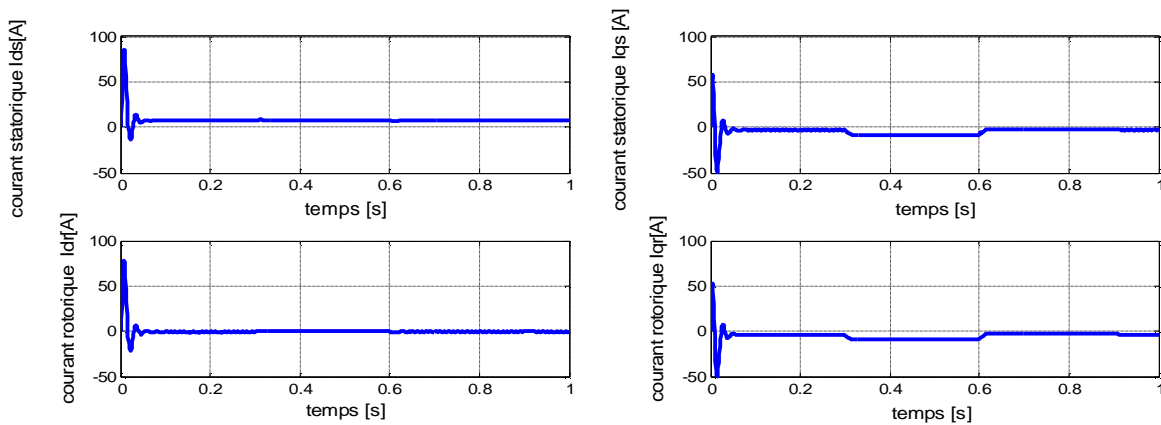


Figure II.24 : Courant rotorique et statorique (d , q)

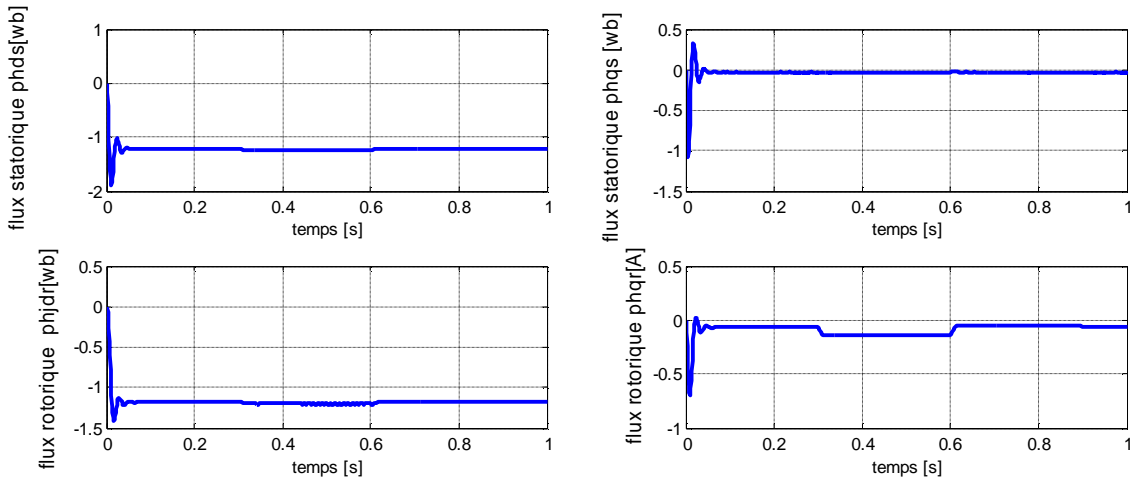


Figure II.25 : Flux statorique et rotorique

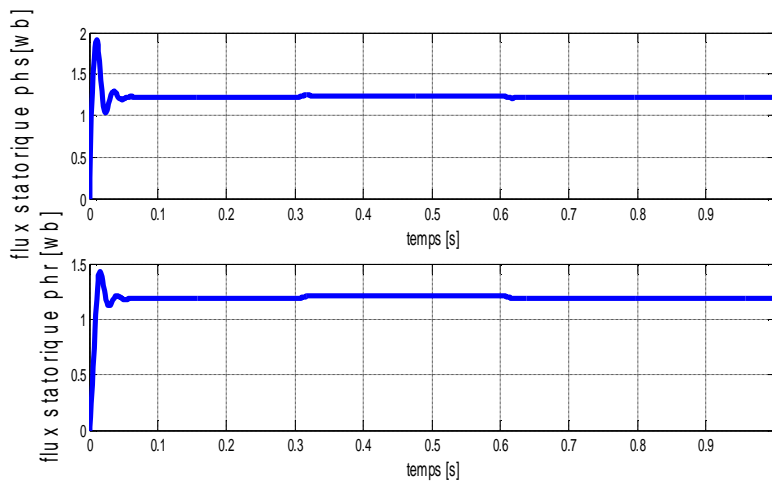


Figure II.26 : Flux statorique a vitesse variable

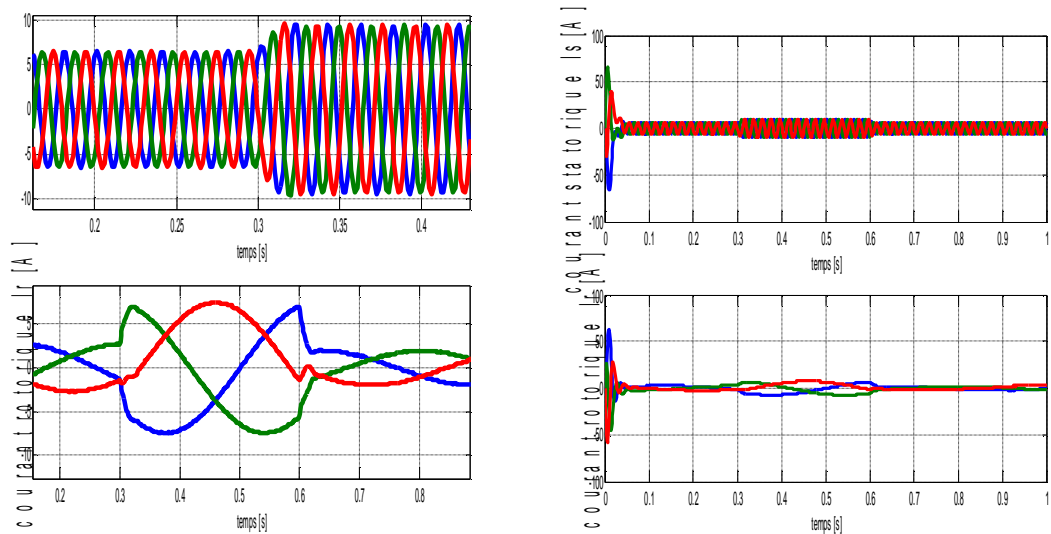


Figure II.27 : Courant Statorique et rotorique en système triphasé (a , b , c)

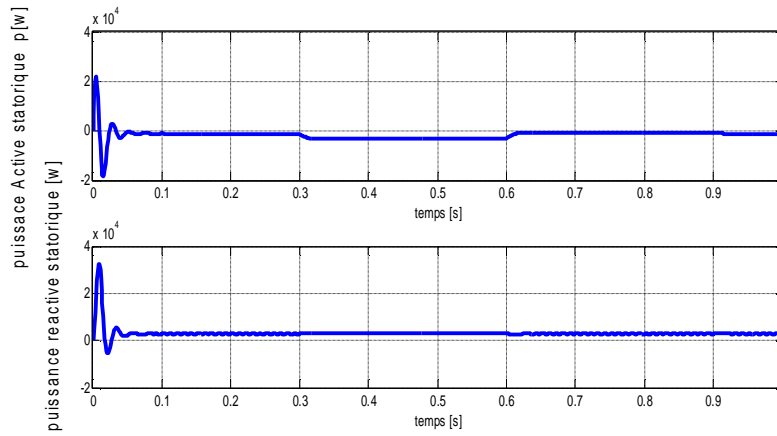


Figure II.28 : Puissance statorique (Ps, Qs)

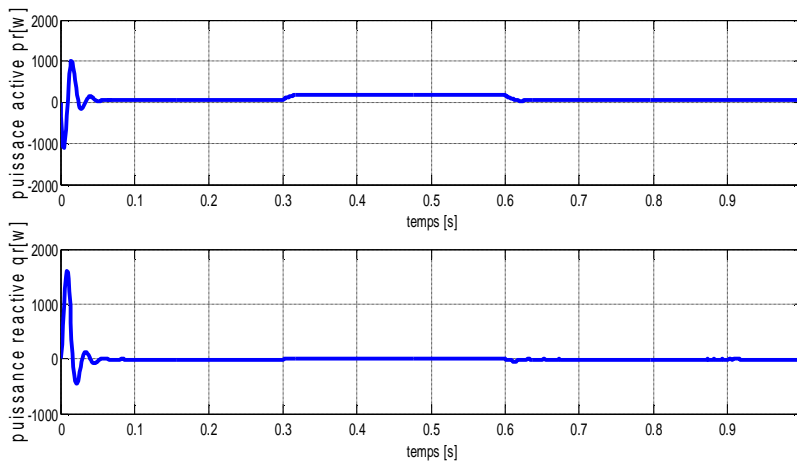


Figure II.29 : Puissance rotorique (Pr ,Qr)

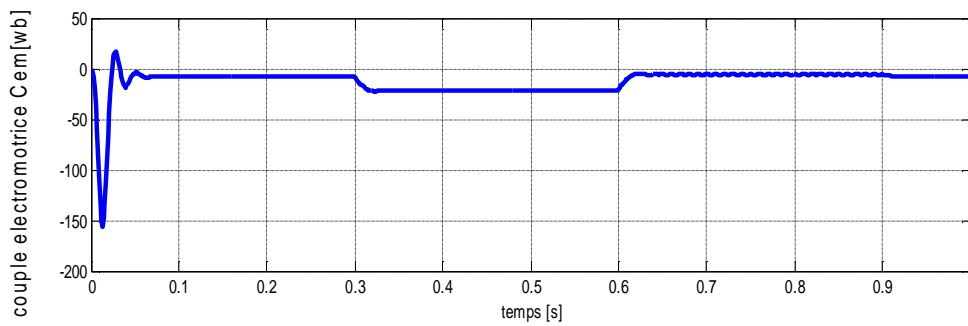


Figure II.30: Couple électromagnétique(N.m)

Ø deux vitesses différentes :

Passage d'un régime hypo synchrone à un régime hyper synchrone :

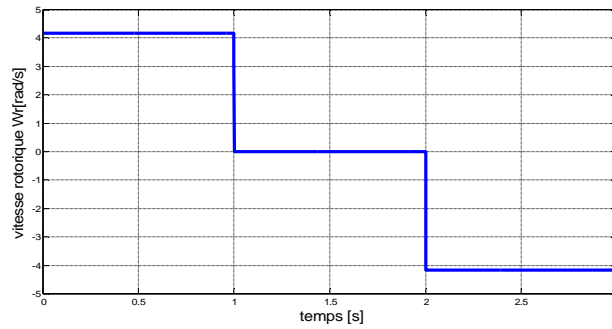


Figure II.31: W_r « vitesse rotorique »

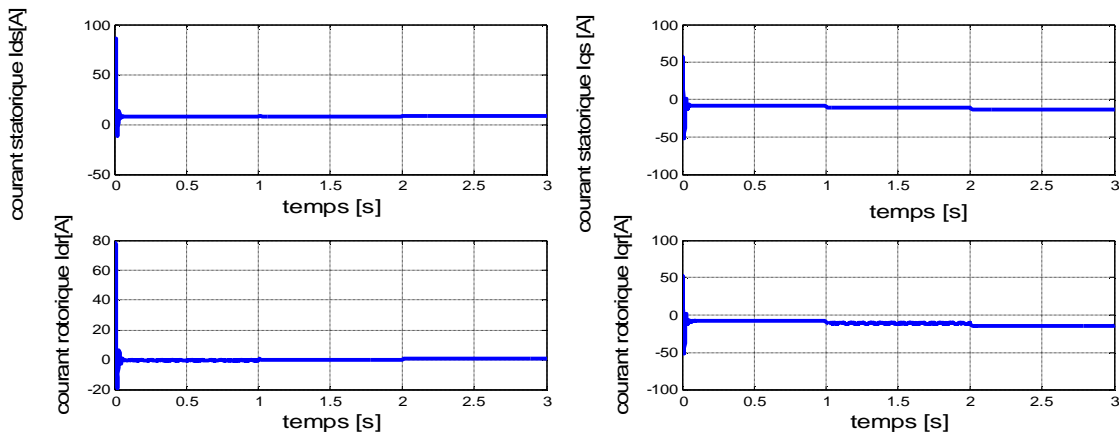


Figure II.32 : Courant statorique et rotorique (d , q)

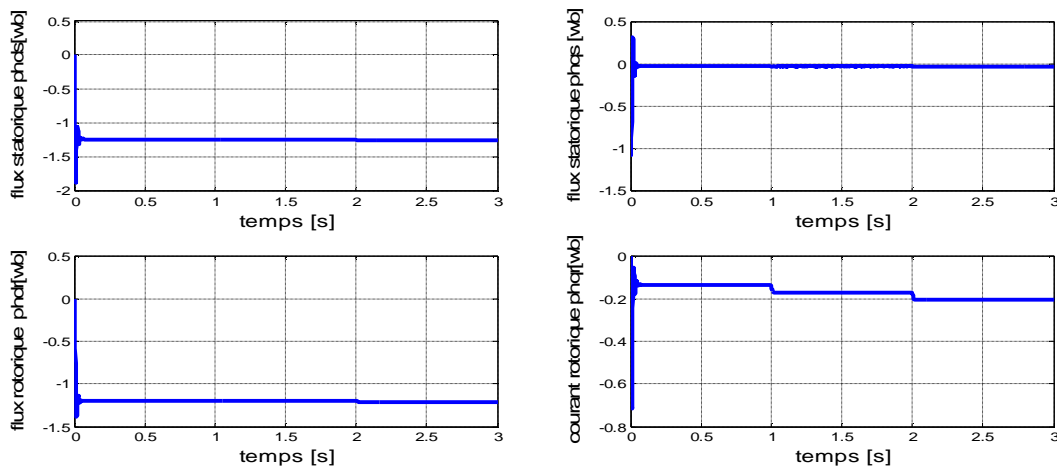


Figure II.33 : Flux statorique et rotorique (d , q)

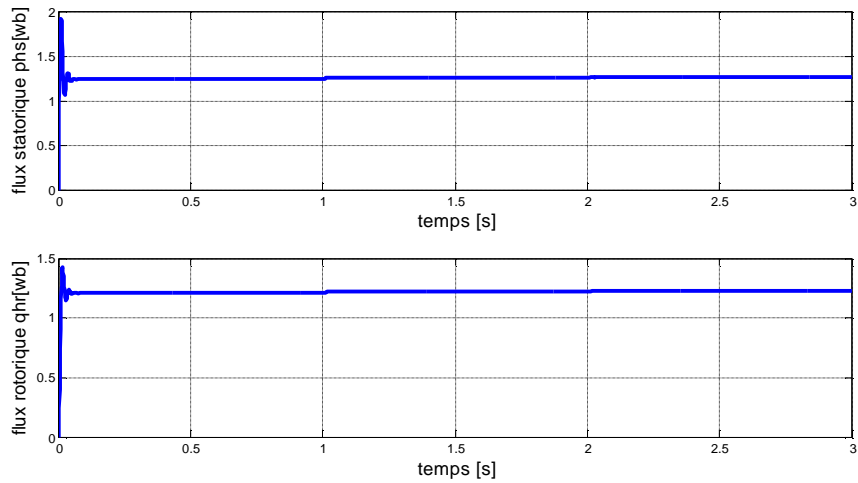


Figure II.34 : Flux statorique et rotorique

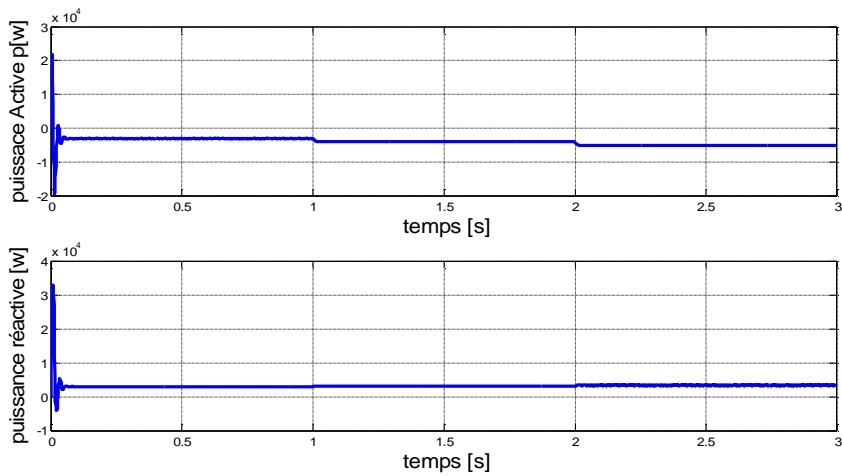
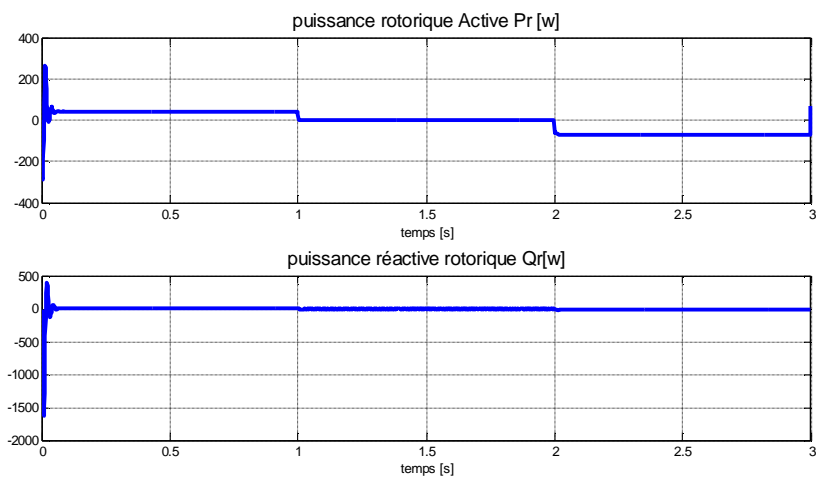


Figure II.35: Puissance statorique



Hypo synchrone

hyper synchrone

Figure II.36: Puissance rotorique

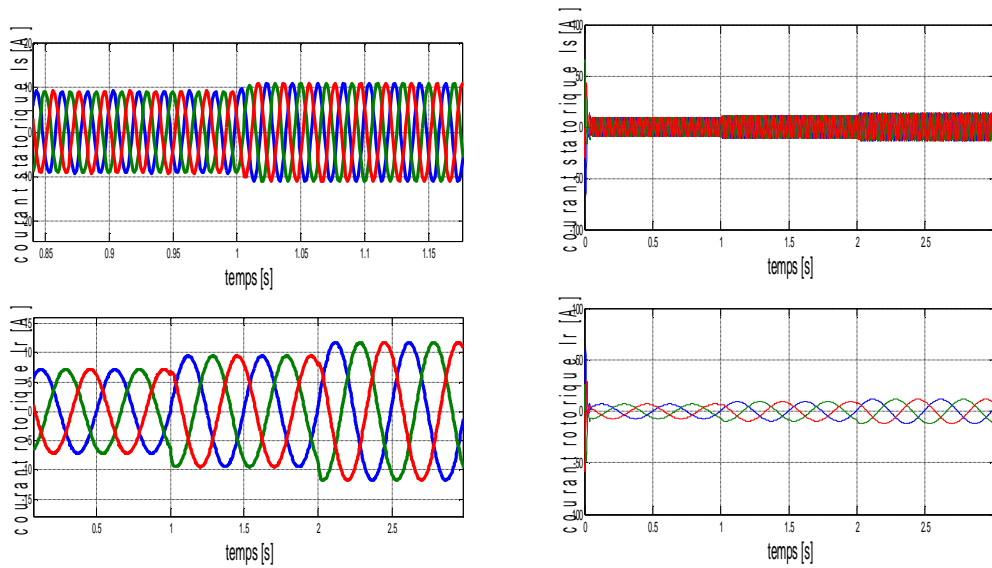


Figure II.37 : Courant statorique et rotorique triphasé (a ,b ,c)

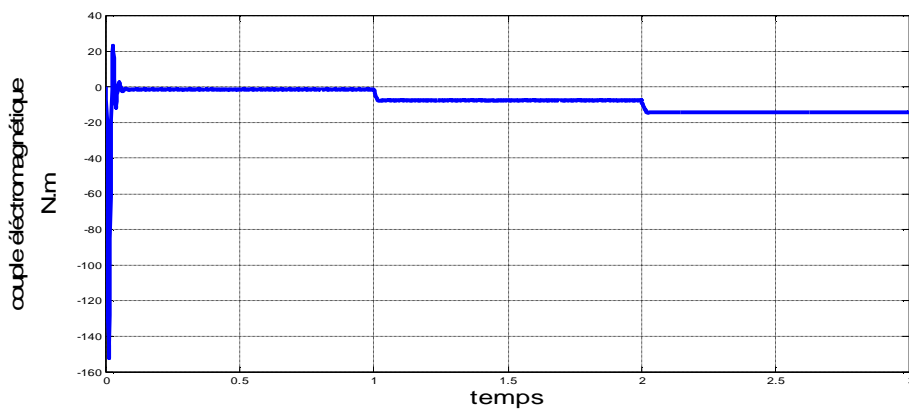


Figure II.38 : Couple électromagnétique

II. 9. Analyse le résultat de simulation :

Les figures précédentes représentent les réponses dynamiques de quelques caractéristiques de la machine asynchrone alimentée au stator par un réseau triphasé équilibré d' une fréquence 50Hz et d'amplitude de $(220 \text{ v} * \sqrt{2}; 100 * \pi \text{ rad/s}; 50 \text{ Hz})$, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de $(12 * \sqrt{2} \text{ v}; 4 * \pi \text{ rad/s}; 2 \text{ Hz})$ et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

On remarque que pendant la période de démarrage le courant de phase statorique atteint un pic important de 80 A pour démarrage de machine asynchrone et présente des oscillations considérables, puis décroît jusqu'à sa valeur en régime permanent.

D'autre part, l'allure du couple électromagnétique présente un pic de -147 N.m pendant le démarrage puis diminue et équilibre le couple des frottements en régime établi.

Pour le fonctionnement : génératrice hypo –synchrone

$$\begin{cases} P_s < 0 \\ P_r > 0 \end{cases}$$

Ou génératrice hyper –synchrone

$$\begin{cases} P_s < 0 \\ P_r < 0 \end{cases}$$

CONCLUSION :

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons que établir un modèle mathématiques De la machine (génératrice) asynchrone A double alimentation la complexité du modèle a été

Réduite par l'application de la transformation de park qui permettait le passage d'un repère triphasé en biphasé , dans le quel les équations de la machine étaient à coefficients variable dans le temps, à un repère Orthogonal dans le quel les équations

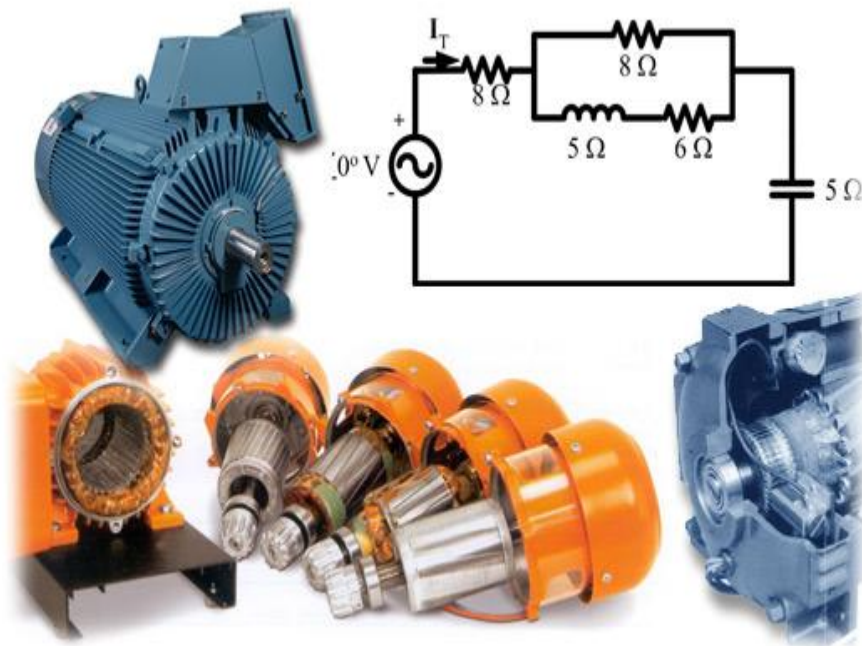
sont de venus à coefficients Constantes dans le temps .le montre une bonne conformité au comportement dynamique de la machine (génératrice GADA)

Bibliographique de chapitre II

- [1] G.SALLOUM, "*Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation*" thèse de doctorat, INP TOULOUSE, 13 Mars 2007.
- [2] F.POITIER, "*Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne*", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [3] I.HAMZAOU, "*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*", mémoire de magister, Ecole National Polytechnique, 20 janvier 2008.
- [4] " SAKI ALI- BELAIDI MOURAD" *Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne* –diplôme d'Ingénieur-juin 2006 .
- [5] Y.A.BENCHERIF "*Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne*", Mémoire d'ingénieur, à L'ENP, 2008.
- [6] M.S. ABDOULAZIZ, I .SOUMANA NOUHOU "*Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*", Mémoire d'ingénieur, à L'ENP, 2007.

CHAPITRE III :

COMMANDE VECTORIELLE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION



CHAPITRE III : Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone à double alimentation

III-INTRODUCTION:

Le concept d'orientation de flux, proposé par Hasse en 1969 et Blaschke en 1972, constitue sans doute le plus important de paradigme dans la théorie et la pratique de contrôle des machines à induction. En effet, l'objectif de l'orientation du flux est de rendre le moteur à induction semblable à un moteur à courant continu à excitation séparée, ce qui permet le contrôle optimal du couple électromagnétique indépendamment du flux.

La technique du contrôle vectoriel repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Pour le cas du contrôle vectoriel de la GADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau.

Dans ce chapitre, nous allons établir les équations qui lient les tensions rotoriques de la GADA, aux puissances active et réactive statoriques en essayant de développer un algorithme de contrôle indépendant des puissances qui va nous aider à contrôler au mieux le système de production d'énergie éolienne.

III.1.PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE :

III.1.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

En choisissant un référentiel diphasé « d-q » lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique φ_{ds} avec l'axe d, l'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent, nous pouvons écrire:

$$\varphi_{ds} = \varphi_s .$$

$$\varphi_{qs} = 0 .$$

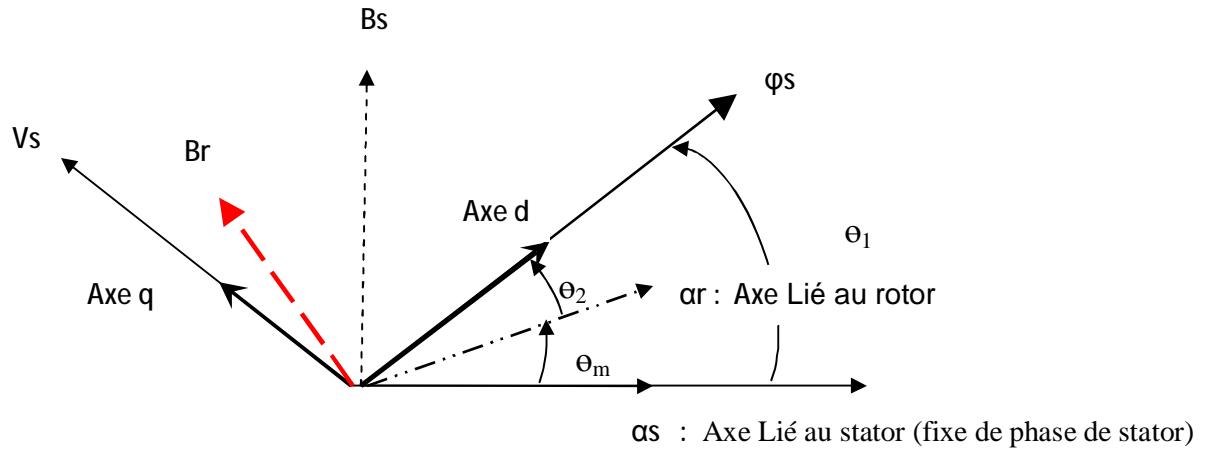


Figure III.1. Vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \Phi_{ds} \quad (III.1)$$

Dans l'hypothèse où le réseau auquel est connectée la GADA est stable, le flux Φ_{ds} devient alors constant. Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendante du courant rotorique d'axe q.

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \Phi_s \end{cases} \quad (III.2)$$

En utilisant les simplifications précédentes, les équations des flux s'exprimeront comme suit :

$$\begin{cases} \Phi_s = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (III.3)$$

Partir de l'équation (III.3), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\Phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (III.4)$$

III.1.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

$$\begin{cases} P = -(V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \\ Q = -(V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq}) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

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

$$\begin{cases} P = -V_{sq} I_{sq} \\ Q = -V_{sq} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions données dans l'équation (III.3), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P = -V_{sq} \left(\frac{M}{L_s} I_{rq} \right) \\ Q = -V_{sq} \left(\frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\varphi_s}{L_s} \right) \end{cases} \quad \text{avec} \quad V_{qs} = V_s = W_s \cdot \varphi_s \quad P \quad \varphi_s = \frac{V_s}{W_s}$$

$$P \begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q = -V_{sq} \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s \cdot V_s}{W_s L_s} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En considérant la mutuelle constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $\frac{V_s \cdot V_s}{W_s L_s}$ prés imposée par le réseau.

III.1.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :

Les flux rotoriques s'expriment en fonction des courants rotoriques, après avoir remplacé les courants statoriques par leurs expressions, de la façon suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \\ \varphi_{rq} = I_{rq} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \right) - \omega_r \left(I_{rq} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} I_{rq} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \omega_r \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + \frac{V_s \cdot M}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Avec} \quad \mathbf{w}_r = \mathbf{g} \mathbf{w}_s \quad \Rightarrow$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rd} - \mathbf{g} \cdot \omega_s \left(I_{rq} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rq} + \mathbf{g} \cdot \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + \mathbf{g} \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - \mathbf{g} \cdot \omega_s \left(I_{rq} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \mathbf{g} \cdot \omega_s \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + \mathbf{g} \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (Figure III.2).

$$\text{En pose : } \varphi_s = \sqrt{\varphi_{sd}^2 + \varphi_{sq}^2} \quad \text{et} \quad \varphi_r = \sqrt{\varphi_{rd}^2 + \varphi_{rq}^2} \quad (\text{III.12})$$

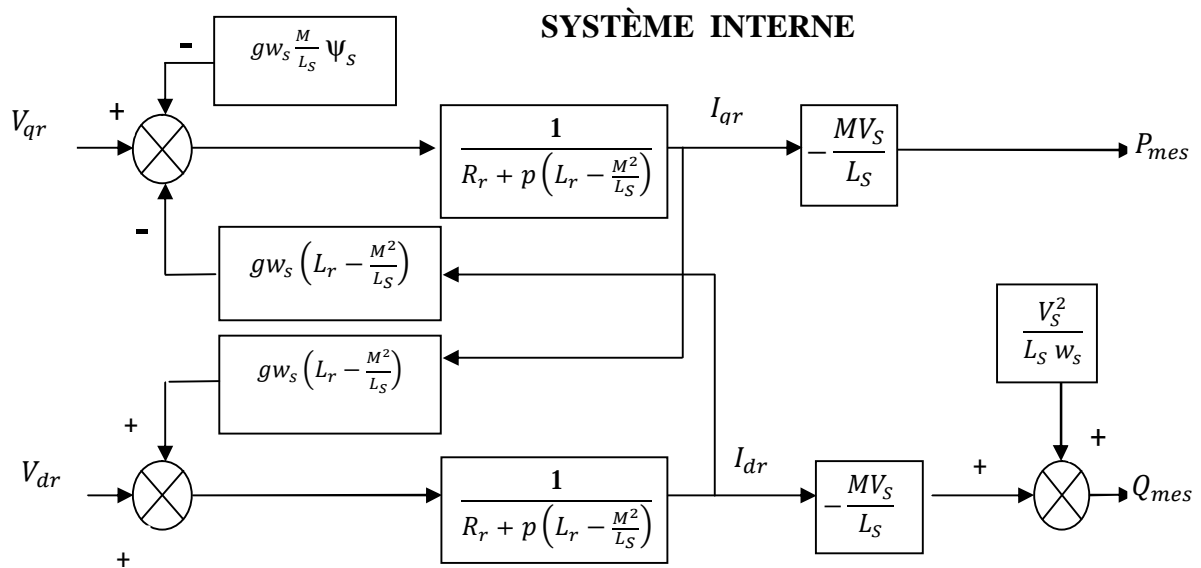


Figure III.2 – Schéma bloc du système à réguler

Si l'on observe le schéma de la figure III.2, on remarque que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $-\frac{V_s M}{L_s}$ le modèle (III.2) est non linéaire à cause des termes de couplages $g \cdot w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$. Les termes de couplage considérés sont souvent considérés comme des perturbations à compenser

Pour obtenir une commande découplée, en éliminant les interactions entre la commande des puissances directe et en quadrature. Pour réaliser la commande bouclée, des régulateurs classiques de type PI sont utilisés. Ce Type de régulateur assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle. Une structure par boucles imbriquées sera utilisée pour pouvoir contrôler séparément les puissances Q_s, P_s . A cet Effet, deux modes de contrôle différentes sont proposées:

III.1.4. Commande directe :

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idée sur la régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la GADA, dans lequel on négligera les termes de couplages. Le schéma de la figure (III.3) présente le principe de la commande dite directe

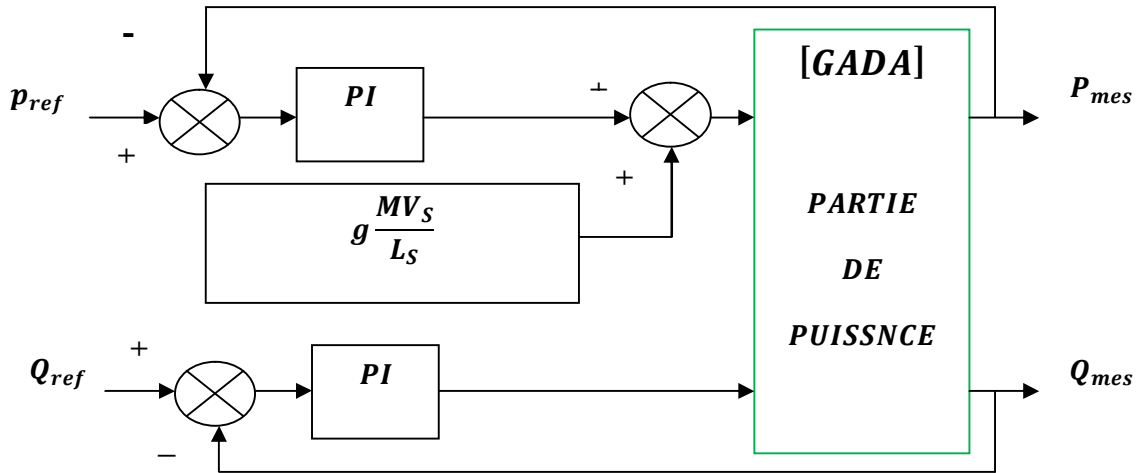


Figure III.3 – Schémas commande vectorielle direct.

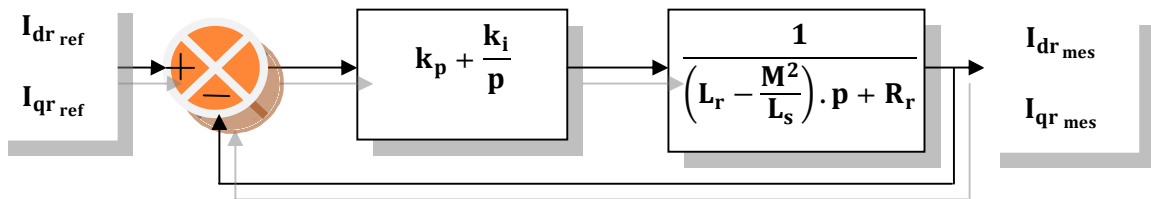
III.1.5. Type des régulateurs utilisez :

Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de la Commande en puissance active et réactive de la GADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la GADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux système de régulation industrielle [4].

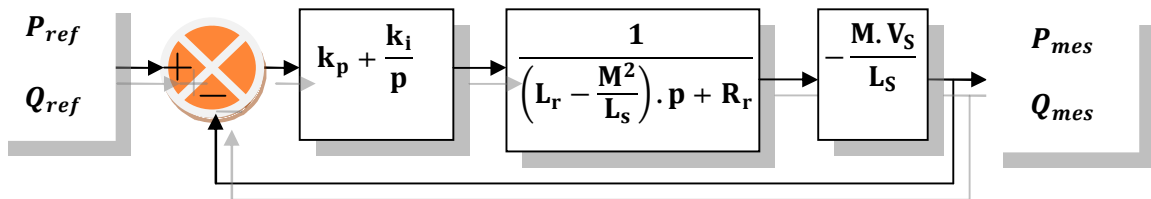
La fonction de transfert du régulateur (PI) est de la forme : $K_p + \frac{K_i}{p}$

Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité (Figure (III.3)).

III.1. 5.1. Système régulé par un régulateur PI :



a) Schéma de la régulation des courants rotoriques



b) Schéma de la régulation des puissances statoriques

Figure III.4 : Schéma de la régulation

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors [4]:

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p} \cdot \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{\frac{P}{K_p} \cdot \left(P + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \right)}$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse des régulateurs.

Les zéros de la fonction de transfert seront compensés .Ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III. 13})$$

Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{\frac{V_s M}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{P} \quad (\text{III. 14})$$

En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r} \text{ avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{V_s M}$$

Le temps de réponse τ_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables.

Ainsi, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine

Comme suit :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{V_s M} ; \quad K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{V_s M} \tag{III.15}$$

Il est clair que la méthode de la compensation des pôles n'est pas la seule alternative Permettant la synthèse des régulateurs PI. Toutefois cette méthode procure l'avantage d'être Rapide à mettre en œuvre sur une fonction de premier ordre [4]

III.1.6. Résultat de simulation :

III. 1 . 6 . a) Commende Vectorielle direct

a. 1) avec boucle interne :

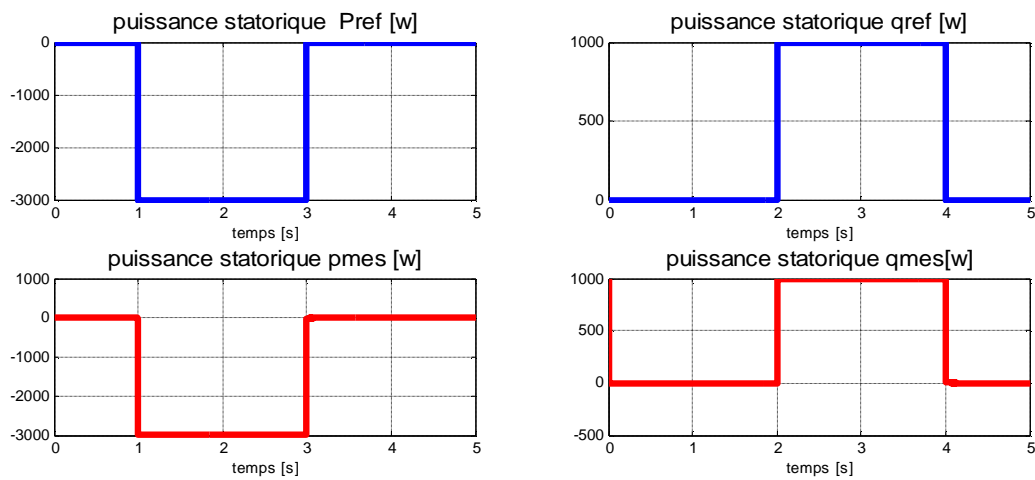


Figure III.5. Puissances mesurées et de référence (Pactive ; Q réactive)

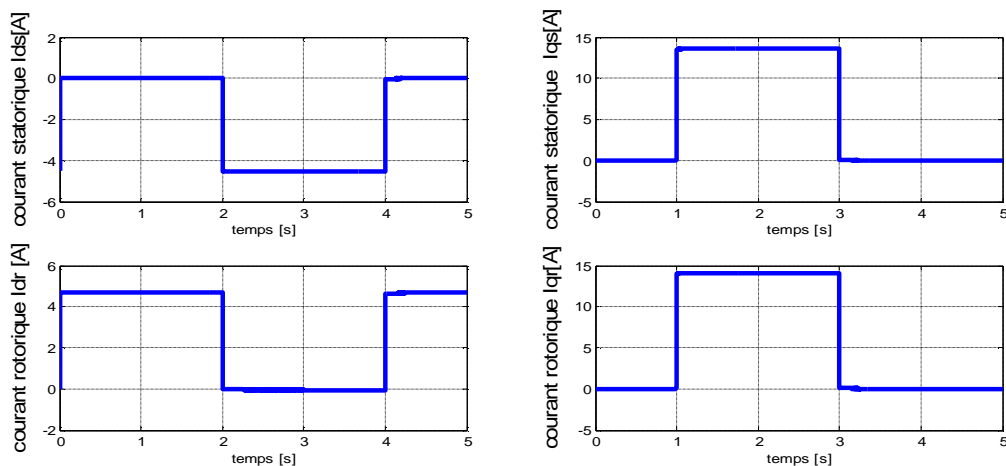


Figure III.6. Courant statorique et rotorique (d ; q)

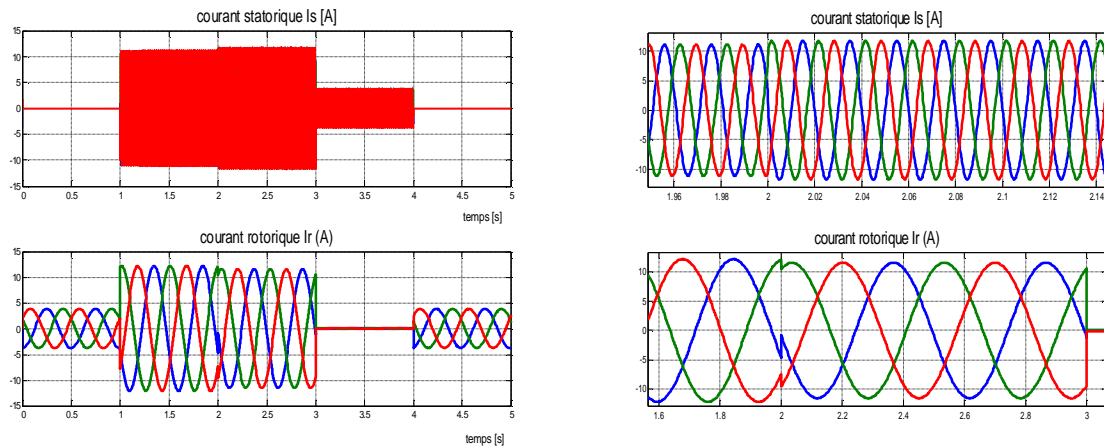


Figure III.7. Courants statorique et rotorique triphasés (a , b , c)

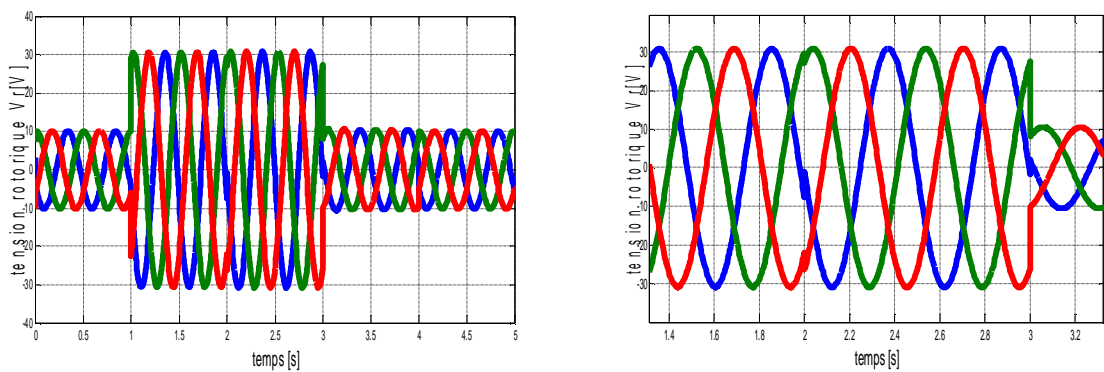


Figure III.8. Tension rotorique tréphasés (a , b , c)

a. 2) avec génératrice (GADA) :

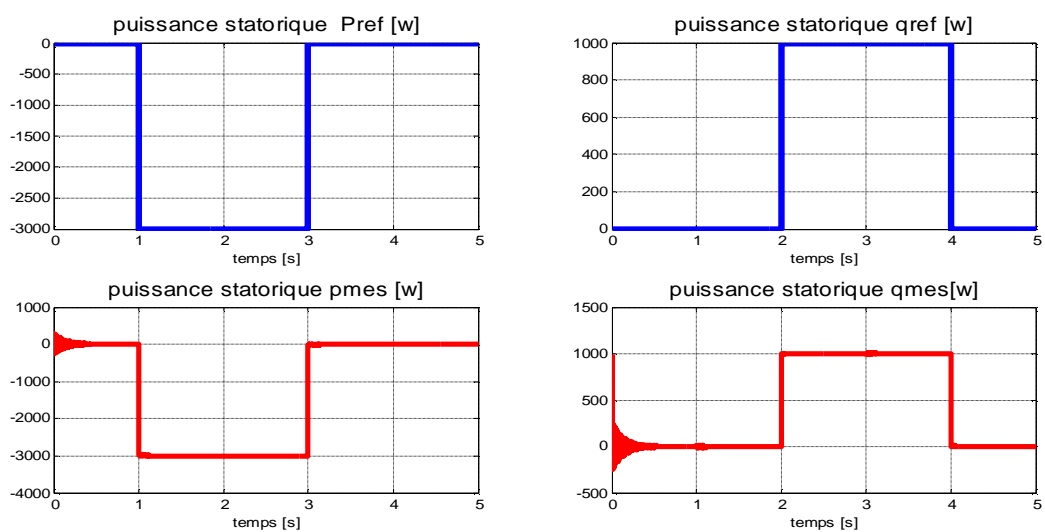


Figure III.9. Puissances mesurées et de référence (P active , Q réactive)

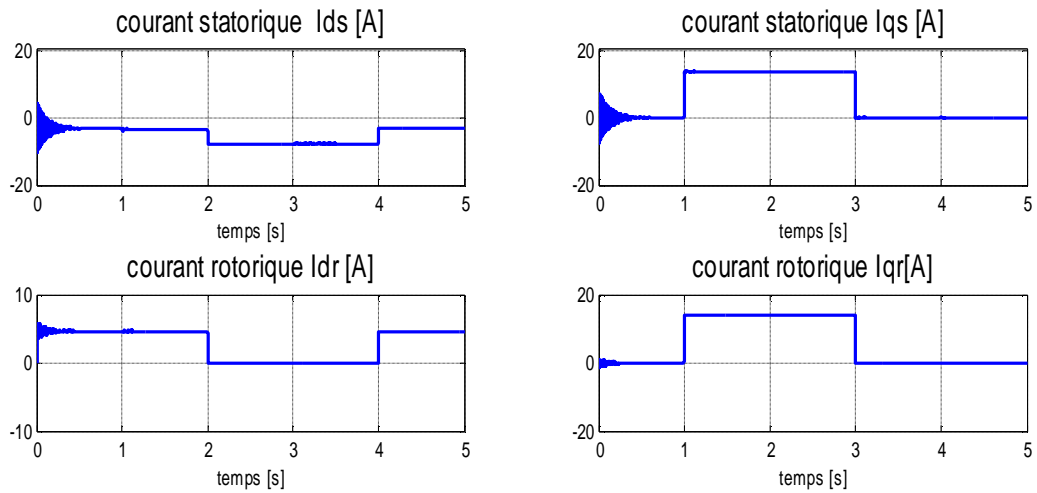


Figure III.10. Courants statorique et rotorique (d , q)

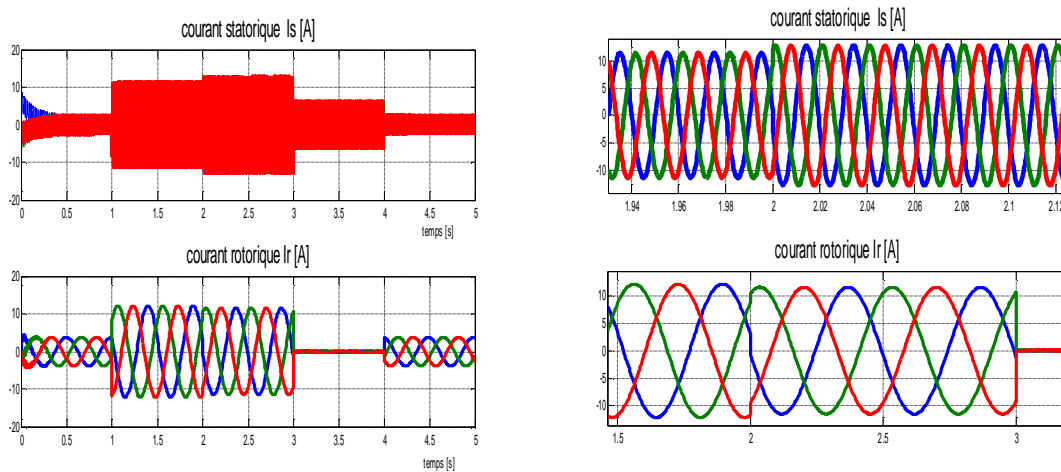


Figure III.11. Courant statorique et rotorique triphasés (a , b , c)

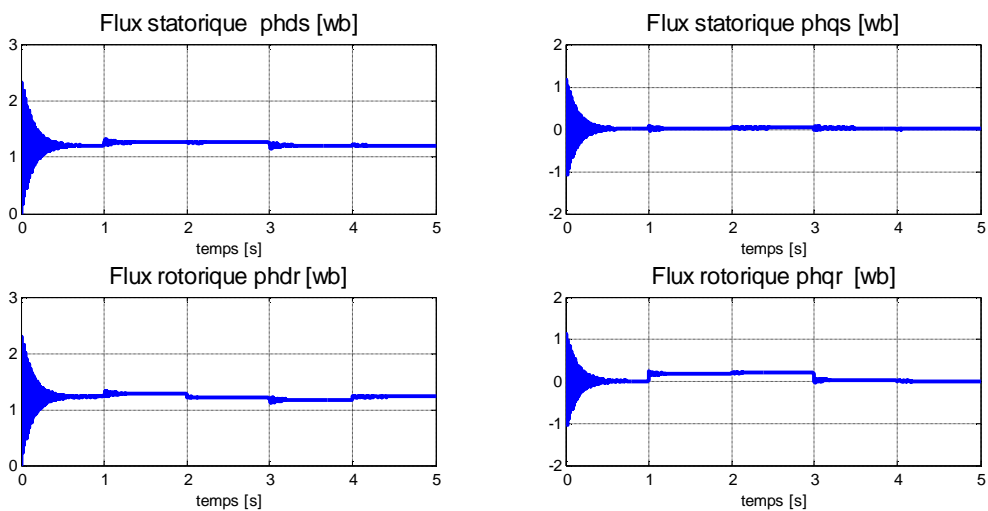


Figure III.12. Flux statorique et rotorique en forme (d , q)

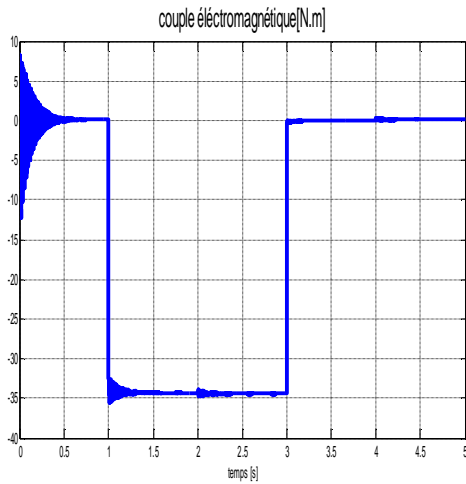


figure III.13:Couple électromagnétique

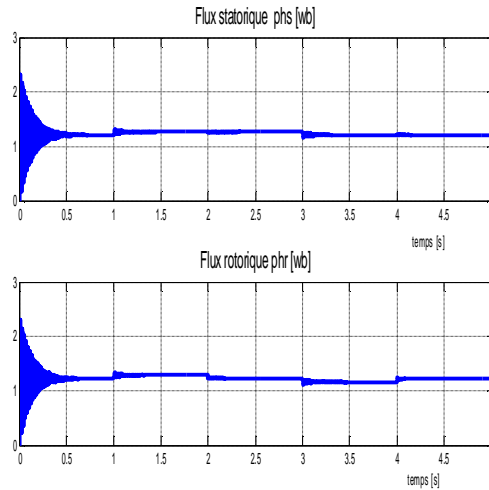


Figure III.14:flux statorique et rotorique

III. 1 . 6 . B) La Commande indirecte :

Afin d'améliorer la commande précédente, on introduit un algorithme de commande indirecte des puissances active et réactive de la GADA en fonction des courants rotoriques, d'où les termes de couplage $g \omega_s L_r \sigma I_{qr}$ et $g \omega_s L_r \sigma I_{dr}$ considérés comme étant des perturbations non négligeables et seront compensés. La commande, ainsi découplée, est réalisée au moyen de régulateurs PI. Il existe deux méthodes pour contrôler les puissances statorique, en boucle ouverte (sans boucle de puissance) et en boucle fermée (avec boucle de puissance).

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_r * L_s} \right)$$

B_1) commande vectorielle indirect sans boucle de puissance :

B.1.1) avec boucle interne :

Cette commande consiste à réguler les courants par une boucle dans chaque axe. Les consignes de régulation sont déduites à partir des valeurs de références de puissance (figure (III.15)) .

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe.

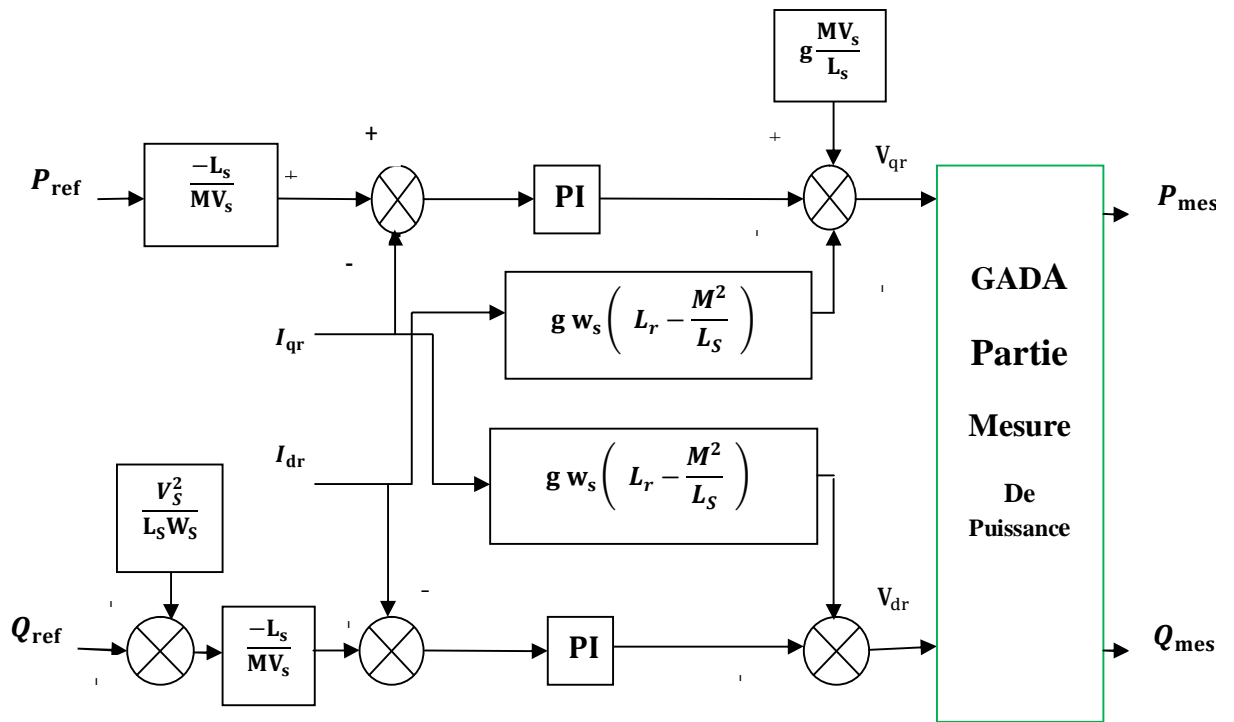


Figure III.15 – Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance

Simulation :

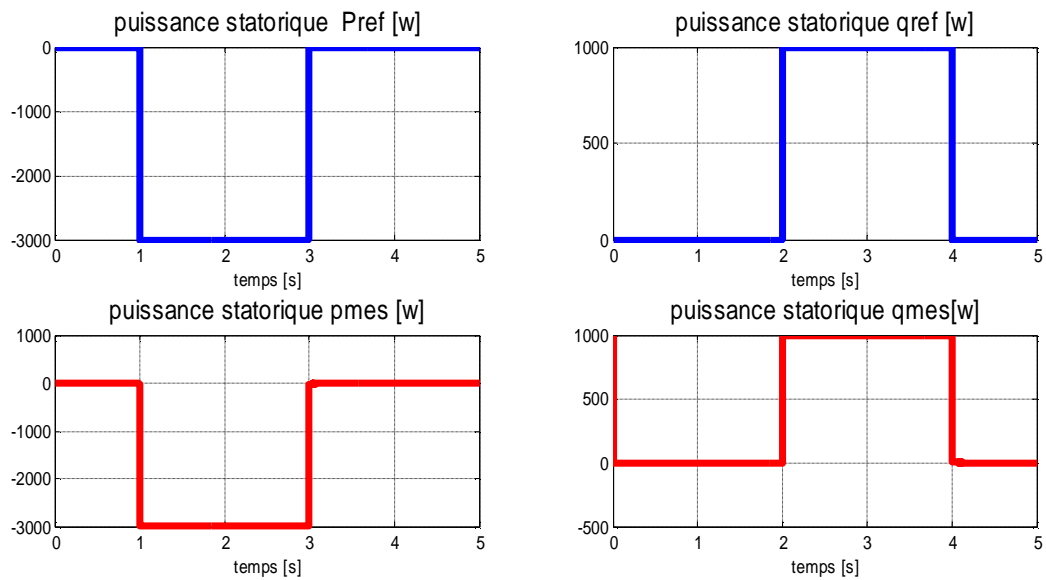


Figure III.16. Puissances mesure et référence (active P et réactive Q)

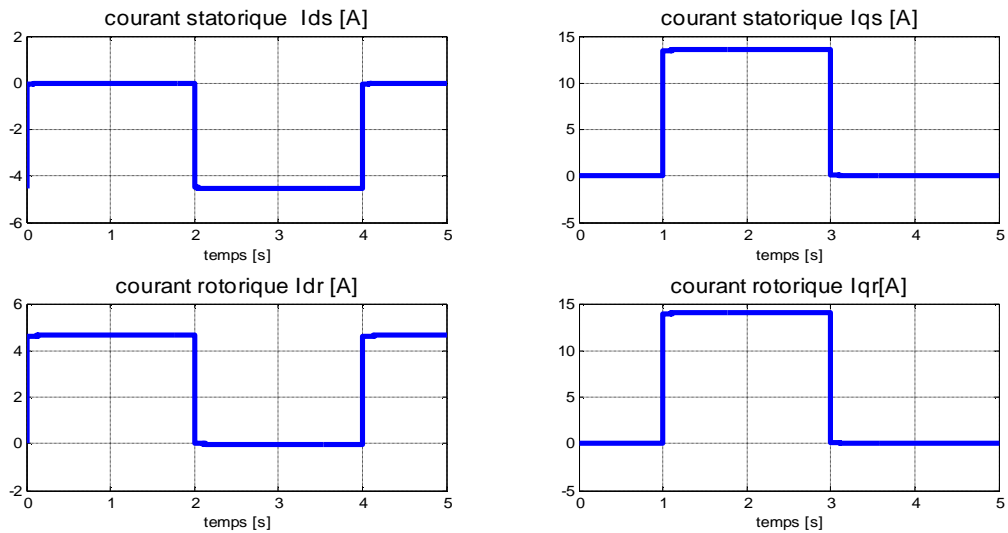


Figure III.17. Courants statorique et rotorique (d et q)

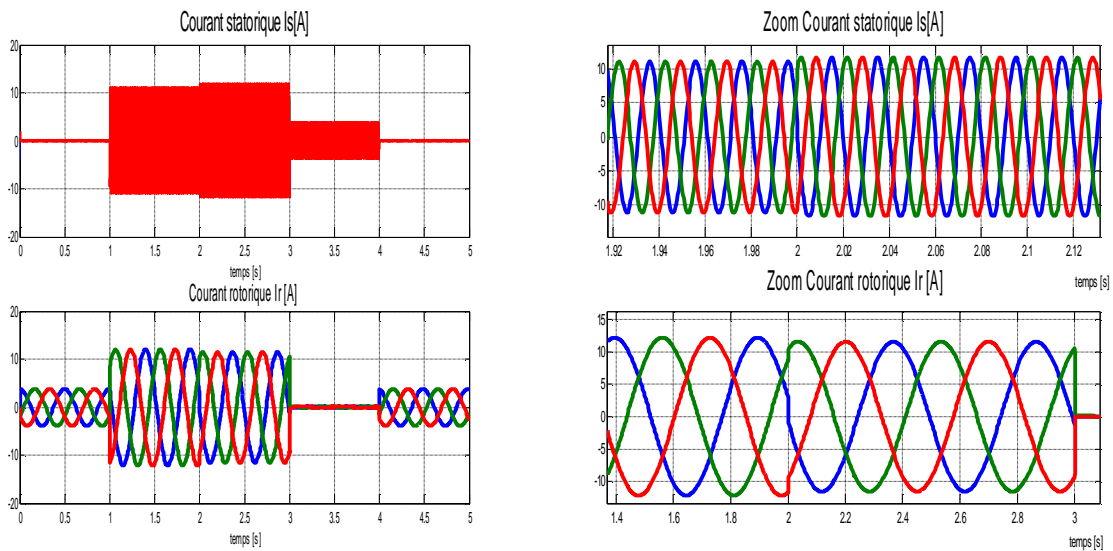


Figure III.18. Courants statorique et rotorique triphasé

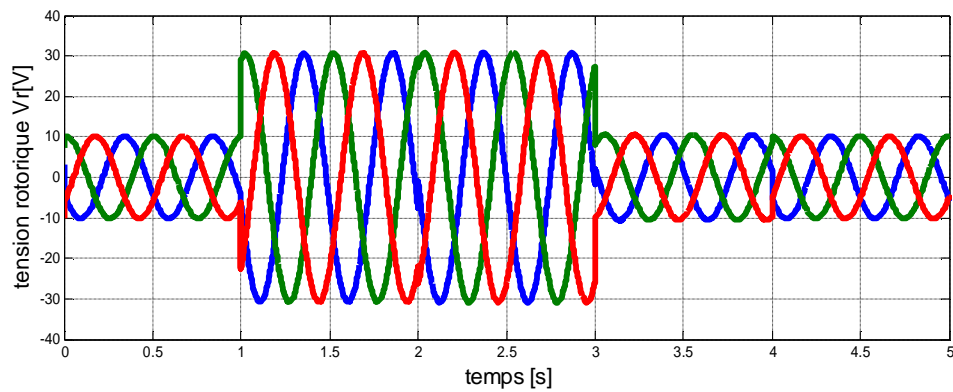


Figure III.19. tension rotorique

B.1.2) avec Machine (GADA) :

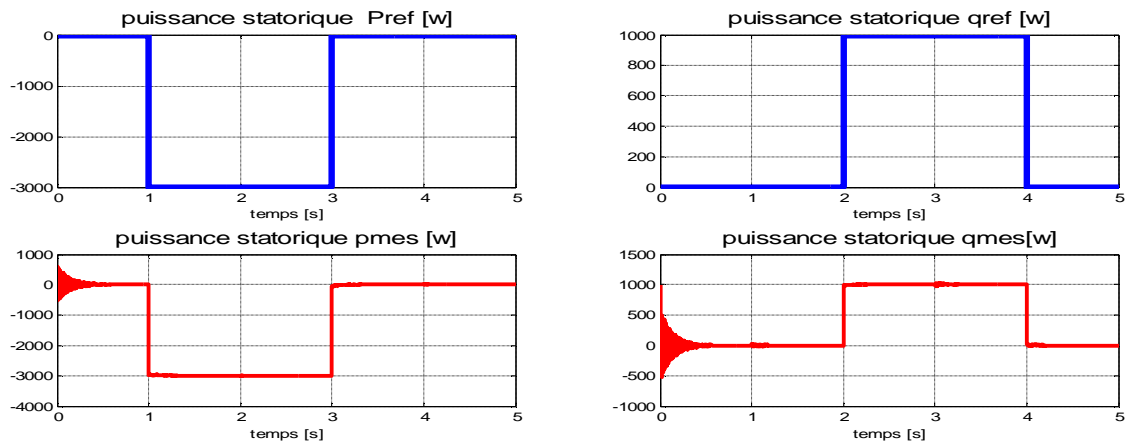


Figure III.20. Puissances active et réactive (mesurées et de référence)

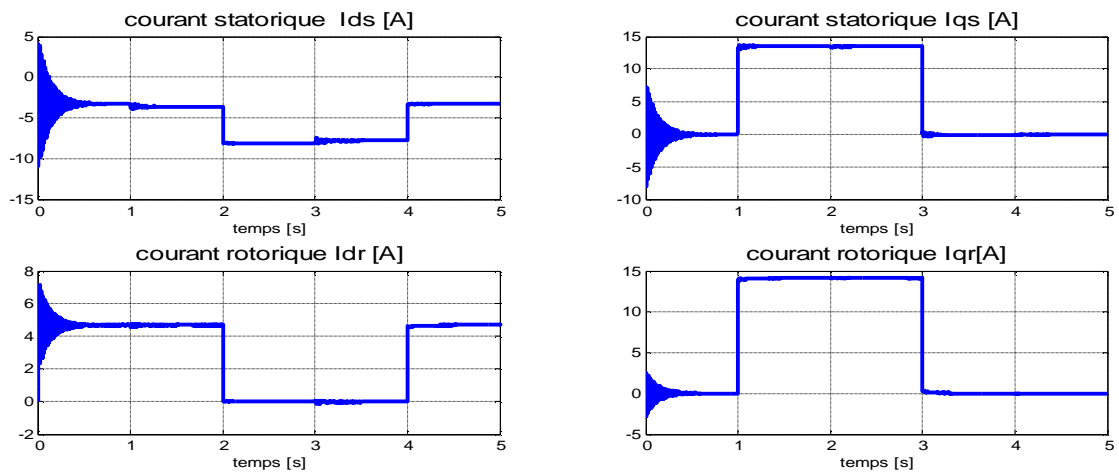


Figure III.21. Courants statorique et rotorique (d , q)

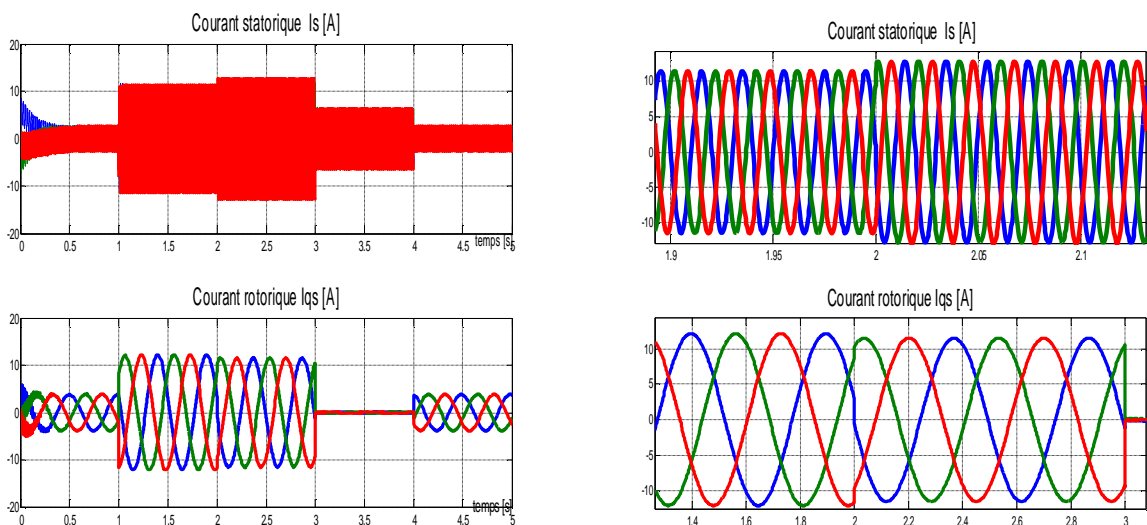


Figure III.22. Courant statorique et rotorique triphasés (a , b , c)

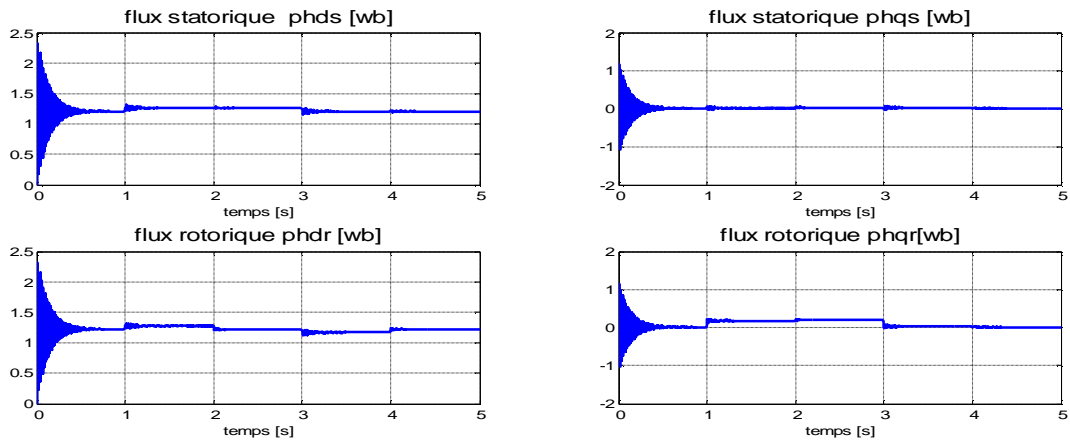


Figure III.23. Flux statorique et rotorique en forme (d , q)

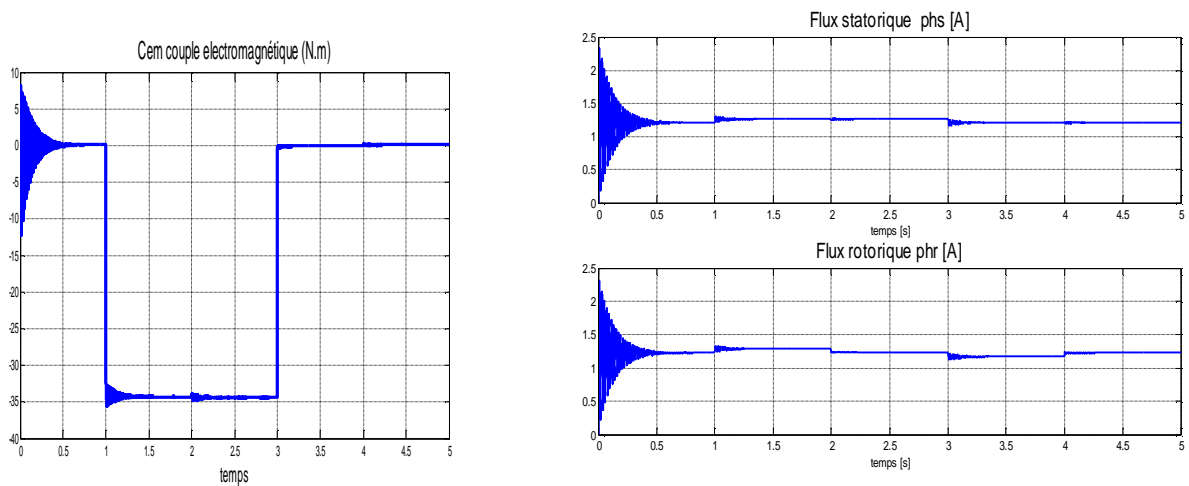


Figure III.24 :Couple électromagnétique

Figure III.25 : Flux statorique et rotorique

B-2) Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance :

Pour améliorer la commande indirecte sans boucle de puissance, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons un schéma bloc présenté à la figure (III.26) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

La même chose pour le calcul des régulateurs que la commande directe

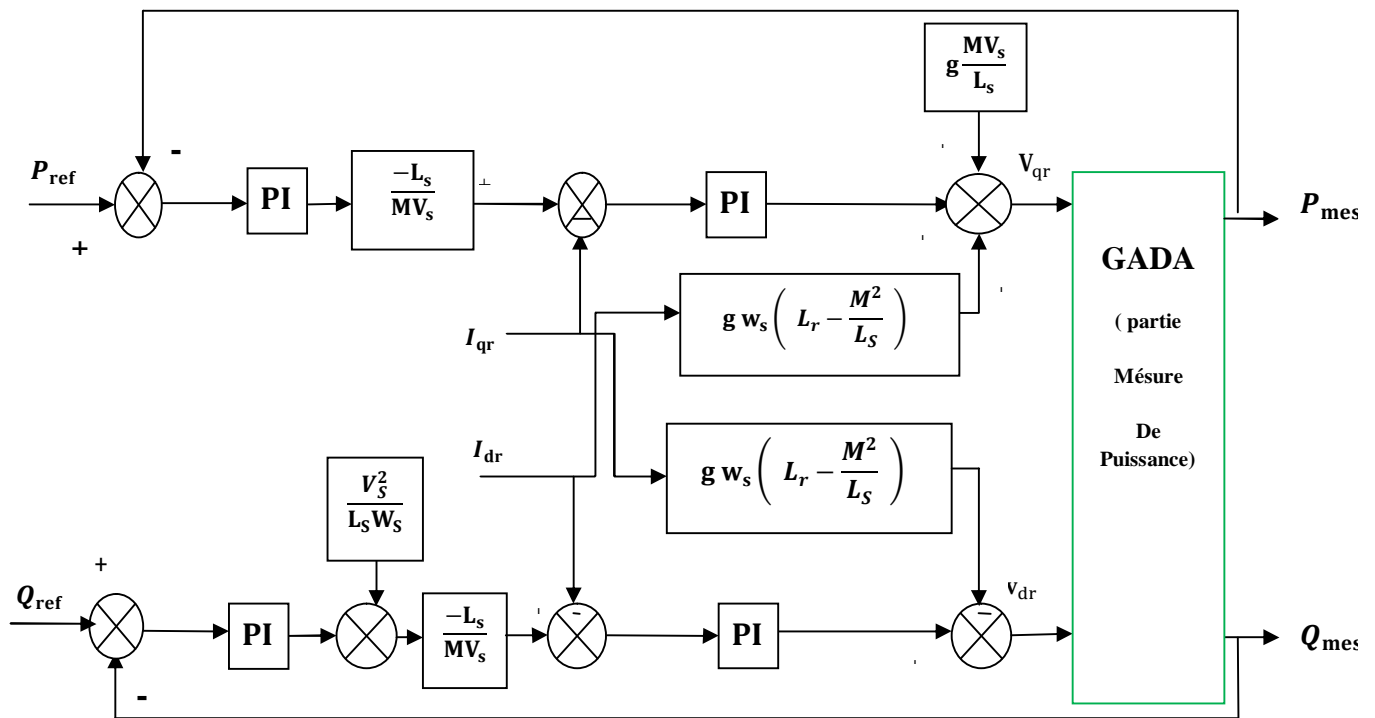


Figure III.26 – Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

B-2.1) avec boucle interne :

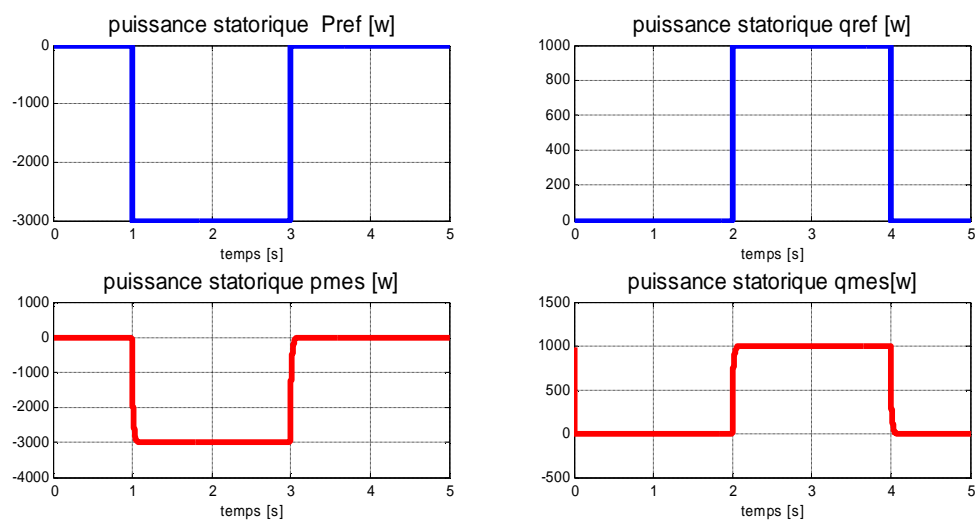


Figure III.27 : Puissance statorique (P et Q)

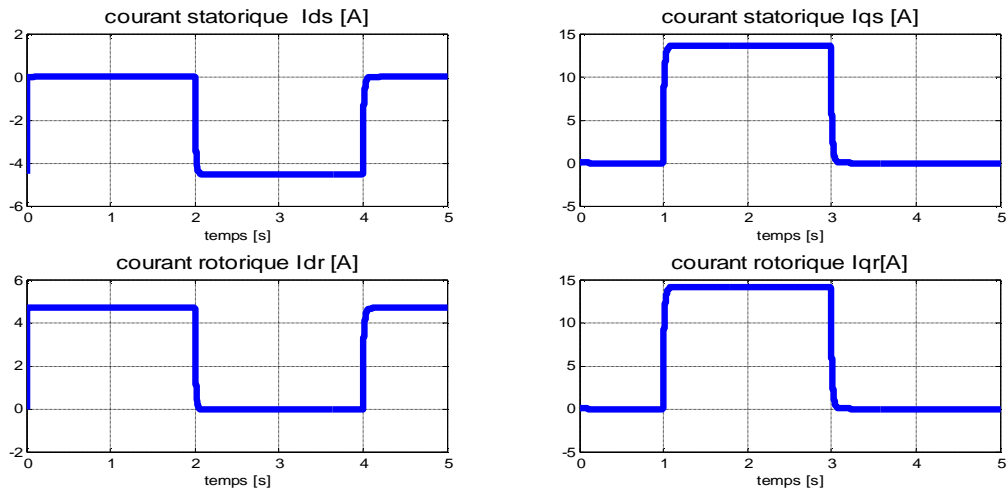


Figure III.28 : Courant statorique et rotorique forme (d et q)

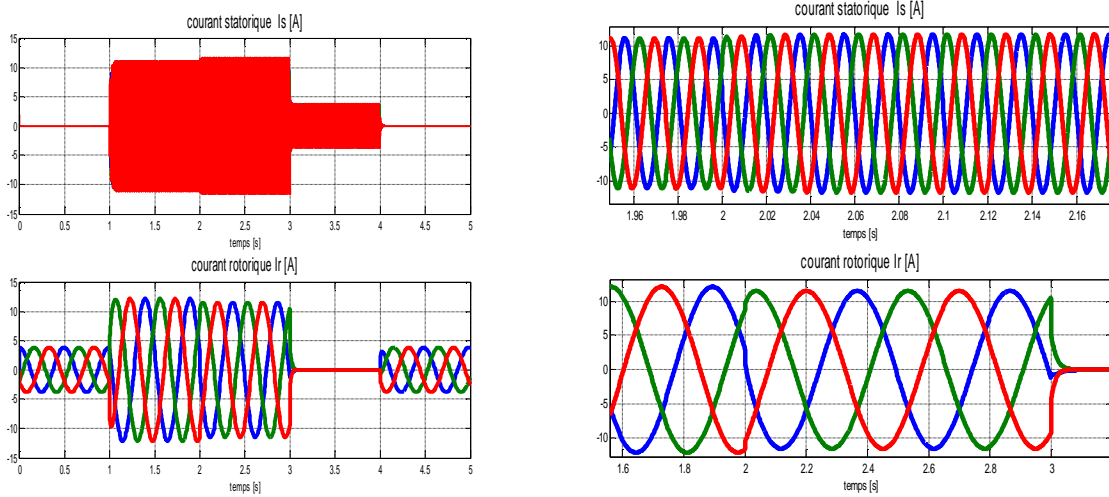


Figure III.29 : Courants statorique et rotorique triphasé

B.2.2) Avec machine (génératrice) :

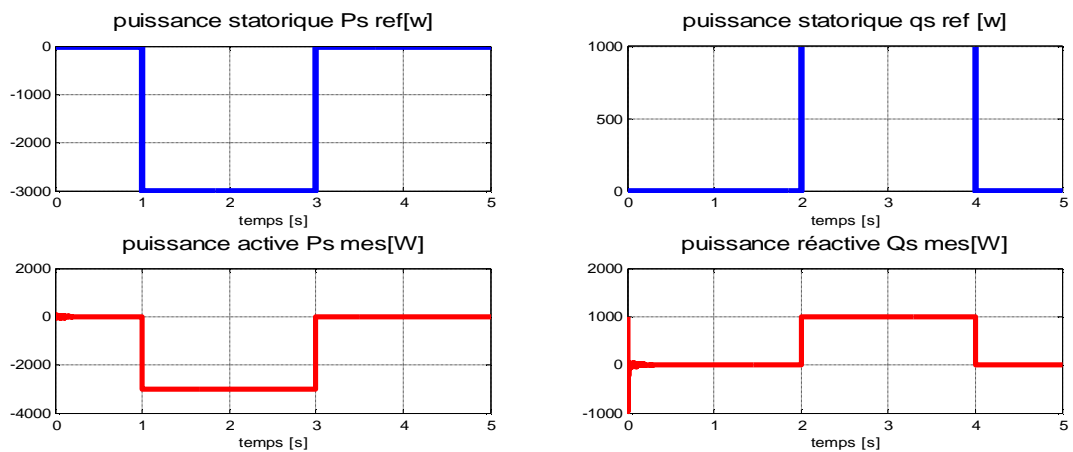


Figure III.30 : Puissances statoriques active et réactive

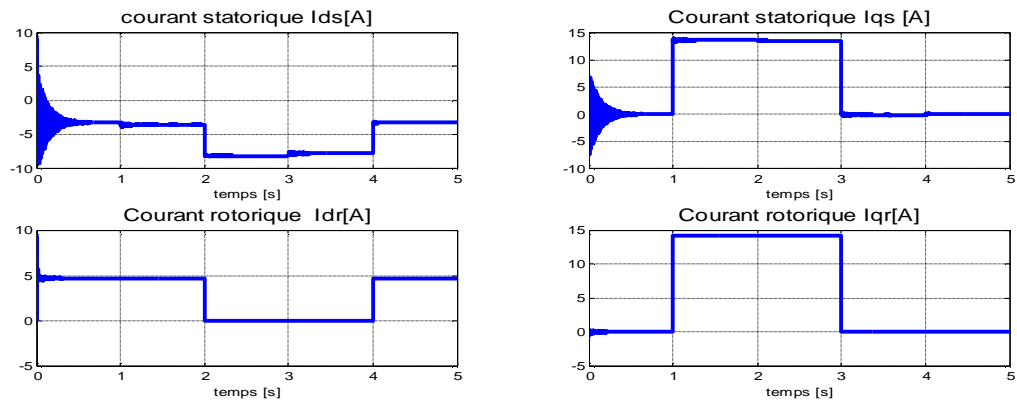


Figure III.31 : Courants statorique et rotorique (d et q)

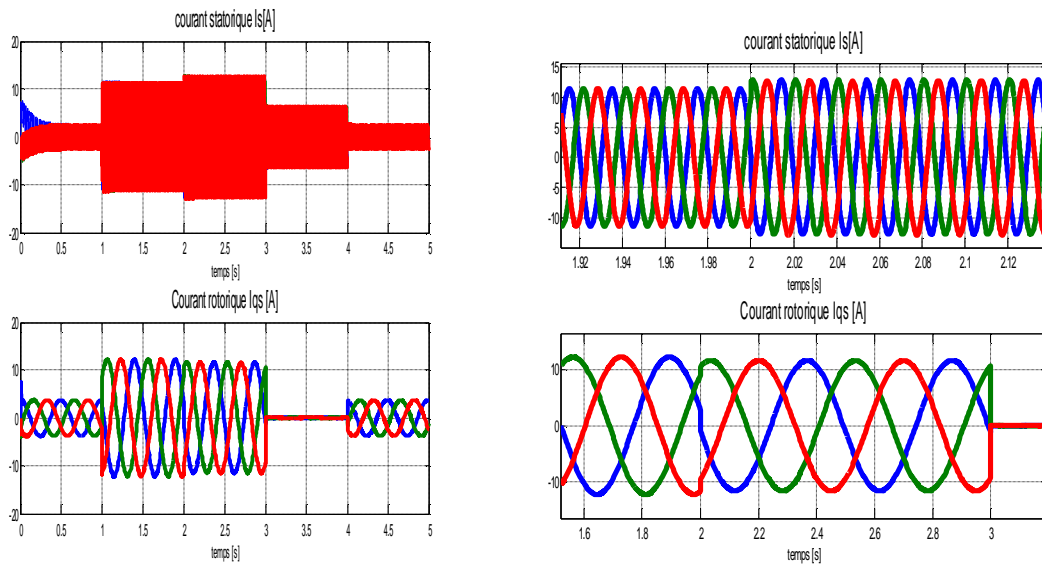


Figure III.32 : Courant statorique et rotorique triphasé

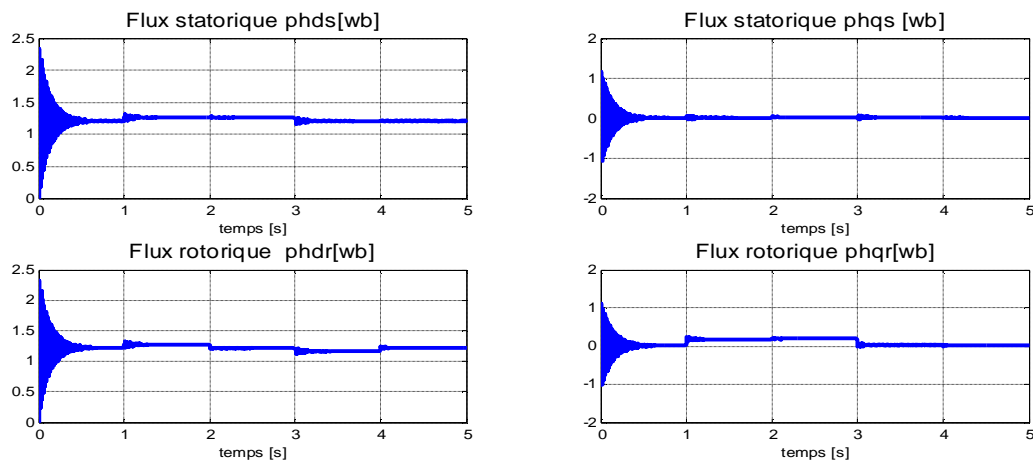


Figure III.33 : Flux statorique et rotorique (d et q)

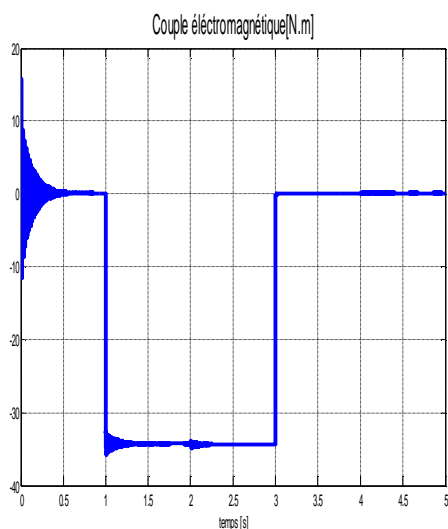


Figure III.34 : Couple électromagnétique

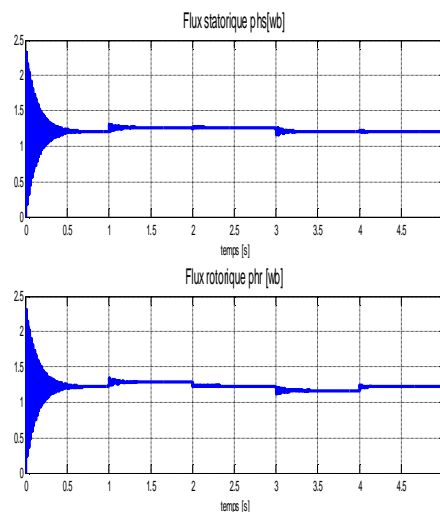


Figure III.35: Flux statorique et rotorique

Les résultats de simulation ci-dessus montrent l'efficacité de la commande en puissances de la GADA pour les trois méthodes étudiées. En effet, les échelons de puissance active sont bien suivis par la génératrice surtout la commande indirecte en boucle fermée (sans dépassement ou perturbation) (Figure III.30), et la puissance active et réactive suivant la référence (Figure III.27).

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, particulièrement la puissance active et réactive (Figure III.20) dues à l'absence d'une boucle de régulation sur les puissances pour cette méthode, ces oscillations et ces fluctuations de puissances sont bien compensées pour les méthodes en boucle fermée (directe et indirecte en boucle fermée) (Figure III.5_III.27). Pour les deux courants statorique et rotorique, on remarque un courant statorique nul pour une puissance statorique nulle avec bloque interne (Figure III.5_III.16_III.27), mais avec GADA le courant statorique diminue non nulle et leur variation est adapté avec les échelons de la puissance active, les réponses de courant sont plus doux dans la commande indirecte surtout le courant rotorique (Figure III.32), et ça le rôle de boucle de régulation de courant rotorique.

CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'établir la synthèse de la commande Vectorielle en puissance active et réactive statoriques de la génératrice asynchrone à double alimentation. Trois modes de contrôles ont été détaillés en utilisant un régulateur

Proportionnel Intégral. (Avec bloque interne et avec génératrice) La commande directe, basé sur l'hypothèse d'un découplage parfait entres les deux axes direct et en quadrature, et la commande indirecte, avec et sans boucle de puissance, qui tiens compte du couplage entre les axes et utilise des termes de compensation pour le corriger.

Bien que la commande directe nous ait donné des résultats satisfaisants avec une simplicité de mise en œuvre, la commande indirecte en boucle fermée sur la puissance, certes plus complexe, nous permettait d'obtenir un système plus performant et plus robuste.

La présence d'une boucle de courant dans la commande indirecte lui offre un avantage, par rapport à la commande directe, permettant la limitation des courants rotorique pour protéger la machine et aussi la possibilité de superposer des références de courants harmoniques pour une éventuelle application de la MADA

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

CHAPITRE IV :
CASCADE
CONVERTISSEUR AC/AC-
GADA -TURBINE ».

CHAPITRE IV: CASCADE CONVERTISSEUR AC/AC- GADA-TURBINE

INTRODUCTION

Dans cette partie, nous introduisons les principes de modélisation et de conception de Convertisseur en considérant un convertisseur triphasé à deux niveaux. Ce Convertisseur est utilisé pour alimenter GADA de manière autonome une charge à Travers un Filtre du second ordre (RC).

Dans ce chapitre On peut convertir directement la fréquence du réseau industriel en une Fréquence variable plus faible à l'aide d'un convertisseur de fréquence figure « IV.1 ». Ce dernier est composé d'un redresseur, un bus continu, et un onduleur.

IV.1.Modélisation de l'alimentation :

L'alimentation de la machine au niveau rotorique est assurée par un ensemble redresseur, filtre RC, et un onduleur MLI, comme il est représenté dans la figure suivante .

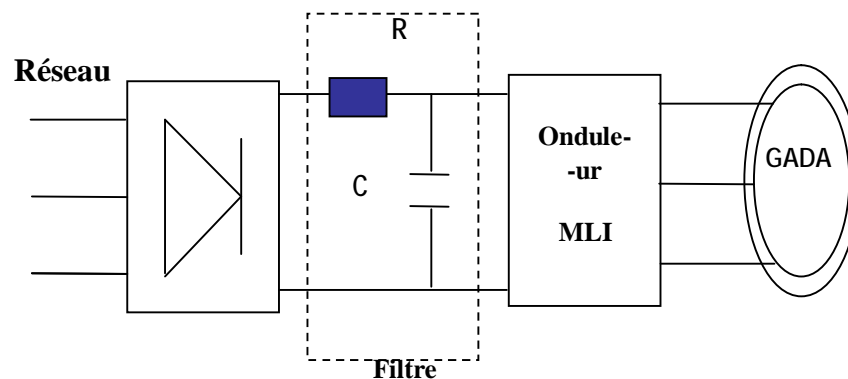


Figure IV.1 : L'ensemble convertisseur- machine.

IV.2. Modélisation partie de puissance :

En générale la machine asynchrone à double alimentation a deux coté, statorique et rotorique, au niveau du stator la machine est alimentée directement par un réseau triphasé, mais au niveau du rotor on a une cascade de deux convertisseurs « onduleur et redresseur », la sortie de cette cascade est relié avec le même réseau triphasé (figure (IV.1)).

Dans ce travail on s'intéresse juste au convertisseur coté machine et leur commande, et de supposer que l'autre convertisseur existant et il nous donne une tension continue constante. (redresseur + onduleur) .

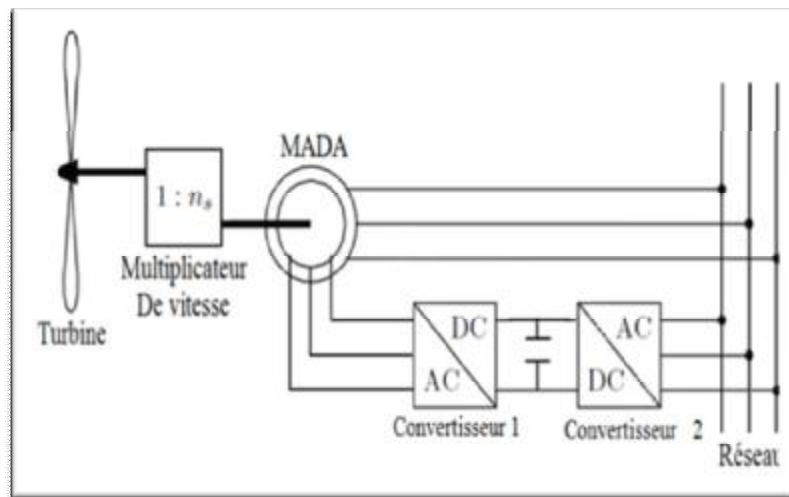


Figure IV.2 : Schémas générale de l'association de GADA avec convertisseur AC/AC

IV.2. 1 Modélisation du redresseur :

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la Conversion alternative-continu.

On utilise un redresseur chaque fois qu'on a besoin de source continue sachant que l'énergie électrique est disponible en alternative. Les redresseurs ont un très vaste domaine d'application mais malheureusement leur inconvénient major est qu'ils envoient au réseau des courants non sinusoïdaux riches en harmonique. Nous utilisons un pont triphasé à diodes alimenté par un système de tension sinusoïdale triphasée, la structure de ce redresseur est représentée par la figure « IV.3 ».

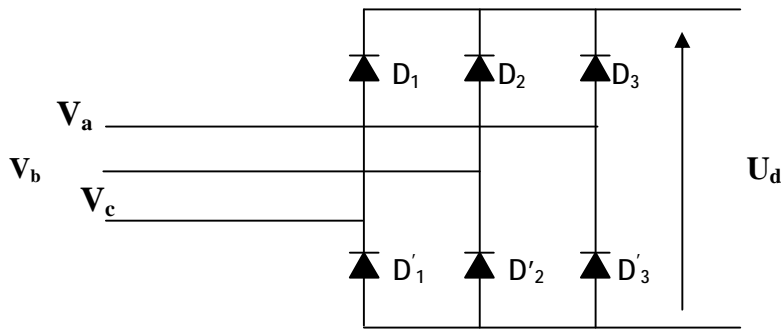


Figure IV.3 : Redresseur à diodes.

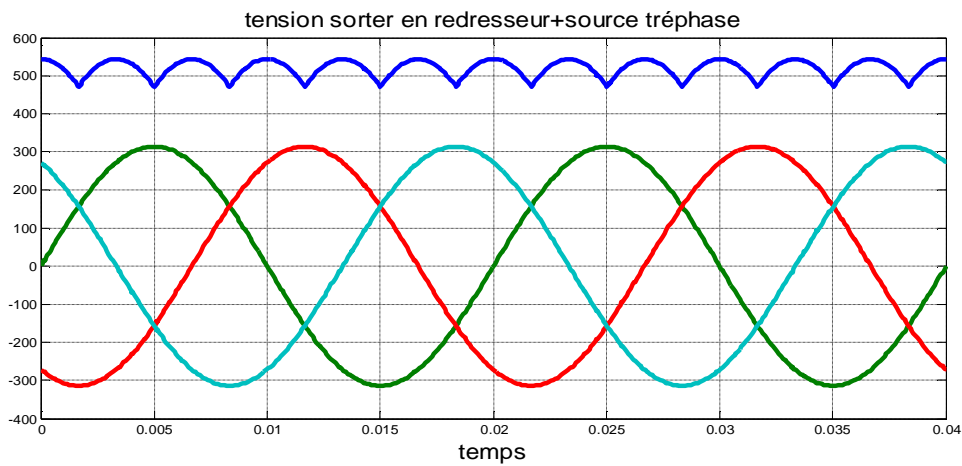


Figure IV.4 : Tension d'alimentation triphasées et la tension redressée U_d

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire (ne guider) simultanément. Lorsque D₁ conduit, l'une des deux diodes D₂ et D₃ conduit également. Il en vient que D₁ conduit lorsque V₁ est supérieur à V₂ et V₃, ou encor :

$$V_1 = \text{Max} (V_j) ; j = 1, 2, 3.$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes:

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{Max} (V_j) ; i=1, 2, 3 ; j=1, 2, 3.$$

$$D'_i \text{ conduit si } V'_i = \text{Min} (V_j) ; i=1, 2, 3 ; j=1, 2, 3.$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension U_d à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \text{Max} (V_j) - \text{Min} (V_j) ; j=1, 2, 3. \text{ (figure IV.4).}$$

La tension obtenue par ce redresseur présente des ondulations importante, ce qui nécessite un filtre.

IV.2.2 Modélisation de l'onduleur de tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation. Généralement à transistors ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Le principe de fonctionnement s'exprime par le séquençage imposé aux interrupteurs statiques qui réalisent la modulation de largeur des impulsions de tension appliquées aux enroulements statoriques de la machine [4].

Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant. Dans l'hypothèse réaliste de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor-diode, assemblés en parallèle forme un interrupteur (demi bras) bi-commandable (commandé à l'ouverture et à la fermeture) chaque demi bras possède son complémentaire.

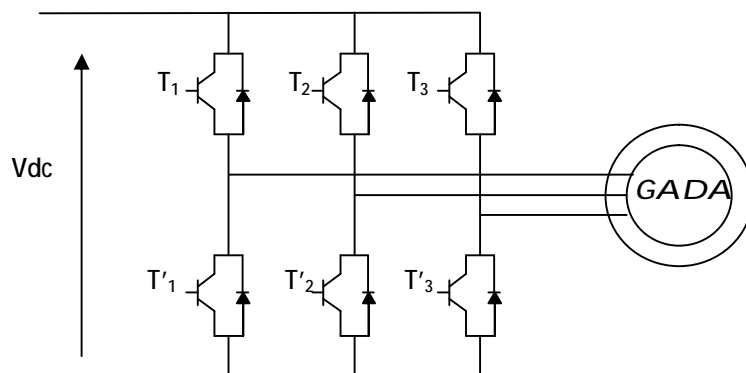


Figure IV.5: Représentation d'un onduleur à deux niveaux

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

- Branche 1 :

$S_a=0$ Si S_1 est ouvert et S_4 est fermé ;

$S_a=1$ Si S_1 est fermé et S_4 est ouvert.

- Branche 2:

$S_b=0$ Si S_2 est ouvert et S_5 est fermé;

$S_b=1$ Si S_2 est fermé et S_5 est ouvert.

- Branche 3:

$S_c=0$ Si S_3 est ouvert et S_6 est fermé;

$S_c=1$ Si S_3 est fermé et S_6 est ouvert.

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions

Des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3(U_{ab} - U_{cd}) \\ V_b = 1/3(U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_{dc}/3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

IV.2.2.1 Stratégie de commande de l'onduleur :

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

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- *L'indice de modulation « m »* qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la Porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$\mathbf{m} = \frac{f_p}{f} \implies f_p = m * f \quad (\text{IV.4})$$

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

$$\mathbf{r} = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{IV.5})$$

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras \mathbf{k} peuvent être résumés en :

$$V_{ref} \geq U_p \implies S_k = 1 \implies V_k = V_{dc} .$$

$$V_{ref} \leq U_p \implies S_k = 0 \implies V_k = -V_{dc} . \quad (\text{IV.6})$$

▼ Simulation d'onduleur MLI en générale :

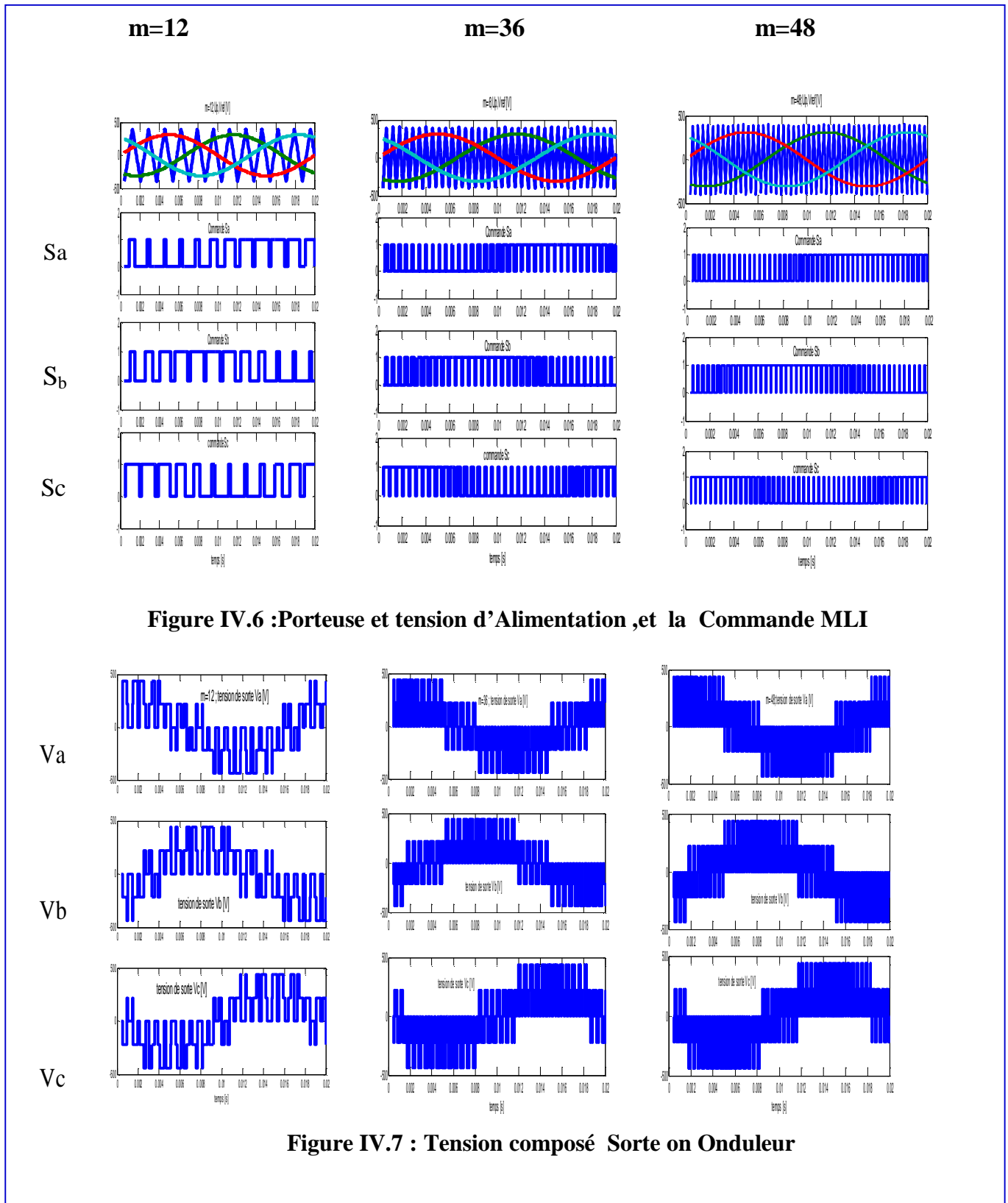


Figure IV.6 : Porteuse et tension d'Alimentation ,et la Commande MLI

Figure IV.7 : Tension composé Sorte on Onduleur

IV.2.3 Les équations du filtre :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} (U_d - U_{dc} - R \cdot I_d) \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (I_d - I) \end{array} \right. \quad (IV.7)$$

Le rôle de la capacité C est d’assurer le caractère d’une source de tension à courant continu à l’entrée de l’onduleur, de fournir l’énergie réactive à la machine, et d’absorber le courant négatif par la charge. Le rôle de l’inductance L est de lisser le courant I_d à travers la source de Tension

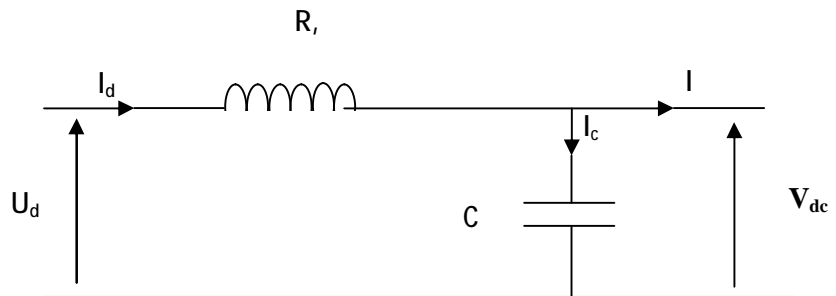


Figure IV.8: Représentation du filtre.

IV.2.3.1 La fréquence de coupure

est donnée par :

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} = 2 * \pi * f_c \quad (IV.8)$$

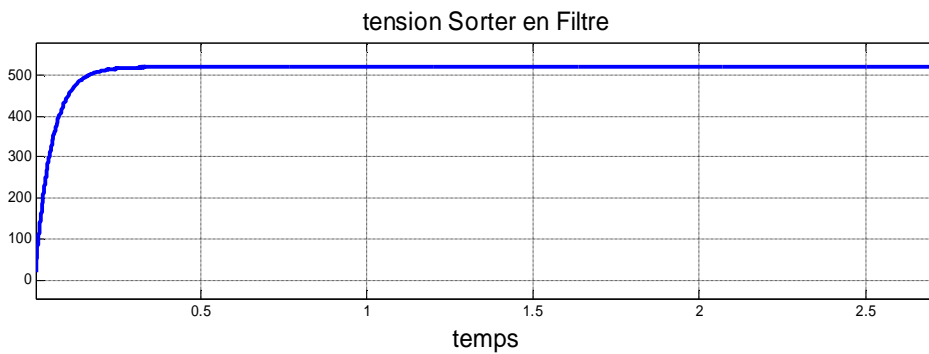


Figure IV.9: La tension a la sortie du filtre.

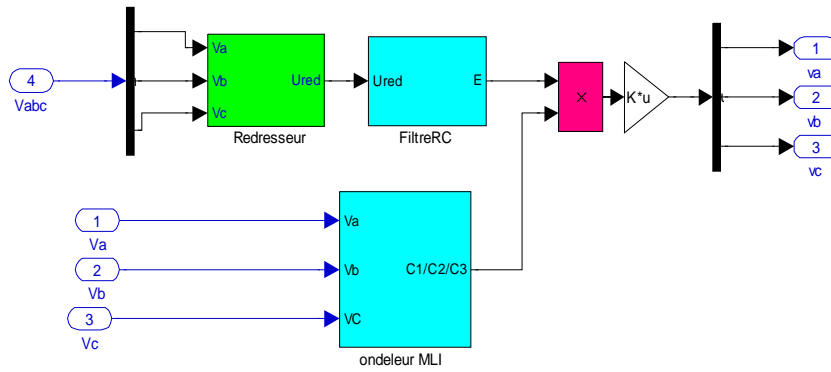


Figure IV.10 : Schémas de convertisseur AC/AC

IV.3 Simulation de l'association « Turbine - GADA - convertisseur AC/AC » :

a) Schémas globale de simulation :

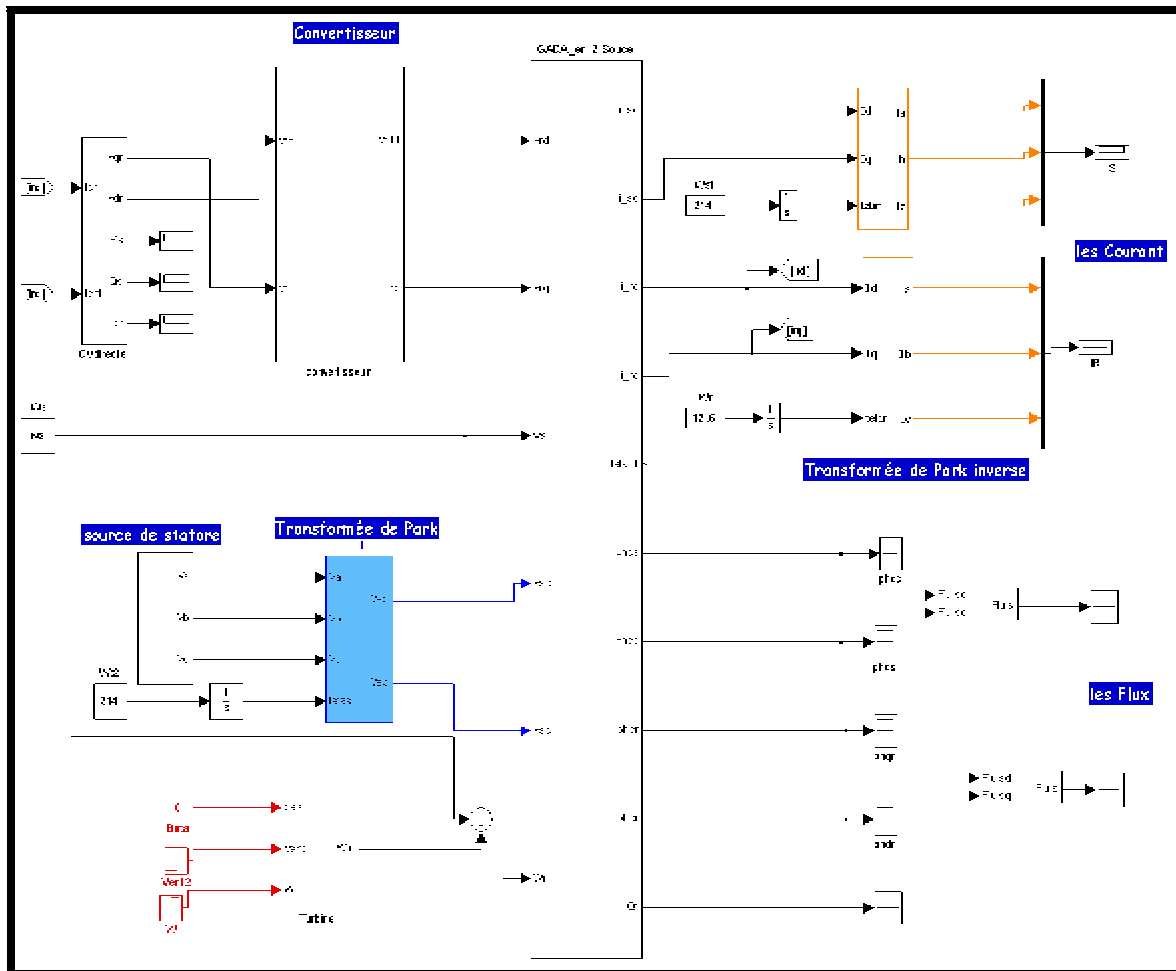
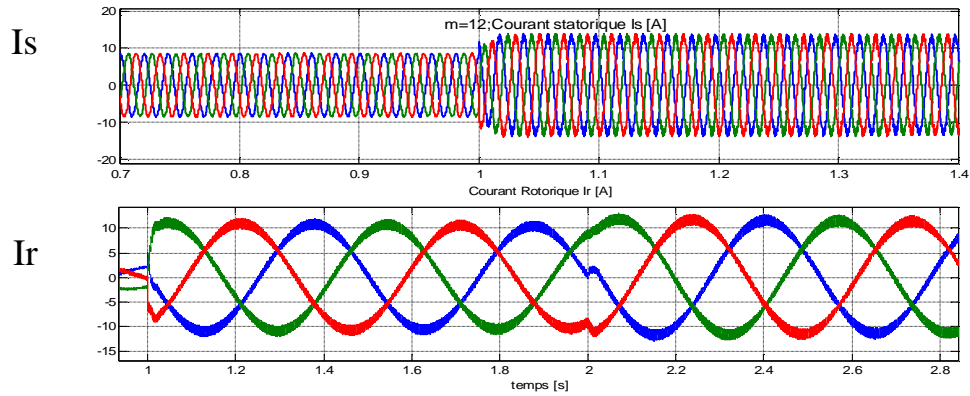


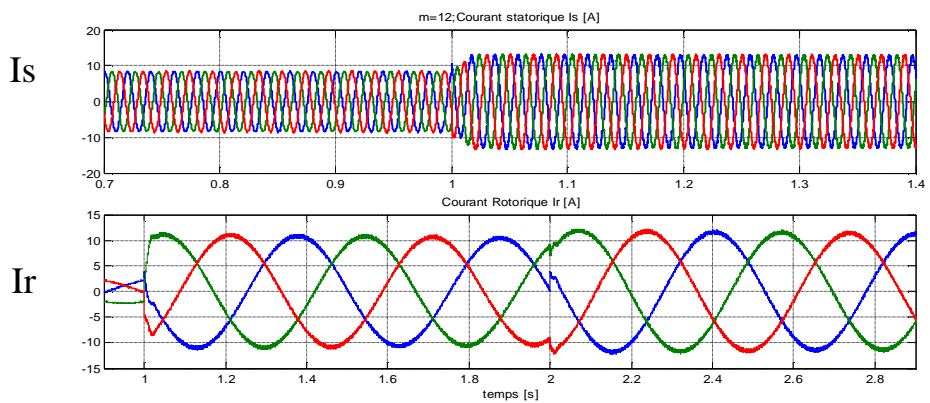
Figure IV.11 : Schémas globale de l'association « Turbine - GADA - convertisseur AC/AC »

b) Résultats de simulation :

Ø m=12



Ø m=36



Ø m=48

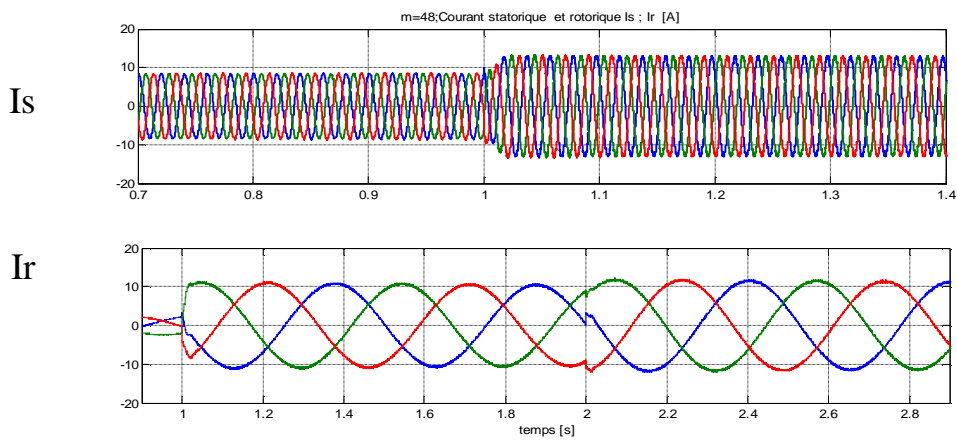


Figure IV.12 Courants statorique et rotorique avec variation de rapport m

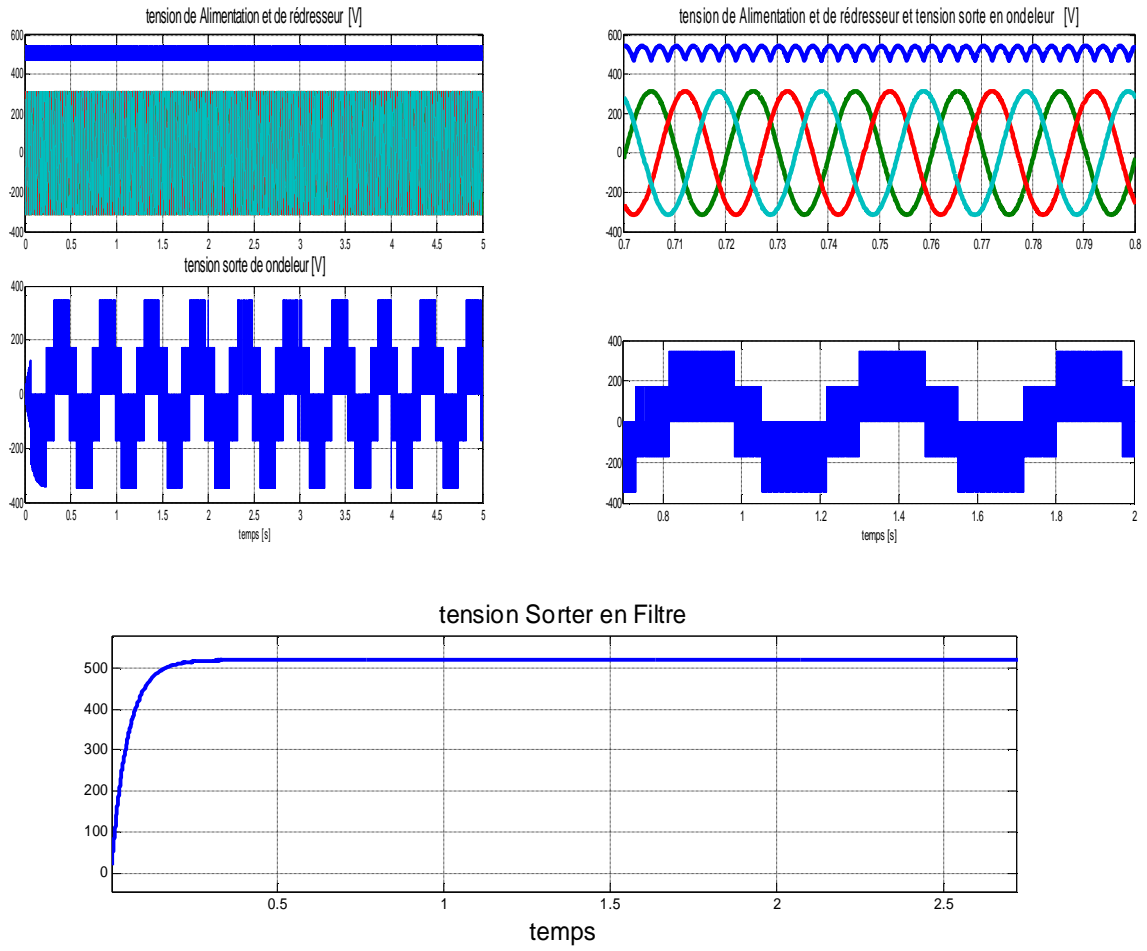


Figure IV.13 : Résultats de Simulation de convertisseur

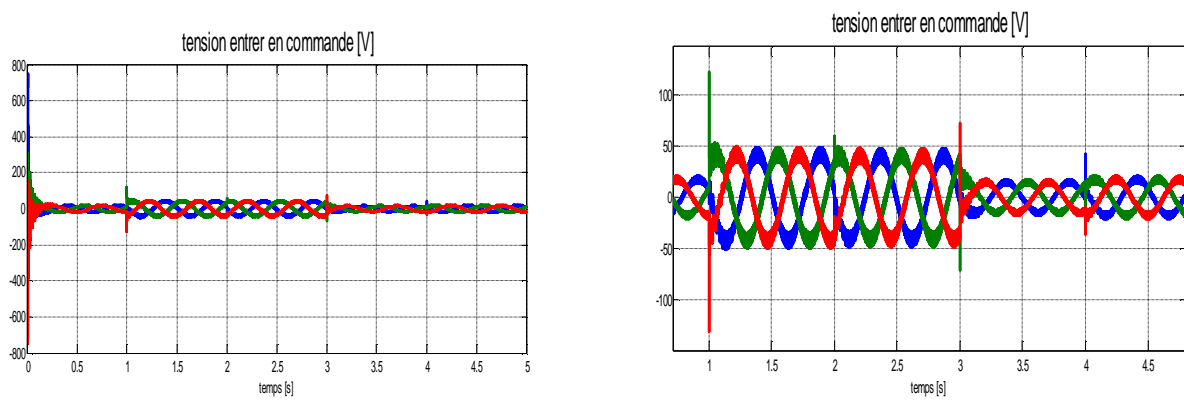


Figure IV.14 : Tension d'entrée de convertisseur

C) Résultats du simulation de l'ensemble « GADA+ commande Vectorielle + Convertisseur (AC/AC) +turbine » :

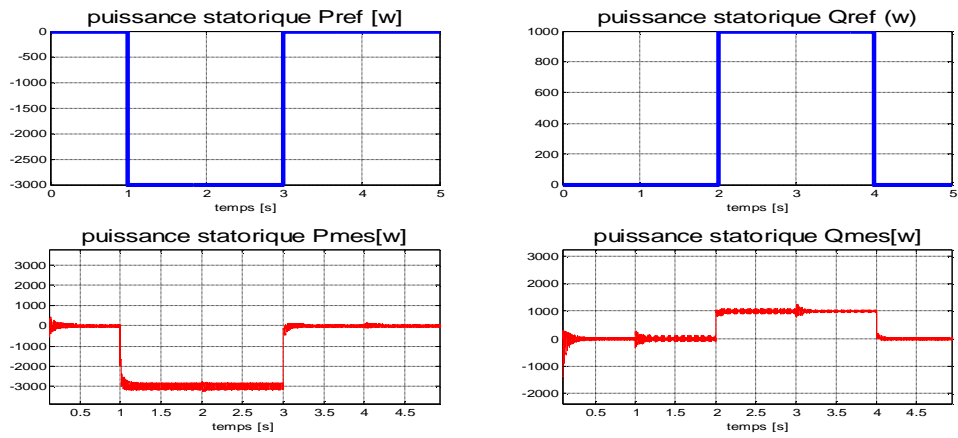


Figure IV.15 : Puissance statorique et rotorique

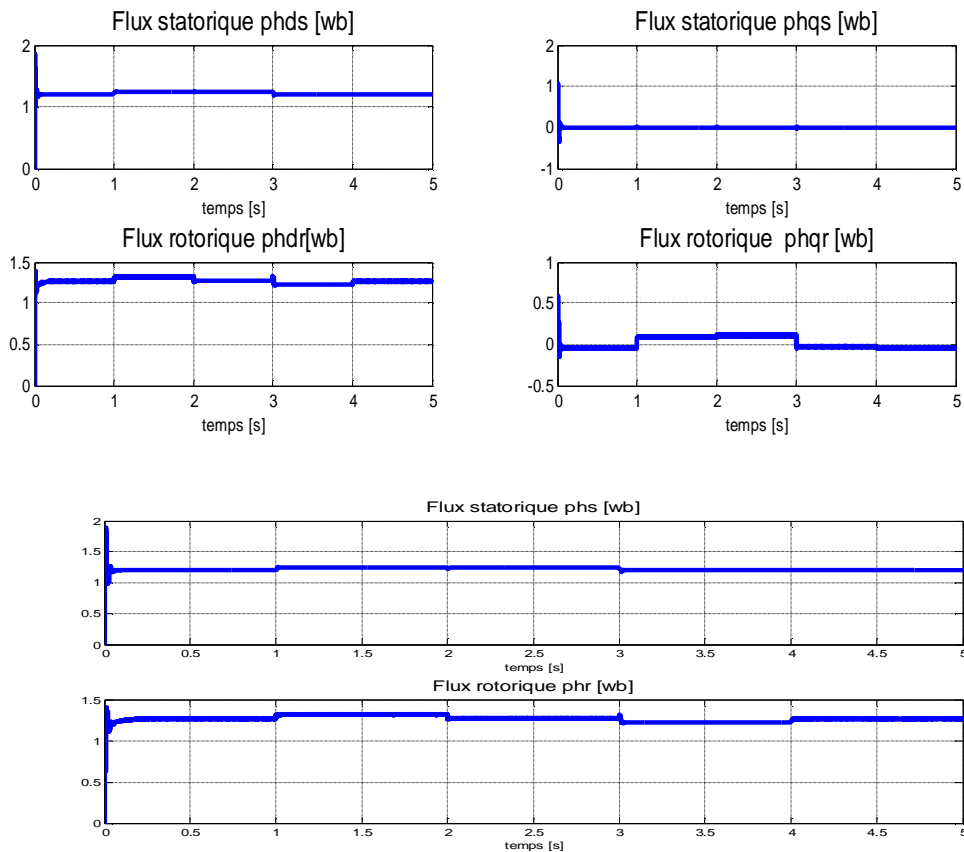


Figure IV.16 : Flux statorique et rotorique

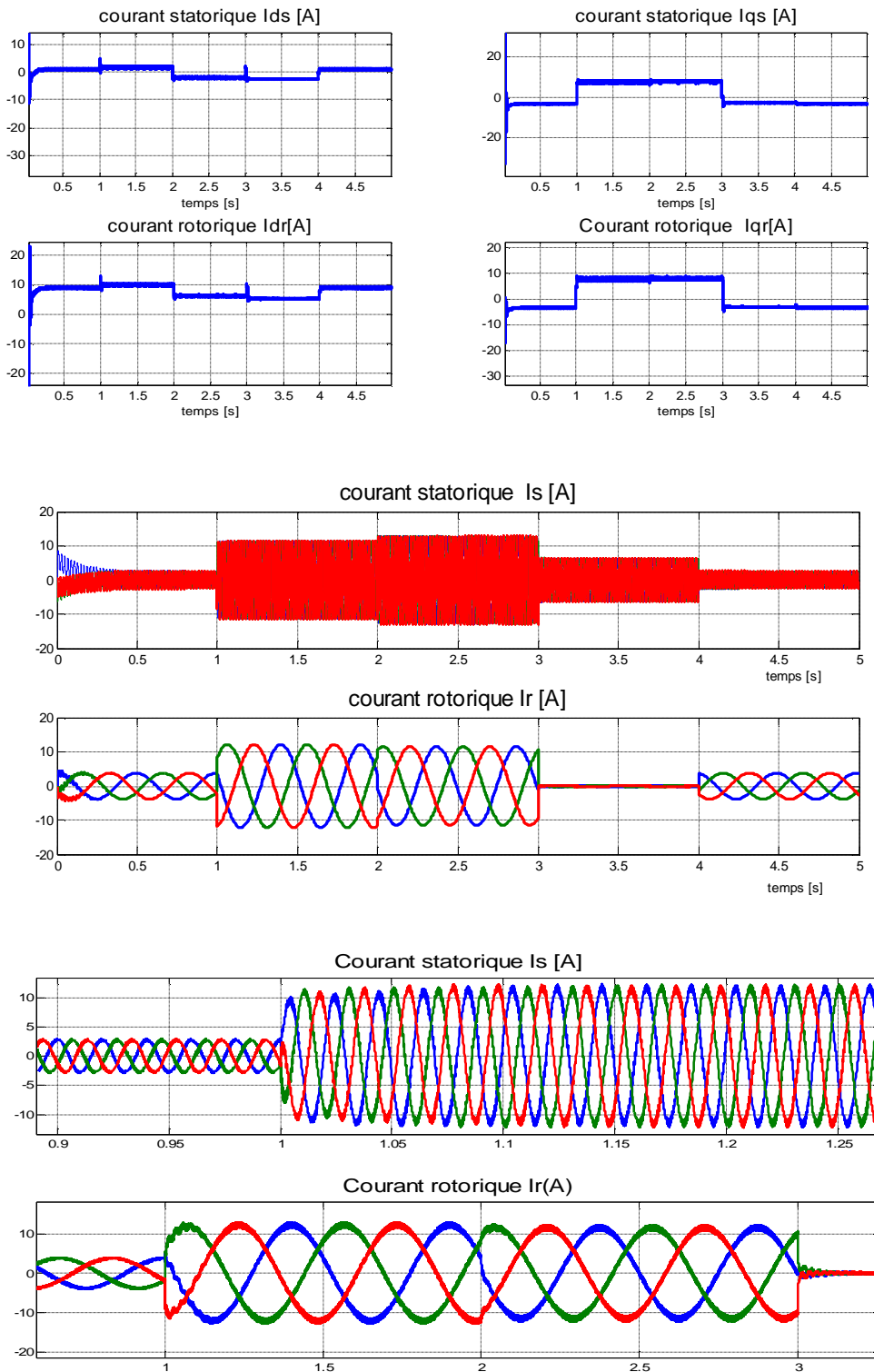


Figure IV.17 : ZOOM de courant statorique et rotorique

Le convertisseur et négliger la perturbation et les' harmoniques de GADA et donne mieux résultat
 La technique MLI nous a permis d'obtenir des courants triphasés statoriques parfaitement

sinusoïdaux , cela est illustré par la figure **Fig. (IV.18)** , qui représente un courant et une tension d'une même phase statorique (la phase a) .

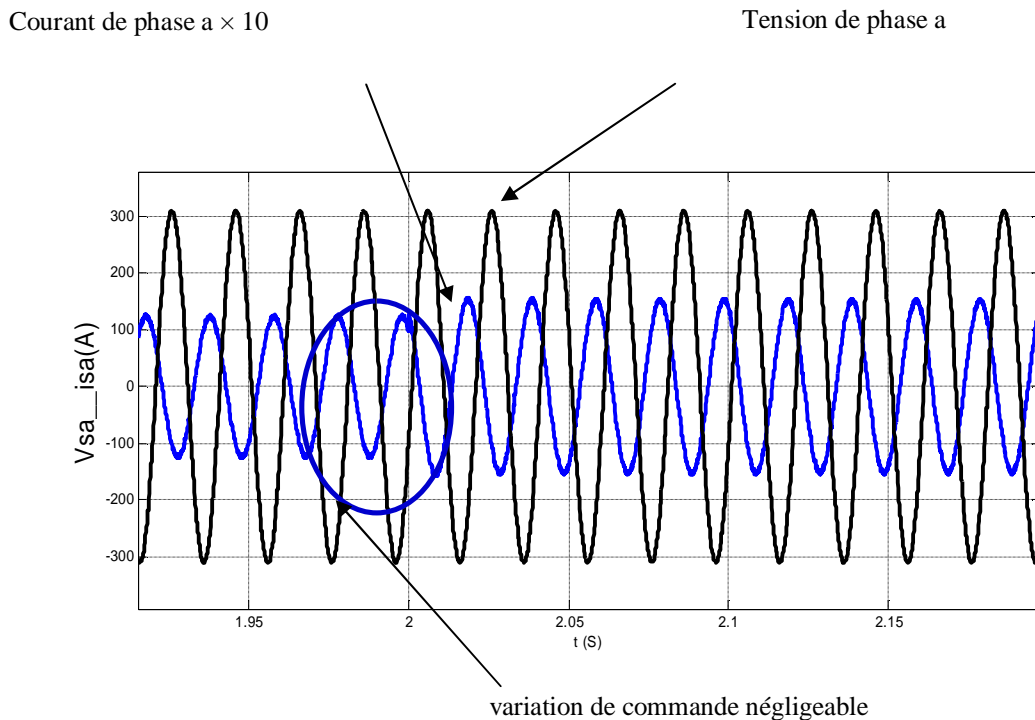


Figure IV.18 : Tension et courant de phase statorique

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons vu que la génératrice asynchrone à double alimentation avec convertisseur AC/AC, a été ramenée à une machine biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Park permettant le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé. Cette modélisation nous a montré un fort couplage entre les puissances actives et réactive. Ainsi que, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander, pour ça nous avons développé un modèle de la machine dans le référentiel lié aux champs tournant (d, q) en vu de la commande des puissances active et réactive et ajouter un convertisseur AC/AC plus turbine (figure IV.12) .

En tout augment le rapporte m le résultat plus précise et harmonique démunie

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude d'une génératrice 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 l'état de l'art sur l'éolienne et l'étude de vent plus les différents types d'éolienne et leurs utilisations et la Modélisation de turbine éolienne.

La modélisation de la machine « génératrice » asynchrone à double alimentation était l'objectif du deuxième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine « GADA » étudiées 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 sous Matlab/Simulink nous confirment la validité du modèle linéaire pour l'application envisagée de la machine plus les résultats de simulation très validité.

Pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la GADA. Pour ce la, le troisième chapitre était réservé aussi au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la GADA à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans la quelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques en fonction des tensions rotoriques afin d'envisager un pilotage de la machine par le rotor . Suivant la prise en compte des couplages entre les axes ou non, trois méthodes ont étaient considérées. La comparaison des résultats de simulation de ces trois méthodes en termes de suivi de consigne et de robustesse a permis de dévoiler la méthode qui sera retenue.

On a présenté dans le dernier chapitre la modélisation et simulation d'un onduleur deux niveaux en cascade avec redresseur à diode associé à la génératrice et la turbine « turbine – GADA - convertisseur AC/AC - commande vectorielle » .

La chronologie de fonctionnement de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent été illustrée et la puissance est effectivement maximisée.

A l'égard du travail que nous avons présenté, des perspectives pouvant être envisagés Pour l'amélioration de la chaîne turbine-GADA- réseau. Parmi les quels on peut citer :

- 1) L'utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique floue, réseaux de neurones,...etc.
- 2) L'établissement d'un modèle de la GADA plus réaliste prenant en compte la saturation magnétique.
- 3) L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- 4) L'intégration éventuelle d'un système de stockage d'énergie pour le lissage de la puissance fournie au réseau.
- 5) Enfin, l'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis les déséquilibres du réseau électrique.

PARAMETRES DE LA GADA

La machine utilisée est une machine asynchrone à rotor bobiné d'une puissance de 4kW dont les paramètres sont donnés sur le tableau suivant :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale P_N	4kw
Tension nominale V_N	220v
Resistance statorique R_S	1.2
Resistance rotorique R_R	1.8
Inductance statorique L_S	0.1554
Resistance rotorique L_R	0.1568
Inductance magnétisante M	0.15
Nombre de paires de pôles P	2
Inertie J	0.2
Fréquence f	0.001
Vitesse synchronisme $\omega_s = 2p f$	314 rad/s
La tension simple de réseau V_S	220V

En effectuant le calcul des gains des régulateurs suivant la méthode détaillée en chapitreIII, on trouve les valeurs numériques, affinées pour obtenir les meilleures performances, suivantes.

PARAMETRE DE REGULATEUR

Tableau B.1 Gains des régulateurs utilisés

Méthode	Commande directe	Commande indirecte BO	Commande indirecte BF	
	Puissances	Courants	Courants	Puissances
k_i	1.25549263	124.546	124.546	1.25549263
k_p	9.3791	937.93	937.93	9.3793

PARAMETRES DE LA TURBINE

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale P_N	5kw
Vitesse nominale de Vent	14 m/s
Diamètre	5.1 m
Nombre des pôles	3
Vitesse de rotation	250 tr/min
Mats	24
Nacelle Complete	0.15

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE**

OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE

Année Universitaire : 2010 / 2011

Proposé et dirigé par : Madame BELOUNIS Ouassila

Présenté par : DEHOUM Fawzi
CHERIAT el Hachemi
DJEDDOU Lakhdar

Thème

**COMMANDE VECTOREILLE D'UNE GENERATRICE
ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION « GADA »
POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE**

Résumé :

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone à rotor bobiné à double alimentation « GADA » dans la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, puis de la « GADA » faisant appel à des dispositifs d'électronique de puissance, la stratégie de commande développée est basée sur un contrôle vectoriel. Cette étude a été conclue par des résultats de simulation, pour une validation des modèles obtenus du système.

Mots clés : Vent, Turbine, éolienne, Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA), Modélisation, Commande vectorielle, Convertisseur AC/AC «redresseur-filtre- Onduleur triphasé à deux niveaux », Simulation.