

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT: GENIE ELECTRIQUE
N° : CSE-016



DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : ENERGI RENOUEVELABLE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Intitulé

Commande d'une Génératrice Asynchrone dans une
Chaine de Conversion d'Energie

Proposé et dirigé par:
D^r. KHODJA Djalal Eddine

Présenté par:
BOUCHERIF Abir
DJEBLAHI Soumia

Année universitaire: 2019 / 2020



REMERCIEMENTS

Je tiens profondément à remercier tout d'abord DIEU l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.

*JE remercie, en premier lieu, mon encadreur **Monsieur KHODJA Djalal Eddine** pour sa disponibilité, son intérêt et ses conseils valeureux.*

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

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...

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce Travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail a:

Toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire :

L'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde ; a toi **Mon Père**.

La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; **Maman** que j'adore

A mes chères :

Grande sœur **Sara**, ma fierté et mon honneur, et son mari **Gellali**

Grand frère **Hassen Imad Eddine** et sa fiancée **Hafida**

Frères **Amine Mohammed**, et **Alla Eddine**.

Adorable petite sœur **Réham Hadil** qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.

Qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir, que dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

Mes chères neveux **Adam** et **Assil**, que j'aime tant .

Tous mes amis de promotion de 3^{ème} année Licence électrotechnique,

Et de promotion de 4^{ème} année Master Energie renouvelable.

Proches Amis : **Soumia** et **Maria**

ABIR



Dédicace

*A Mon Père , Que Dieu Te Protège Et Prenne Soins De Lui, Qui
Peut Etre Fier Trouver Ici Les Résultats De Longues Années De
Sacrifices Et De Privations Pour m'aider A Avancer De La Vie.
A Ma Mère , Que Dieu Lui Protège Qui A Etait Le Secret De Ma
Patience De La Poursuite De Mes Etudes Et Qui A Œuvré Pour
Ma Réussite.*

*A Mes Frères Et Mes Sœurs
A Mon Seul Cher Neveu « Wassim »
A ma belle-sœur et mon beau frère
A Tous Ceux Qui m'aident Et Me Conseillent
A Tous Mes Amies, a '« Maria et ma collègue de projet Abir »
A Tous Qui m'aiment*

SOUUMIA

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

Notations

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	----------

CHAPITRE I

**ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION DE L'ENERGIE
EOLIENNE**

I. INTRODUCTION	4
------------------------	----------

I.1. GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE	4
--	----------

I.1.1. Constitutions D'une Eolienne	4
-------------------------------------	---

a. Rotor	5
----------	---

b. Nacelle	6
------------	---

c. Multiplicateur	6
-------------------	---

d. L'anémomètre	6
-----------------	---

e. Génératrice	6
----------------	---

f. Le Système D'orientation	7
-----------------------------	---

g. Mat	7
--------	---

I.1.2. Principe De Fonctionnement	7
-----------------------------------	---

I.2. PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DES SYSTEMES EOLIENS	8
--	----------

I.2.1. Eolienne A Axe Verticale	8
---------------------------------	---

A. Avantages	9
--------------	---

B. Inconvénients	10
------------------	----

I.2.2. Eoliennes A Axe Horizontal	10
-----------------------------------	----

A. Avantages	10
--------------	----

B.. Inconvénients	11
I.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE	11
A. Avantages De L'éolien	11
B. Inconvénients De L'éolien	12
I.4. APPLICATIONS DES EOLIENNES	13
I.5. STRATEGIES DE COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE	14
I.6. ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTR- OMECANIQUE	15
I.7. GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	17
I.7.1 Description De La Machine Asynchrone A Double Alimentation	17
I.7.2. Mode De Fonctionnement De MADA	18
I.7.2.1 Fonctionnement En Mode Moteur Hypo synchrone	18
1.7.2.2 Fonctionnement En Mode Moteur Hyper synchrone	19
I.7.2.3 Fonctionnement En Mode Génératrice Hypo Synchrone	19
I.7.2.4 Fonctionnement En Mode Génératrice Hyper Synchrone	20
I.8. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA GADA	21
A. Avantages De La MADA	22
B. Inconvénients De La MADA	23
I.9. APPLICATION DES MACHINES ASYNCHRONES A DOUBLE ALIMENTATION	23
I.9.1 Application Moteur	23
I.9.2 Application Génératrice	24
- Application De La GADA Dans Le Domaine Eolien	24
I.10. PROBLEMATIQUE	25
I. CONCLUSION	26

CHAPITRE II**MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE**

II. INTRODUCTION	28
II.1. MODELISATION DU VENT	29
II.1.1. Conversion D'énergie Aérodynamique En Energie Electrique	29
II.1.2. Loi De Betz	30
II.1.3. Le Coefficient De Vitesse Réduite	32
II.1.4. Le Coefficient De Puissance	33
II.1.5. Le Coefficient De Couple	34
II.1.6. Simulation	35
II.2. MODELISATION DE LA TURBINE	35
II .2.1. Modèle De La Turbine	36
II.2.2. Modèle Du Multiplicateur	37
II.2.3. Modèle De L'arbre	37
II.2.4. Simulation	38
II.3. MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION	39
II.3.1. Equations Mathématiques De La MADA Dans Le Repère (<i>abc</i>)	40
II.3.1.1. Equations Electriques	40
II.3.1.2. Equations magnétiques	41
II.3.1.3. Equation mécanique	41
II.3.2. Transformation De Park	42

II.3.3. Equations mathématiques de la MADA dans le repère(dq)	42
II.3.3.1. Equations électriques	43
II.3.3.2. Equations magnétiques	44
II.3.3.3 Equation du couple électromagnétique	45
II.3.4. Choix de repère de référence de park	45
II.3.5. Modèle d'état de la MADA	46
II.3.6. Résultats de simulation numérique du système	46
II.3.7. Interprétation Des Résultats	49
II.4. MODELISATION DES CONVERTISSEURS	50
II.4.1. Redresseur A Trois Phases	50
II.4.1.1. Schéma Symbolique De Redresseur	50
II.4.1.2. SCHEMA BLOK E DE REDRESSEUR	50
II.4.1.3. Simulation (Cas Générale)	51
II.4.2. Onduleur A Trois Phases	51
II.4.2.1. Schéma Symbolique De L'onduleur	51
II.4.2.2. Structure De L'onduleur De Tension	51
II.4.2.3. Modèle De Commande De L'onduleur De Tension	52
II.4.2.4. Simulation (L'onduleur Cas Générale)	54
II.CONCLUSION	58

CHAPITRE II

COMMANDE DE LA CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

III. NTRODUCTION	60
III.1. PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE	60

III.2. MODELE DE LA GADA AVEC ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE	61
III.2.1. Choix Du Référentiel Pour Le Modèle Diphasé	62
III.2.2. Relation Entre Les Courants Statoriques Et Les Courants Rotoriques	63
III.2.3. Relations Entre Puissances Statoriques Et Courants Rotoriques	63
III.2.4. Relations Entre Tensions Rotoriques Et Courants Rotoriques	64
III.2.5. Type Des Régulateurs Utilisent	66
- Système Régulé Par Un Régulateur PI	67
III.3. LES TYPES DE COMMANDE VECTORIELLE	68
III.3.1. Commande Vectorielle Directe	69
III.3.2. La Commande Indirecte	69
III.3.2.1. Commande En Boucle Ouverte	69
III.3.2.2. Commande En Boucle Fermée	71
III.4. RESULTATS DE SIMULATION	71
III.4.1. Résultats De Simulation Sans Onduleur (GADA + SVM)	72
III.4.2. Interprétation Des Résultats	77
III.4.3. Résultats De Simulation Avec Onduleur (GADA + SVM +OND)	78
III.4.4. Interprétation Des Résultats	81
III.5. SIMULATION DE L'ENSEMBLE (GADA+ COMMANDE VECTORIELLE + CONVERTISSEUR (AC/AC) +TURBINE)	82
III.5.1. Schémas Globale De Simulation	82
III.5.2. Résultats De Simulation De L'ensemble (GADA+ Commande Vectorielle + Convertisseur (AC/AC) +Turbine)	82
III. CONCLUSION	89
CONCLUSION GENERALE	91
Annexe A	94

SOMMAIRE

Annexe B	95
BIBLIOGRAPHIQUES	97

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

Figure I.1 : Constitution d'une éolienne	5
Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	7
Figure I.3: Eolienne de Savonius	8
Figure I.4: Eolienne de Darrieus	9
Figure I.5 : Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale	10
Figure I.6 : Courbe typique de puissance récupérée $P(v)$ en fonction de la vitesse du vent	15
Figure I.7 : Evolution de la configuration électrique	17
Figure I.8 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA	18
Figure I.9 : Le fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	19
Figure I.10 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.	19
Figure I.11: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.	20
Figure I.12 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	20
Figure I.13 : Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.	21
Figure I.14 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA.	23
Figure I.15: Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.	25

CHAPITRE II

MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

Figure II.1 : Schéma synoptique du système de conversion	28
Figure II.2 : Colonne d'air animée d'une vitesse v	30
Figure II.3 : théorie de Betz : schéma de principe	30
Figure II.4 : Coefficient de puissance C_p	32
Figure II.5 : Vitesse du vent v et vitesse tangentielle $R_t \Omega_t$	33
Figure II.6 : Coefficient de puissance pour différents types de turbine éolienne	34
Figure II.7 : Profil du vent appliqué à la turbine	35
Figure II.8: Différent partie de la turbine	35
Figure II.9 : Allure du coefficient de puissance pour une éolienne réelle	37
Figure II.10 : Vitesse mécanique	38
Figure II.11 : Coefficient de vitesse réduite (vitesse spécifique) λ	38

Figure II.12 : Coefficient de puissance C_p	39
Figure II.13 : Puissance mécanique transmise à la GADA	39
Figure II.14 : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation	40
Figure II.15 : Transformation des variables statoriques et rotoriques	43
Figure. II.16 : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor	47
Figure II.17 : Les courants statoriques triphasés avec un zoom	47
Figure II.18 : Les courants rotoriques triphasés avec un zoom	48
Figure II.19 : Le flux statorique	48
Figure II.20 : La puissance active et réactive statorique	48
Figure II.21 : La puissance active et réactive rotorique	49
Figure II.22 : Le couple électromécanique (N.m).	49
Figure II.23 : Schéma de principe de Redresseur	50
Figure II.24 : Redresseur à diode	50
Figure II.25 : Les tensions de source, Tension de charge et Courant de charge	51
Figure II.26 : Schéma de principe de l'onduleur	51
Figure II.27 : Onduleur de tension triphasé	52
Figure II.27 : Porteuse et tension d'Alimentation, et la Commande MLI	56
Figure II.28 : Les Tensions (V_a, V_b et V_c) composé Sorte on Onduleur	57
Figure II.29 : Tension V_{abc} composé Sorte on Onduleur	57

CHAPITRE II

COMMANDE DE LA CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

Figure III.1 : Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA	61
Figure III.2 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique	62
Figure III.3 : Bloc de contrôle à flux orienté	64
Figure III.4 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne)	66
Figure III.5 : Schéma de la régulation	67
Figure III.6 : Schémas commande vectorielle direct	69
Figure III.7 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte	70
Figure III.8 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé	71
Figure III.9 : Puissance statorique $P_{mes}(w)$	72
Figure III.10 : Puissance statorique $P_{ref}(w)$	72
Figure III.11 : Puissance statorique Q_{ref} (VAR)	72
Figure III.12 : Puissance statorique Q_{mes} (VAR)	73
Figure III.13 : Courant rotorique I_r (A)	73

Figure III.14 : Courant statorique I_s (A)	74
Figure III.15 : Flux statorique et rotorique en forme (d , q)	75
Figure III.16 : Courants statorique et rotorique (d , q)	76
Figure III.17 : Couple électromagnétique (N.m)	77
Figure III.18 : Tension transmise le rotor (Vdq)	78
Figure III.19 : le courant statorique avec ZOOM(abc)	79
Figure III.20 : le courant rotorique (abc)	79
Figure III.21 : La puissance statorique	80
Figure III.22 : La puissance rotorique	80
Figure III.23 : Le Flux statorique	80
Figure III.25 : couple électromécanique	81
Figure III.26 : Schémas globale de l'ensemble (GADA+ commande Vectorielle + Convertisseur (AC/AC) +turbine)	82
Figure III.27 : Puissance statorique référenciel	82
Figure III.28 : Puissance statorique mesure	83
Figure III.29 : Flux statorique et rotorique	84
Figure III.30 : Courant statorique et rotorique avec ZOOM	86
Figure III.31 : le couple électromagnétique	87
Figure III.32 : Puissance active et réactive statorique qui sorte à partir le GADA	88
Figure III.33 : Puissance active et réactive rotorique qui sorte à partir le GADA	88

Notations

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Traking
GADA	génératrice asynchrone à double alimentation
GAS	la génératrice asynchrone a cage d'écureuil
GS	les génératrices synchrones
IGBT	InsulatedGateBipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée)
FBO	fonction de transfert boucle ouverte
FBF	fonction de transfert boucle fermée

Symboles

P_{vent}	Puissance du vent captée par les pales
ρ	Densité de l'air
S	surface balayée par la turbine
C_p	Coefficient de puissance de la turbine
λ	Vitesse en bout de pales
β	Angle de calage
P_n	Puissance nominale
Ω_t	vitesse angulaire de la turbine
R	Rayon d'une pale de la turbine

C_{aero}	couple au niveau de l'arbre
$\Omega_{méc}$	vitesse mécanique de la turbine
G	Rapport du multiplicateur
J_t	Inertie de la turbine
J	Inertie totale des parties tournantes
J_g	Inertie du générateur
$C_{méc}$	Couple mécanique sur l'axe du générateur
C_{em}	Couple électromagnétique du générateur
V_{sa}, V_{sb}, V_s	Tensions statoriques instantanées aux bornes des phases (a ,b ,c) respectivement
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques instantanées traversant les phases (a,b,c) respectivement
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$	statoriques correspondant aux phases (a ,b ,c)respectivement
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	Tensions rotoriques instantanées aux bornes des phases (a,b,c) respectivement
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	Courants rotoriques instantanées traversant les phases (a,b,c) respectivement
$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	Flux rotoriques correspondant aux phases (a,b,c) respectivement
v_{qs}, v_{ds}	Tensions statoriques instantanées sur les

	axes (d,q) respectivement
i_{ds}, i_{qs}	Flux statoriques sur les axes (d,q) respectivement
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statoriques sur les axes (d,q) respectivement
v_{dr}, v_{qr}	Tensions rotoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement
i_{dr}, i_{qr}	Courants rotoriques instantanées sur les axes (d,q) respectivement
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotoriques sur les axes (d,q) respectivement
$[v_s], [v_r]$	Vecteurs des tensions des phases statoriques et rotoriques
$[i_s], [i_r]$	Vecteurs des courants de phases statoriques et rotoriques
$[\varphi_s], [\varphi_r]$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
$M_{sr} = M_{rs}$	Inductance mutuelle entre phase a du stator

et phase a du rotor

M Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorrotor obtenue lorsque les axes en question coïncident.

C_r Couple résistant du générateur

Ω Vitesse angulaire de la machine

ω_r Pulsation des courants triphasés rotoriques

ω_s Vitesse de synchronisme

ω_{gl} Pulsation électrique fondamentale du glissement

P Nombre de paire de pole de la machine

θ Angle entre les systèmes d'axes biphasé et triphasé

S1, S2, S3 Fonctions logiques désignant les instants de commutation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies propres et renouvelables tels que la biomasse, l'hydraulique, le solaire et l'éolienne sont par fois présentés comme l'une des solutions au problème du réchauffement climatique puisqu'elles n'émettent aucun gaz à effet de serre.

Il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment l'énergie renouvelable pour pouvoir diminuer la consommation de l'énergie fossile.

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

C'est dans ce cadre que le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation de la machine asynchrone dans un système éolien.

Dans ce travail, nous présentons la modélisation de ressource de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, puis expliciter les différents éléments constitutifs de la turbine et montrer le modèle de la turbine où on tient compte de (MPPT) dans le but d'extraire le maximum de puissance. En effet, on va établir un modèle diphasé de la GADA, et mettre en place d'une stratégie de commande permettant le fonctionnement en génératrice dans le contexte d'un système éolien. et appliquer cette commande pour contrôler indépendamment la puissance active et réactive générées par la machine asynchrone. Ensuite, on va évaluer les performances par l'association avec un modèle de turbine et appliquer la technique de la modulation vectorielle SVM pour minimiser les ondulations de tensions et de courant.

Pour effectuer ce travail, le mémoire est organisé comme suit : Dans le premier chapitre, on va présenter l'état de l'art des énergies renouvelables où on présentera l'étude des aérogénérateurs, leurs constitutions et leur principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre, après un rappel des notions élémentaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique, sera consacré à la description et la modélisation de la turbine, des systèmes éoliens à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement en présentant le modèle de la turbine avec régulateur PI appliqué pour l'asservissement de la vitesse de l'arbre.

Et Dans le troisième chapitre nous traiterons la génératrice asynchrone à double alimentation ; Cette dernière sera modélisée et simulée dans l'environnement MATLAB, en se basant sur la transformation de PARK, ainsi que les grandeurs de commande utilisées lorsqu'elle est intégrée à un système éolien, une modélisation dans un repère biphasé lié au champ statorique et une stratégie de commande vectorielle en puissance active et réactive sont proposées .Dans ce même chapitre nous proposerons, une synthèse du régulateur proportionnel intégral (PI), ainsi que des résultats obtenus par simulation.

Le dernier chapitre sera consacré à de l'association machine asynchrone –convertisseur. Nous présenterons la modélisation de l'onduleur de tension, et également la technique de la modulation vectorielle SVM (*Space Vector Modulation*). Par cette technique seront notamment présentés des résultats de la simulation de la GADA qui est alimentée par un onduleur.

CHAPITRE I

I. INTRODUCTION

L'énergie du vent ou énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des vents.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- la transformation en énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- la production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour créer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne produisant de l'électricité est parfois qualifiée d'aérogénérateur.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui n'émet pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation

I.1. GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE

I.1.1. Constitutions D'une Eolienne

L'éolienne est constituée essentiellement [3]

- Rotor ;
- Nacelle ;
- Multiplicateur ;
- L'anémomètre ;
- Génératrice ;
- Le système d'orientation ;
- Mat.

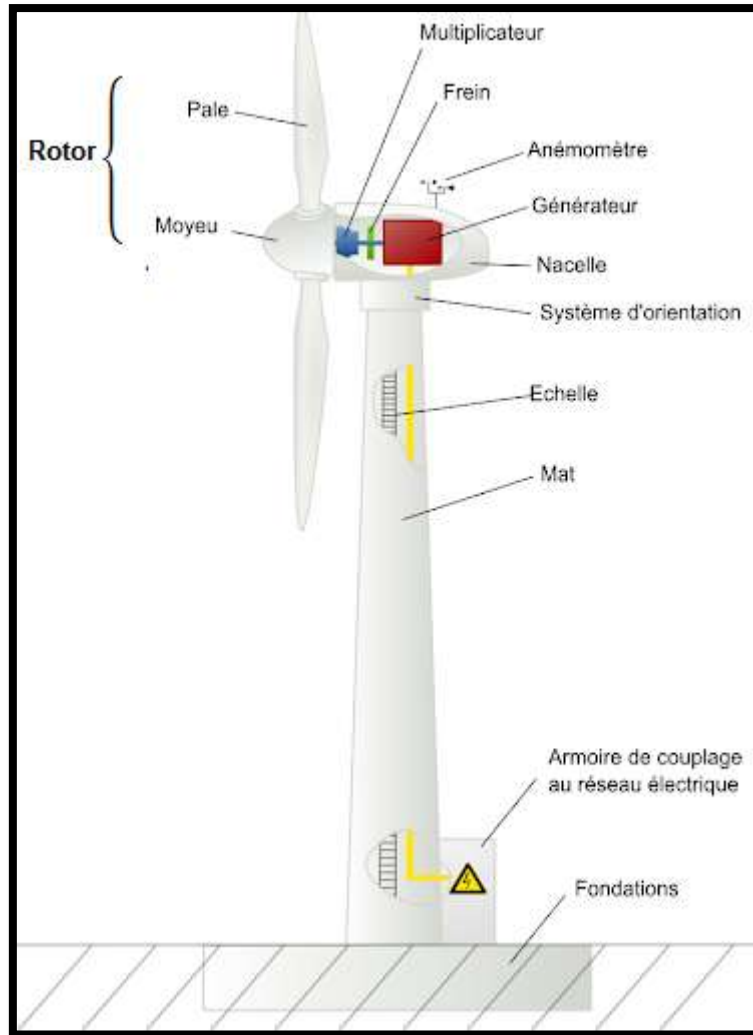


Figure 1.1 : Constitution d'une éolienne.

a. Rotor

L'utilisation de rotor à trois pales est prédominante dans l'ensemble des machines de moyenne et grande puissance (> 30 kW), exploitées ou construites dans le monde soit environ 85 % du marché. En termes de poids, un éolien monopole doit être muni d'une masse inerte permettant l'équilibrage de la pale : elle est donc sensiblement équivalente à une machine bipale. Dynamiquement, la configuration tripale est la plus équilibrée. Elle doit cependant accepter un chargement cyclique plus important. Aéro-dynamiquement, les études montrent un léger avantage à posséder plusieurs pales (réduction des pertes d'extrémités). On augmente ainsi le coefficient de puissance d'environ 10 % en passant d'une pale à deux, de 3 % en passant de deux à trois, de 1 % en passant de trois à quatre, etc. Le choix résulte

donc d'un compromis entre l'efficacité aérodynamique du rotor, le poids, la dynamique des structures et le prix associé.

b. Nacelle

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque différent du frein aérodynamique qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la girouette (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [4].

c. Multiplicateur

Appelé aussi transmission, Il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques. La boîte de vitesse permet d'avoir un rotor tournant lentement (30 à 40 tours/min) pouvant se coupler à un générateur de série, donc peu cher, qui tourne 40 à 50 fois plus vite. Dans les pays froids on doit réchauffer ces grosses boîtes d'engrenages. [5].

d. L'anémomètre

Ce composant indique la direction du vent. L'information est transmise au système d'orientation via un système de contrôle électronique.

e. Génératrice

La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Dans notre cas c'est une génératrice asynchrone à cage d'écureuil [5].

f. Le Système D'orientation

Il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.

g. Mat

C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation de puissances nominales des éoliennes, le mât doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur) et permettre l'utilisation de pales plus longues. Le mât a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle [4] [5].

I.1.2. Principe De Fonctionnement

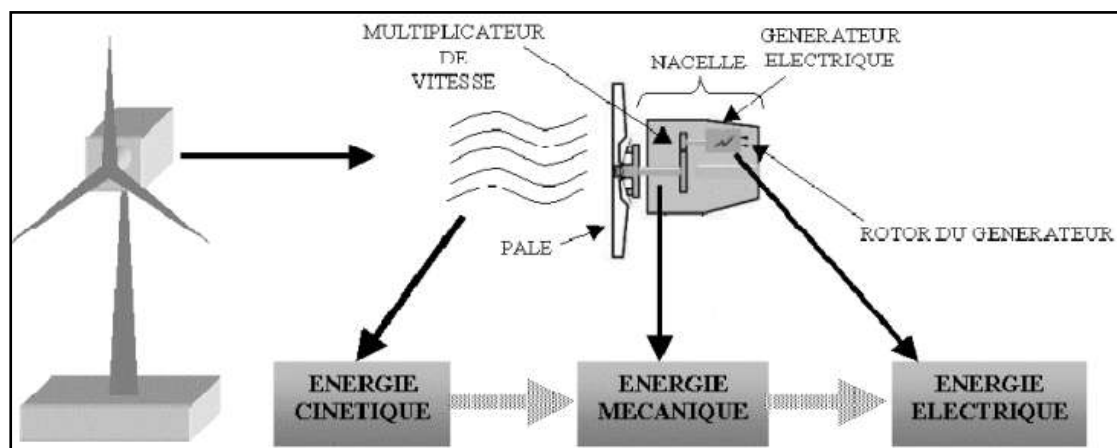


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [4].

I.2. PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DES SYSTEMES EOLIENS :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître et les éoliennes à axe horizontal qui, elles-mêmes, se divisent en deux types sont :

- les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage.
- les éoliennes rapides à axe horizontal utilisées dans la production de l'énergie électrique.

I.2.1. Eolienne A Axe Verticale

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

Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.4).

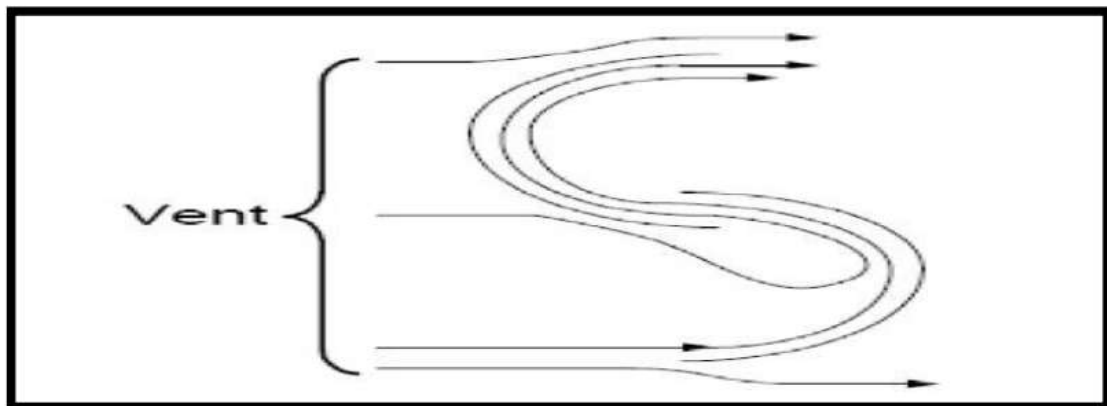


Figure I.3: Eolienne de Savonius.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur 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. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

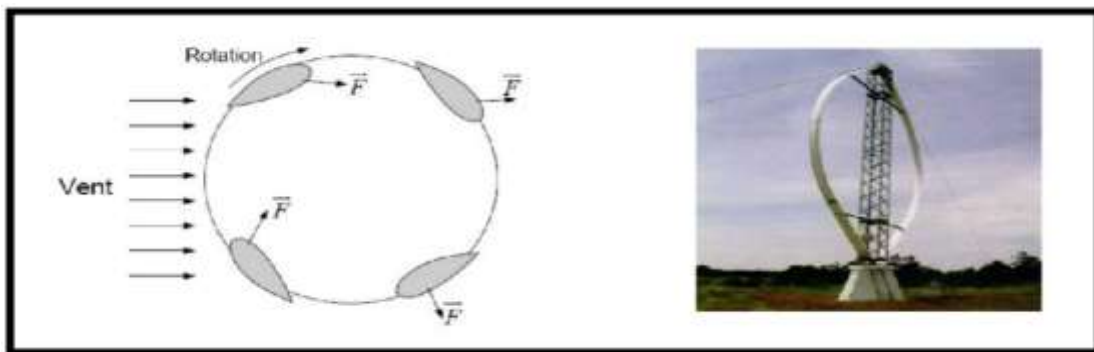


Figure I.4: Eolienne de Darrieus.

A. Avantages [9] :

- Intégrable au bâtiment, esthétique.
- Système peu bruyant.
- Faible encombrement.
- Pas de contraintes sur la direction du vent.

B.. Inconvénients [9] :

- Faible rendement.
- Masse non négligeable.

I.2.2. Eoliennes A Axe Horizontal :

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol . Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [2].

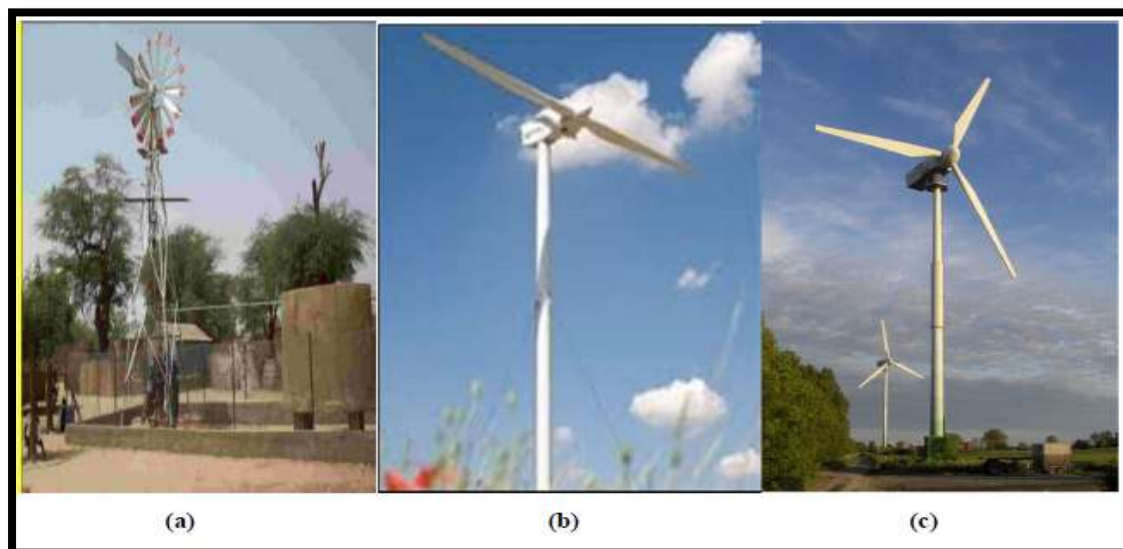


Figure I.5: Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontal : a) Eolienne multiple b) Eolienne horizontale bipale c) Eolienne horizontale tripale [12].

A. Avantages [9]

- Peu de contraintes mécaniques.
- Coût limité.
- Grande efficacité.

- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

B. Inconvénients [9]

- Bruit conséquent,

- Vibrations non négligeables,

- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation.

- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident,

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

I.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

A. Avantages De L'éolien

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.

B. Inconvénients De L'éolien

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.

- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme).
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Pas de crédit d'impôt en 2020 (a été supprimé par la nouvelle réglementation de fin 2015).

I.4. APPLICATIONS DES EOLIENNES :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- soit pour entraîner une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :
- l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...).

I.5. STRATEGIES DE COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

La caractéristique essentielle d'un aérogénérateur est sa courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent au niveau du moyeu, avec comme principale information sa puissance nominale. La figure 27 présente la caractéristique typique d'une éolienne dont les paramètres font l'objet d'une optimisation technico-économiques (V est la vitesse du vent au niveau du moyeu de la turbine). Quatre zones y sont indiquées :

- **Zone I** : la vitesse est inférieure à la vitesse de démarrage V_D , la turbine ne fonctionne pas, il n'y a pas de production d'énergie car au-dessous d'une certaine vitesse de vent car la puissance récupérable est trop faible pour rentabiliser la consommation de base de l'éolienne et son usure ;
- **Zone II** : la vitesse du vent est comprise entre V_D et la vitesse nominale V_n , c'est la zone où l'on recherche à maximiser la récupération d'énergie du vent. Pour cela on va chercher à fonctionner au rendement aérodynamique maximal, la plupart du temps dans le cas des machines modernes, grâce à une vitesse de rotation variable proportionnelle à la vitesse du vent pour une portance optimisée des pales, de façon à ce que λ soit à sa valeur optimale quelle que soit la vitesse du vent ;
- **Zone III** : à la vitesse nominale V_n , la puissance nominale P_n est atteinte et on considère que pour les vitesses de vent supérieures, il n'est pas rentable de récupérer toute la puissance aérodynamique disponible car ces vents n'ont pas une fréquence d'occurrence suffisante eu-égard au surcoût de dimensionnement (puissance chaîne de conversion, résistance mécanique des structures...) qui serait requis pour assurer cette conversion. C'est pourquoi, dans cette zone, on écrête la puissance mécanique en réduisant la portance des pales jusqu'à la vitesse de vent maximale exploitable par l'éolienne V_M ;
- **Zone IV** : au-delà d'une vitesse du vent V_M , la turbine est

arrêtée et la portance des pales est annulée (mise en drapeau des pales) pour protéger la mécanique de l'éolienne.

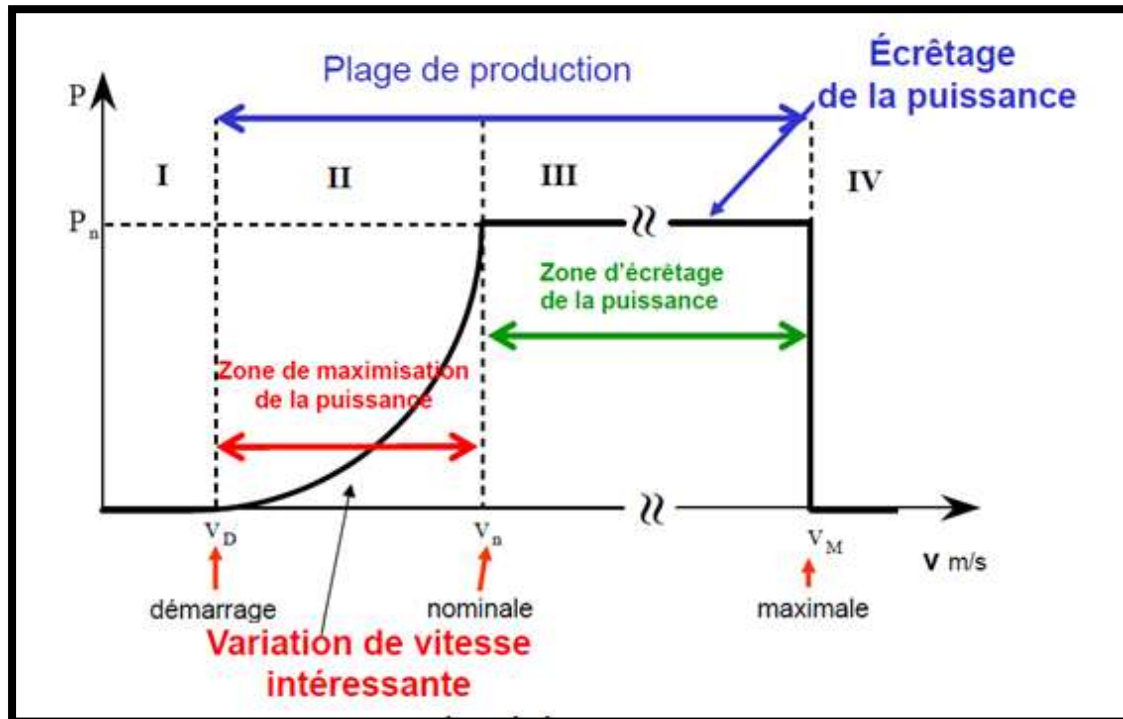


Figure I.6 : Courbe typique de puissance récupérée $P(v)$ en fonction de la vitesse du vent (composante normale au plan de rotation et au niveau du moyeu de la turbine)

1.6. ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECANIQUE :

Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome), différentes configurations de connexions au réseau ou à la charge peuvent être adoptées. Dans le paragraphe suivant, nous développerons plus en détail les caractéristiques et les performances de chacun de ces deux types de machines dans diverses configurations [11].

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écurieil. C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les

composants d'électronique de puissance et la réduction des prix correspondant qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possible. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance. Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des générateurs asynchrones doublement alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans ce mémoire [13].

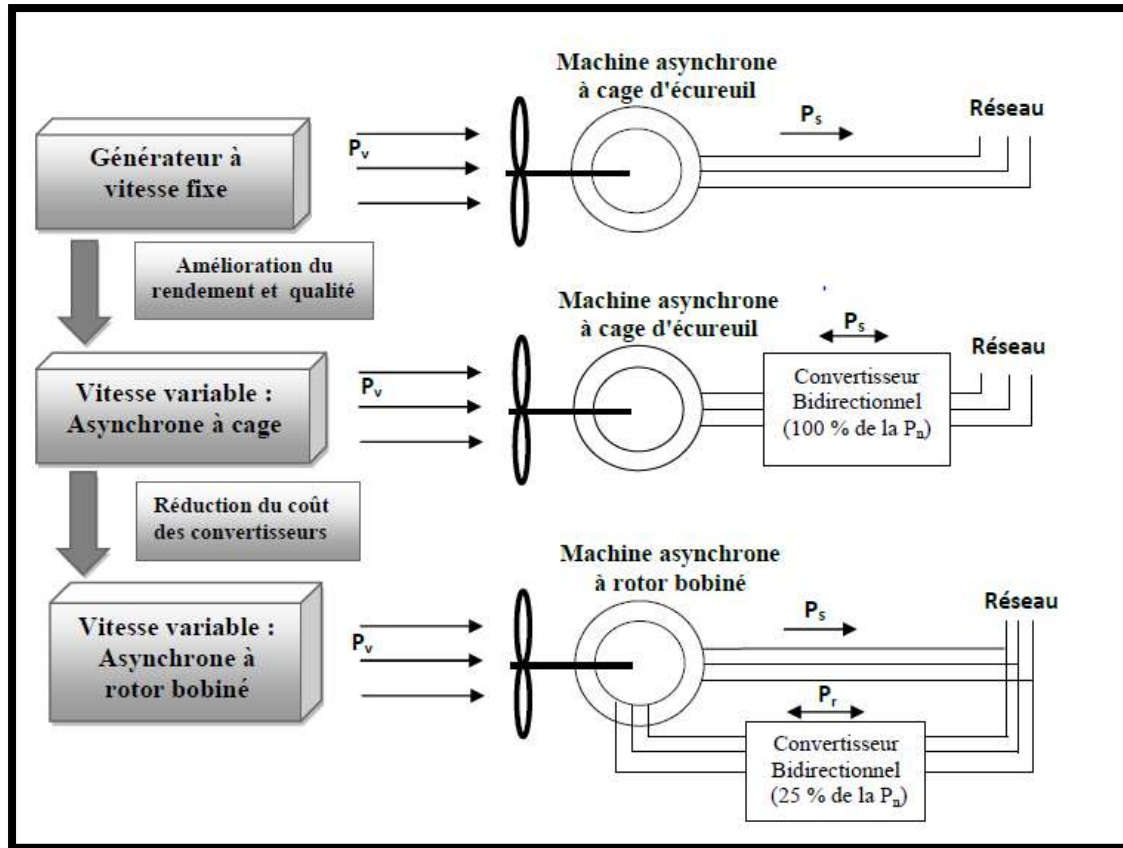


Figure I.7: Evolution de la configuration électrique [11].

1.7. GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE

ALIMENTATION :

1.7.1 Description De La Machine Asynchrone A Double Alimentation:

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer des enroulements décalés de 120° dans l'espace. Son rotor n'est par contre plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [14].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de

puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction.

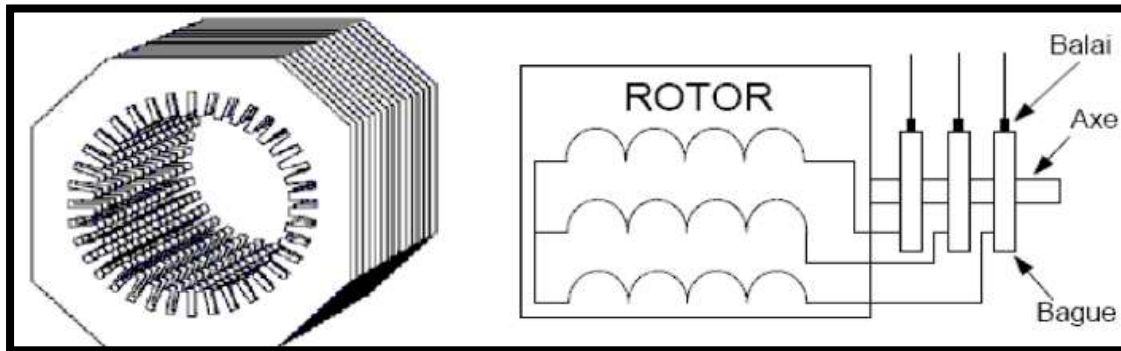


Figure I.8 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.

1.7.2. Mode De Fonctionnement De MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [5].

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement.

1.7.2.1 Fonctionnement En Mode Moteur Hyposynchrone:

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor.

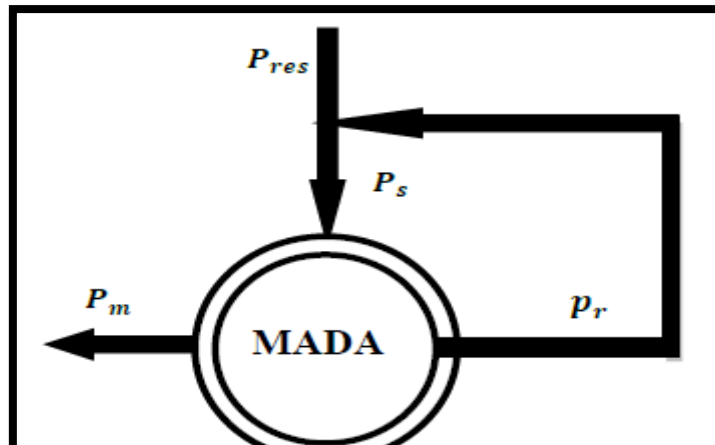


Figure I.9 : Le fonctionnement en mode moteur hyposynchrone .

1.7.2.2 Fonctionnement En Mode Moteur Hypersynchrone:

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

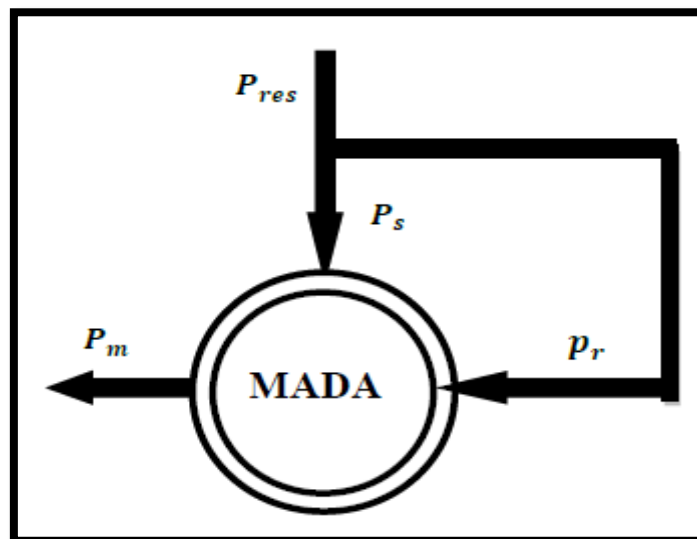


Figure I.10 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

1.7.2.3 Fonctionnement En Mode Génératrice Hypo Synchrone:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.

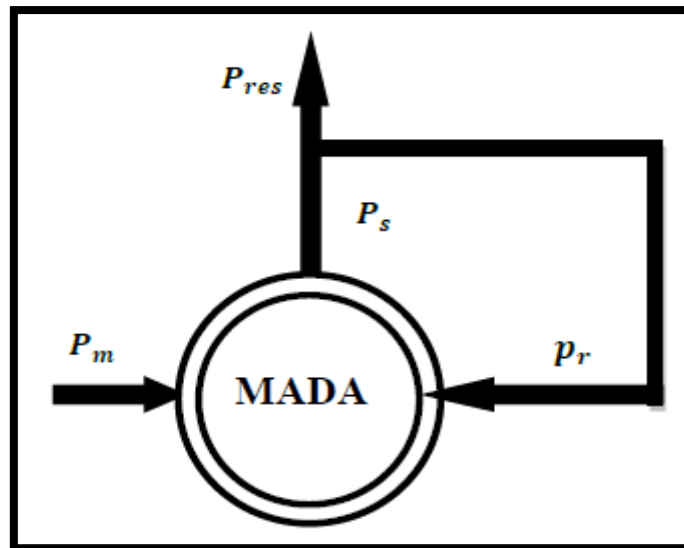


Figure I.11: Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

1.7.2.4 Fonctionnement En Mode Génératrice Hyper Synchrone:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance

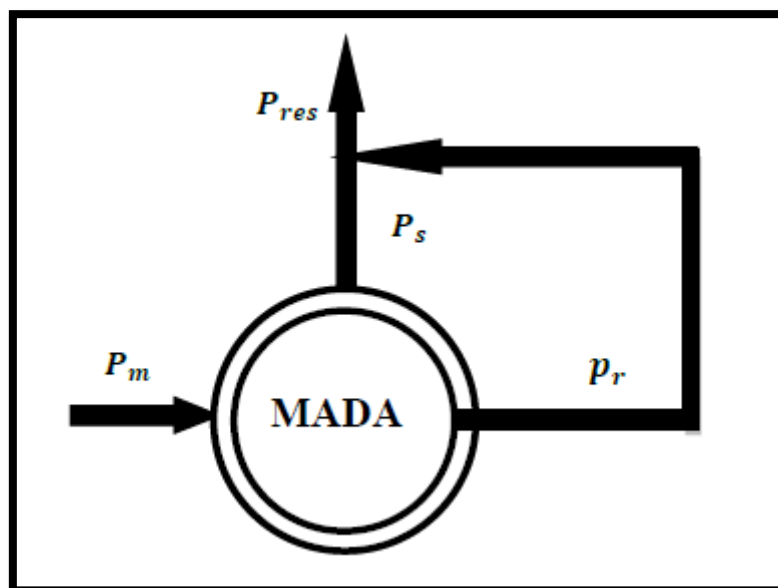


Figure I.12 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

Pour l'application dans un système éolien, le mode de fonctionnement en génératrice est intéressant. En effet, si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas (\pm) 30% en de ça ou au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Il est alors moins volumineux, moins coûteux. Nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins d'harmoniques.

1.8. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA GADA :

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme.

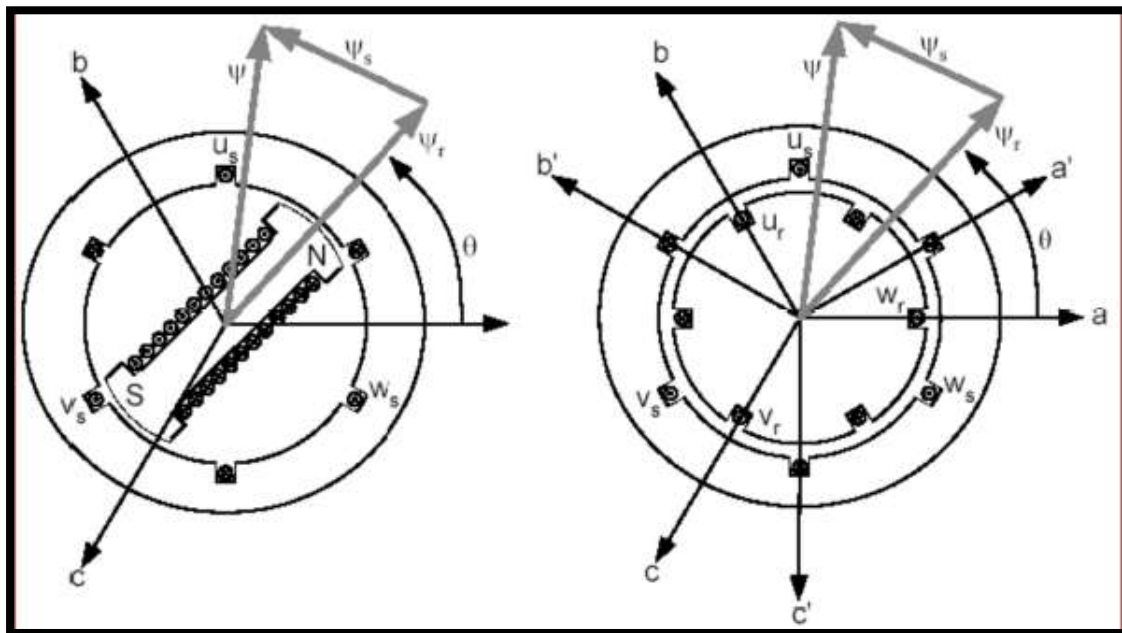


Figure I.13 : Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux ϕ présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques ϕ_s et du flux rotorique ϕ_r qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation

alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotorique φ_r qui a une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système.

Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous [25].

A. Avantages De La MADA :

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
 - Fonctionnement à vitesse de rotation variable.

- Régulation découplée des puissances active et réactive.

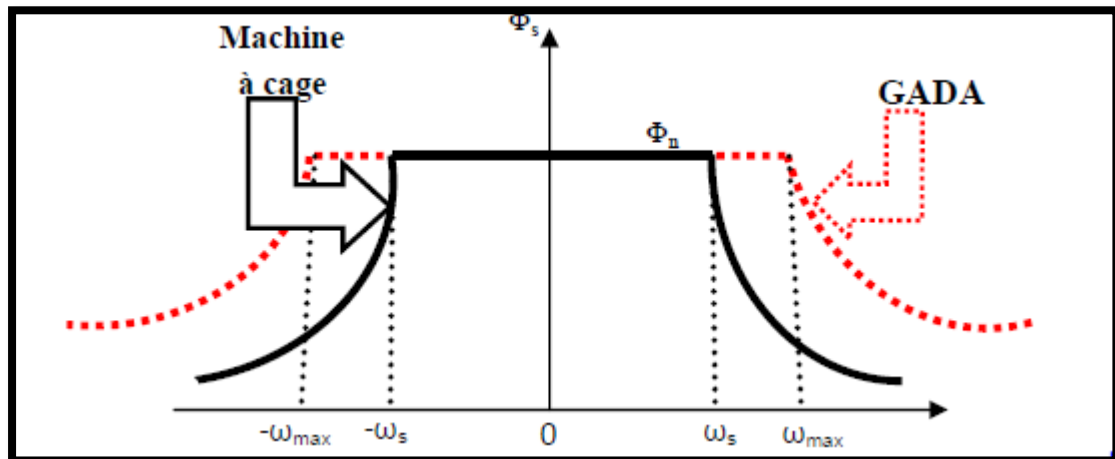


Figure I.14 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA.

B. Inconvénients De La MADA :

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

1.9. APPLICATION DES MACHINES ASYNCHRONES A 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.

1.9.1 Application Moteur :

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 [13] comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

1.9.2 Application Génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la GADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la GADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones 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 de carburant.

❖ Application De La GADA Dans Le Domaine Eolien [08]

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance (Figure 1.16).

La GADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écrêtée en atteignant la puissance nominale de la machine.

Pour les éoliennes utilisant la GADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau),

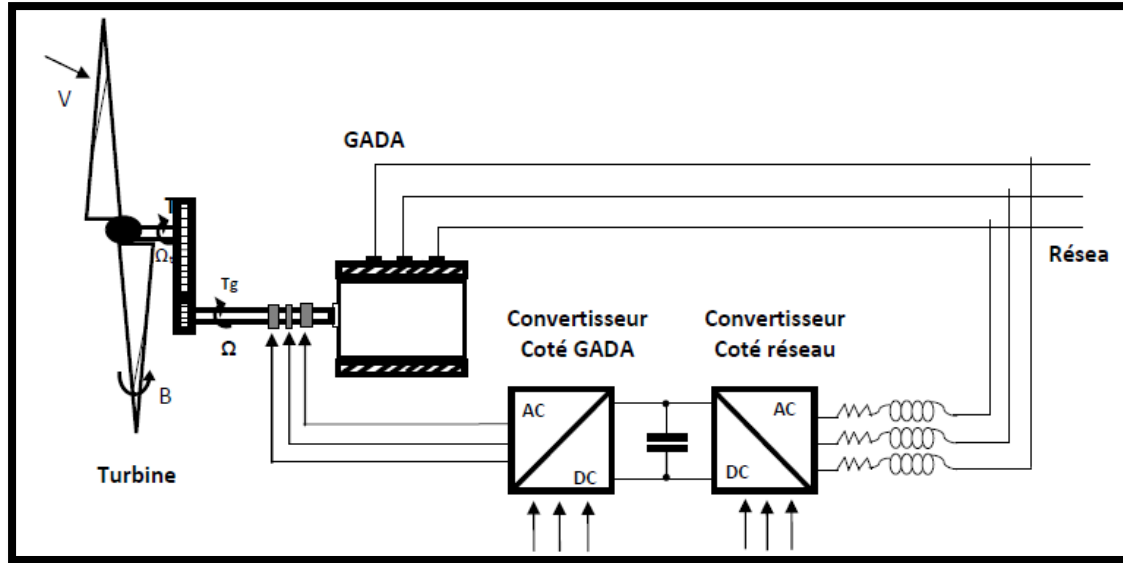


Figure I.15: Eolienne à vitesse variable basée sur une GADA.

I.10. PROBLEMATIQUE

Les problèmes induits par l'intégration des turbines éoliennes dans le réseau électrique sont causés par :

- Leur production aléatoire et difficilement prévisible.
- Une absence de réglage puissance-fréquence.
- Une participation limitée au réglage de la tension pour les éoliennes à vitesse variable, et aucune participation à ce réglage pour les éoliennes dont la génératrice est directement couplé au réseau.
- Une sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent.
- Une sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence ce qui entraîne souvent une déconnexion de la production lors d'incident sur le réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre production-consommation.
- La tendance actuelle est de maintenir la connexion des éoliennes au réseau lors de creux de tension et de variation de fréquence dépassant certaines limites déterminées par le gestionnaire de réseau.

I. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs constitutions. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

Les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs. Les éoliennes à vitesse variables offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. L'éolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée.

Le deuxième chapitre fera l'objet de la modélisation des différentes parties de l'ensemble turbine, génératrice asynchrone à double alimentation d'écureuil, Multiplicateur, convertisseurs de puissance, et le réseau

CHAPITRE II

II. INTRODUCTION

Aujourd'hui, la plupart des systèmes éoliens de grande puissance utilisent les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Celles-ci présentent des avantages déterminant pour la production électrique dans le marché des turbines éoliennes. Dans cette thèse un système de conversion éolienne à base de la MADA comme illustrée dans la (**Figure II.1**), est constitué d'une turbine éolienne à trois pales, une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), un bus continu (DC), deux convertisseurs statiques de puissance, un filtre triphasé et un réseau électrique.

Dans l'architecture ci-dessous, la turbine éolienne à vitesse variable est couplée directement à la GADA, elle est connectée au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu. Dans ce chapitre nous modéliserons et simulerons l'architecture et le fonctionnement de chaque élément indépendamment de l'autre, pour le préparer à la simulation de la chaîne éolienne complète.

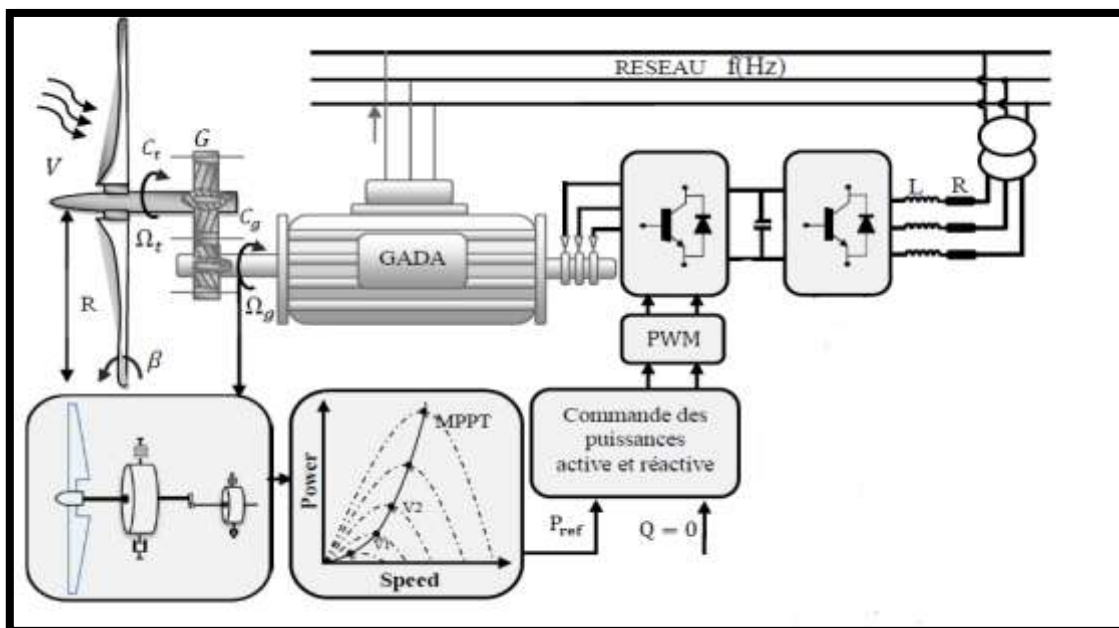


Figure II.1 : Schéma synoptique du système de conversion

II.1. MODELISATION DU VENT :

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [25].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an (saison) concernée par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques

II.1.1. Conversion D'énergie Aérodynamique En Energie Electrique

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique par les pales de la turbine, puis en énergie électrique via un générateur. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx (en m) de section S (en m^2) de masse volumique ρ (en Kg/m^3), animée d'une vitesse v (en m/s), s'écrit comme indiqué dans la (**Figure. II.2**):

$$dE_c = \frac{\rho S dx v^2}{2} \quad (\text{II.1})$$

E_c : En joules.

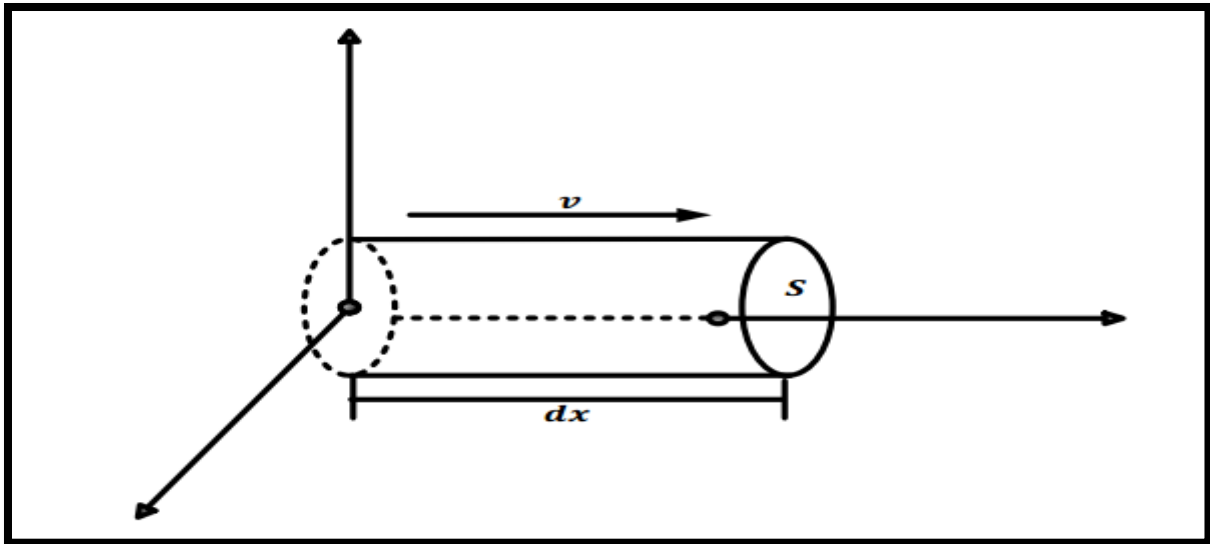


Figure II.2 : Colonne d'air animée d'une vitesse v

II.1.2. Loi De Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [15], [16]. Considérons le système de la figure II.3 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. v_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse v_2 en aval.

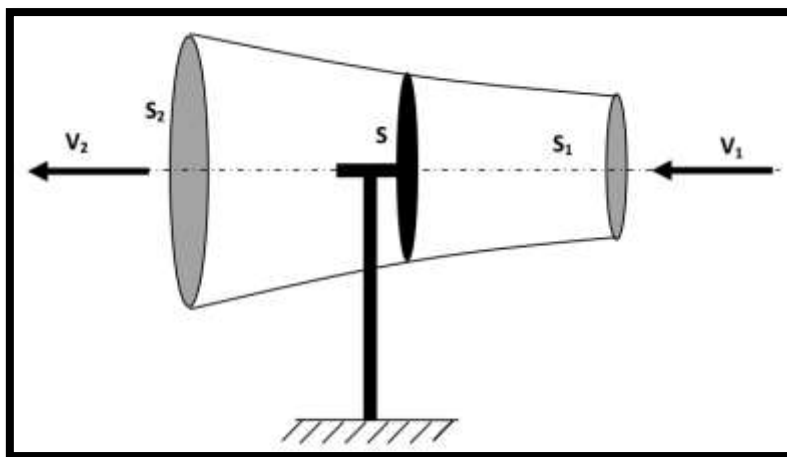


Figure II.3 théorie de Betz : schéma de principe [15]

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor soit égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne v_1 et la vitesse du vent après passage à

travers le rotor v_2 , la masse d'air en mouvement traversant la surface des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont en aval.

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (\text{II.3})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.3) :

$$P_m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (\text{II.4})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $v_2 = 0$ dans l'expression (II.3) :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right)\left(1 - \frac{v_1}{v_2}\right)^2}{2} \quad (\text{II.6})$$

En traçant le ratio des puissances $\left(\frac{P_m}{P_{mt}}\right)$ en fonction du ratio des vitesses $\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$ nous obtenons la courbe illustrée par la (Figure II.4). Ce ratio présente un maximum, c'est la limite de Betz. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance C_p exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent :

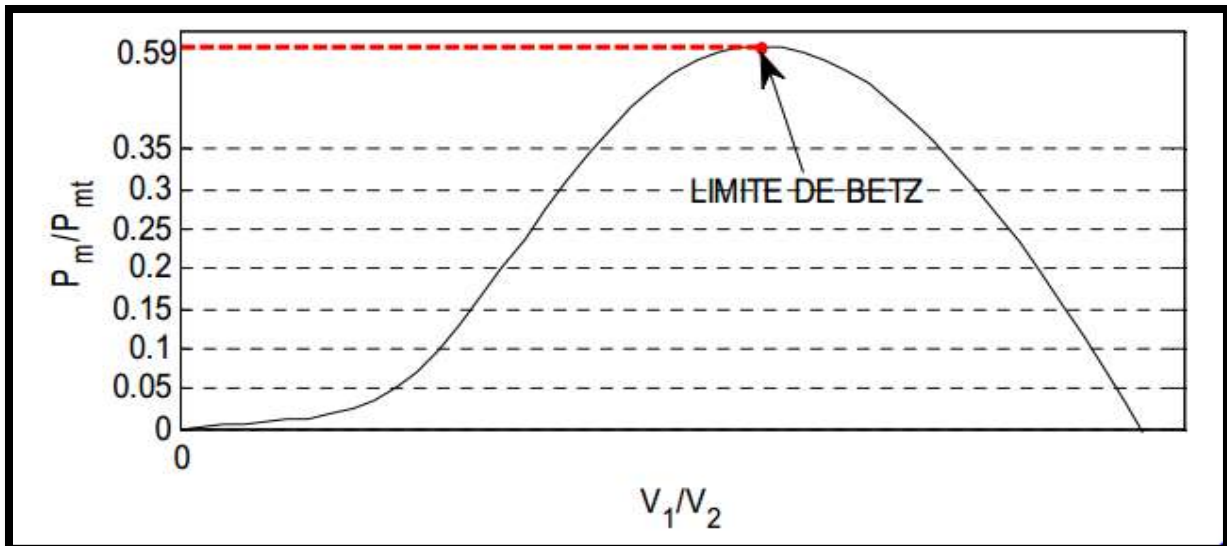


Figure .II.4 : Coefficient de puissance C_p

II.1.3. Le Coefficient De Vitesse Réduite

Malheureusement, pour les éoliennes, le C_p n'est pas constant, les paramètres les plus communes sur lesquelles C_p dépend du coefficient de vitesse réduite (vitesse spécifique) et l'angle de décalage. Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est $R_t \Omega_t$ sur la vitesse instantanée du vent v défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales comme montré dans la (**Figure .II.5**).

$$\text{Alors : } \lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \quad (\text{II.7})$$

Où :

- R_t : Rayon de la surface balayée en m.
- v : Vitesse de vent en m/s.
- Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice en rad/s.

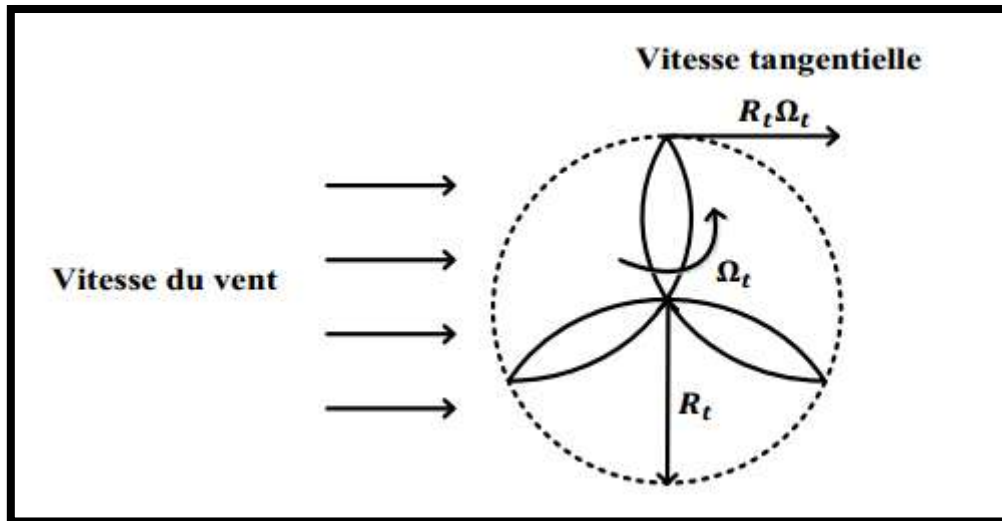


Figure II.5 : Vitesse du vent v et vitesse tangentielle $R_t \Omega_t$

II.1.4. Le Coefficient De Puissance C_p

Comme nous l'avons souligné précédemment, on ne peut pas capter en totalité la puissance fournie par la masse d'air P_{mt} , cela supposerait que la vitesse de vent est nulle après l'organe de capteur. On peut définir le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{P_m}{\frac{\rho S v_1^3}{2}} \quad (\text{II.8})$$

Ainsi, la puissance éolienne extraite est déterminée analytiquement par la formule suivante:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p v^3 \quad (\text{II.19})$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de la vitesse spécifique λ , la valeur maximale théorique possible de la puissance et l'angle décalage β . Ce coefficient de puissance est différent pour chaque éolienne comme indiqué sur la **Figure II.6**, [II.2].

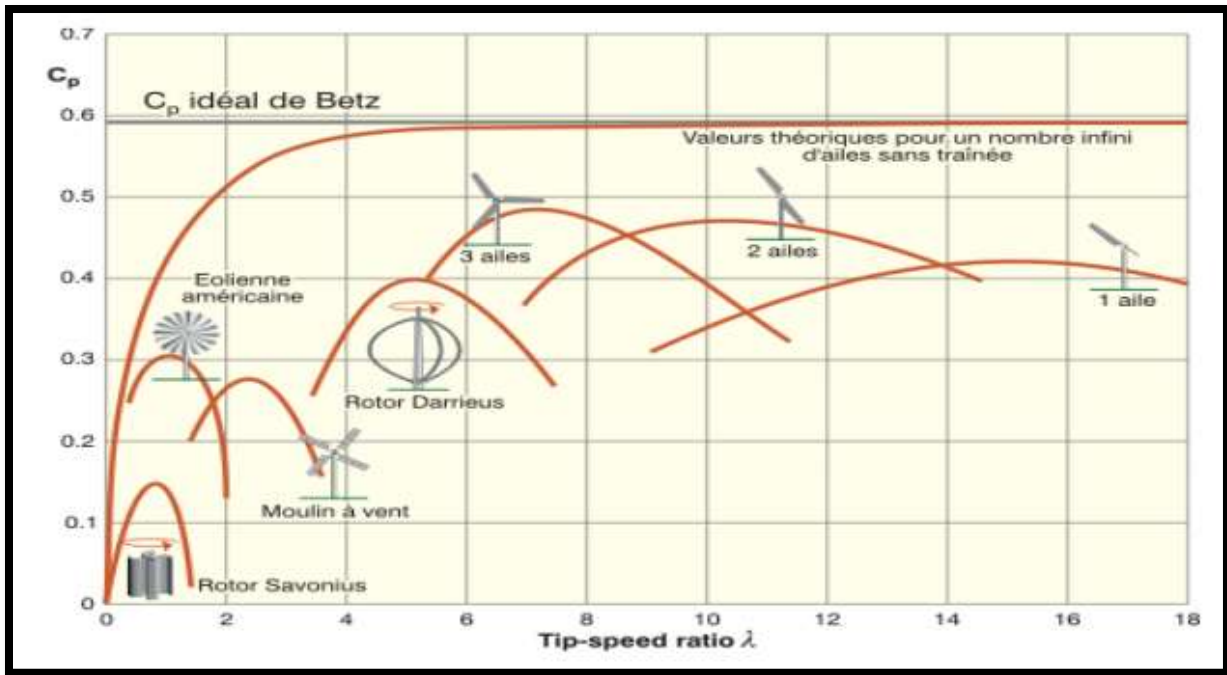


Figure II.6 : Coefficient de puissance pour différents types de turbine éolienne [II.7].

II.1.5. Le Coefficient De Couple C_t

Le coefficient de couple est fort utile afin de calculer la valeur des couples produits pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle. En effet, au démarrage, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales tandis que la puissance est nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle. L'expression du couple est la suivante :

$$T_m = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{P_m R_t}{\lambda} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2 \quad (\text{II.10})$$

Et alors, la valeur du coefficient de couple C_t est déterminée par la formule suivante :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_m}{\frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2} \quad (\text{II.11})$$

Le coefficient C_t s'exprime, comme le coefficient C_p , en fonction de la vitesse du vent v et de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t , donc en fonction du ratio de vitesse λ .

II.1.6. Simulation

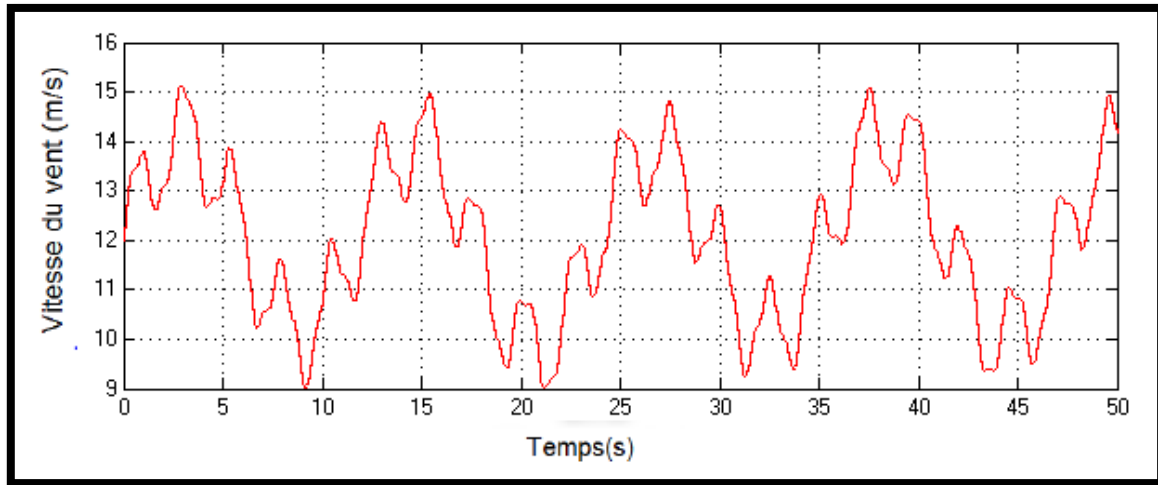


Figure II.7 : Profil du vent appliqué à la turbine.

II.2. MODELISATION DE LA TURBINE

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice (**Figure II.8**) :

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables;
- Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre relie la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur.

La figure ci-dessous représente différentes parties de la turbine :

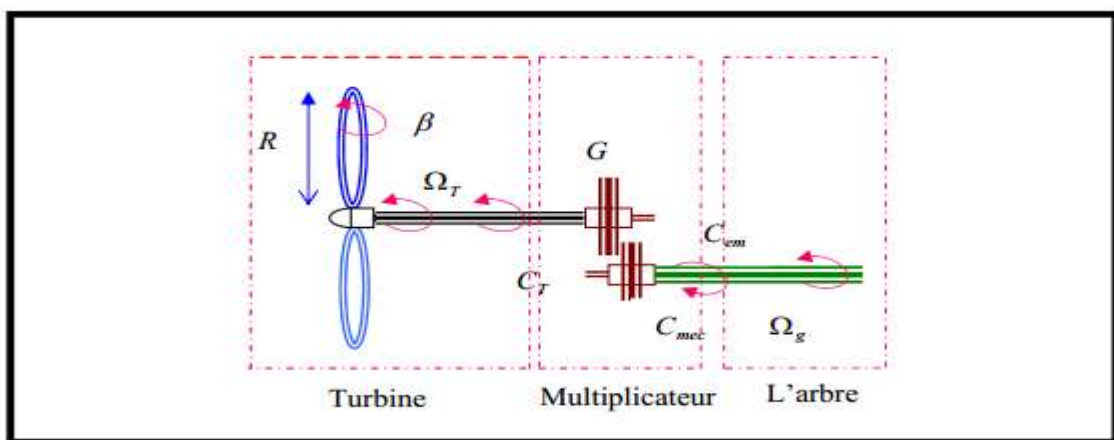


Figure II.8: Différentes parties de la turbine

II.2.1. Modèle De La Turbine

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v \quad (\text{II.12})$$

Où :

- ρ : Est la densité d'air ($\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$).
- S : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle R où $S = \pi R^2$.
- v : Est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent, P_{aero} dépend du coefficient de puissance C_p . Elle est donnée par :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_v \quad (\text{II.13})$$

Où :

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Une approximation par interpolation de l'expression de C_p pour une éolienne réelle d'un angle de calage $\beta = 2^\circ$, donne [28] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \sin \left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18} \right) \quad (\text{II.14})$$

$C_p(\lambda, \beta)$ -le rendement aérodynamique de la turbine appelé souvent coefficient de puissance. C'est un coefficient spécifique à chaque éolienne qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Dans notre étude, le coefficient de puissance de la turbine utilisé est donné par l'expression **II. 15**):

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II. 15})$$

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique λ pour que $\beta = 2$, (**Figure II-4**), permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ($C_p = 0.5$) qui correspond aux valeurs optimales $\lambda = 9$ et $\beta = 2$. Avec cette valeur, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale [43].

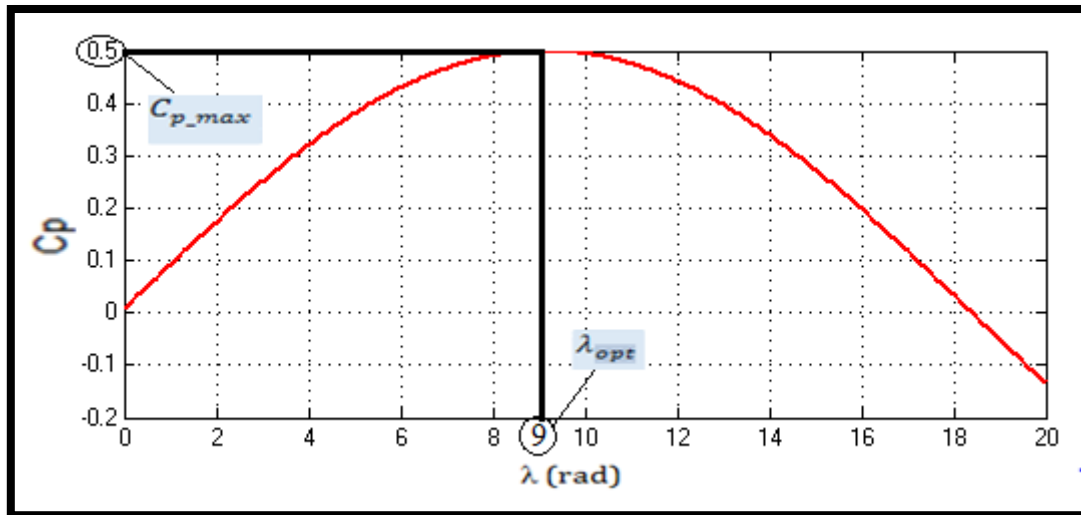


Figure II.9 : Allure du coefficient de puissance pour une éolienne réelle

Le couple aérodynamique est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{\rho S v^3 C_p(\lambda, \beta)}{2 \Omega_t} \quad (\text{II.16})$$

II.2.2. Modèle Du 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:

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.17})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (\text{II.18})$$

- C_g : est le couple de la génératrice.
- Ω_g : est la vitesse de rotation de la génératrice.

II.2.3. Modèle De L'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$J_T \frac{d\Omega_g}{dt} = C_T - f_T \Omega_g \quad (\text{II.19})$$

- J_T : Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m^2).
- f_T : Coefficient de frottement visqueux.
- $C_T = C_{em} + C_{mec}$: Couple totale de l'éolienne (N.m).

- C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

En fonctionnement générateur le couple C_{em} a un signe négatif.

II.2.4. Simulation

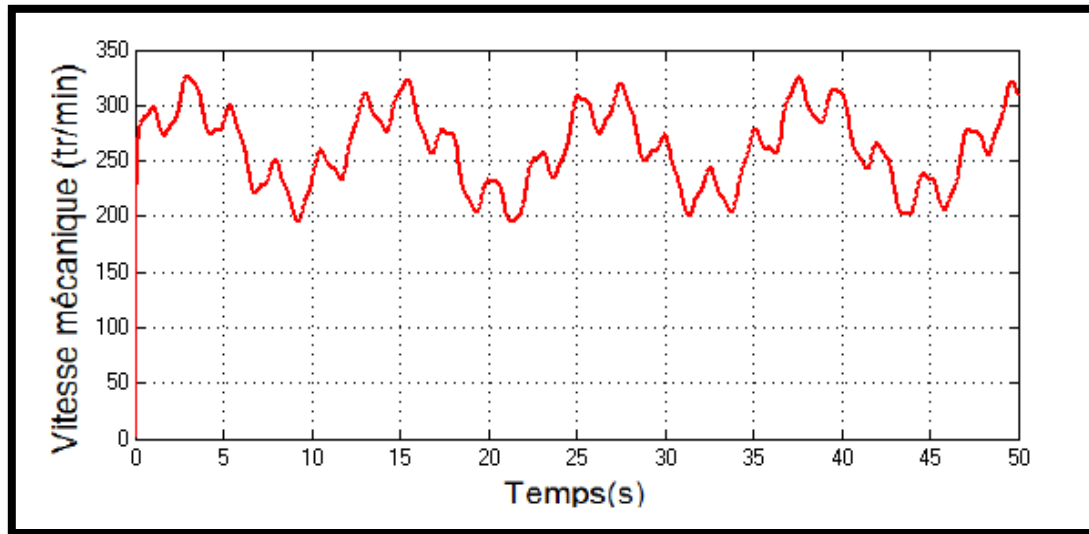


Figure II.10 : Vitesse mécanique

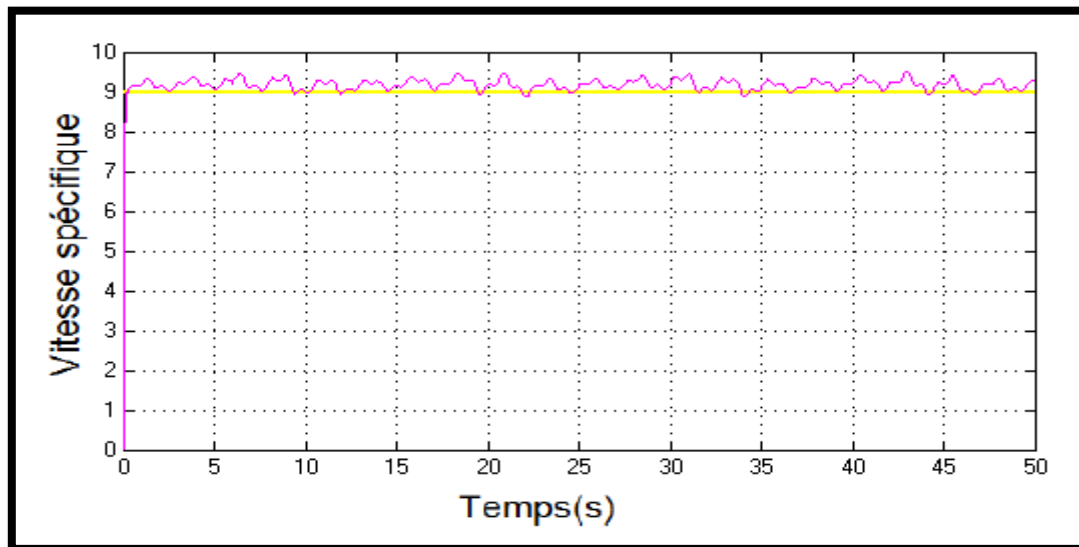


Figure II.11 : coefficient de vitesse réduite (vitesse spécifique) λ .

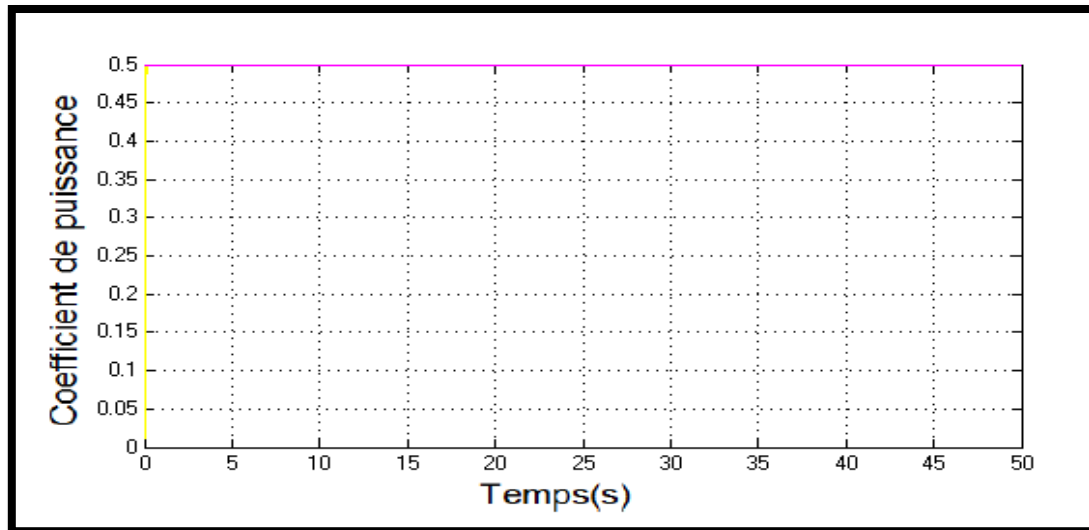


Figure II.12 : Coefficient de puissance C_p

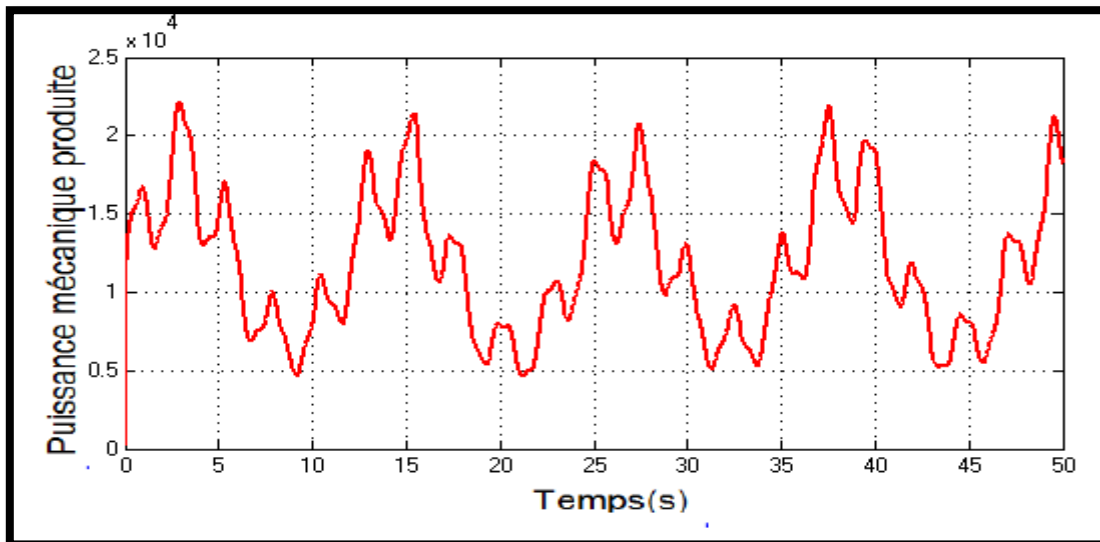


Figure II.13 : Puissance mécanique transmise à la GADA

II.3. MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone double alimentation est un système non linéaire très complexe. Une commande performante sur cette machine, pour ses différents régimes de fonctionnement, nécessite une modélisation mathématique plus précise pour représenter son comportement de manière satisfaisante et réelle.

II.3.1. EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (a, b, c)

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la machine asynchrone à double alimentation est une machine classique dont le rotor est accessible et identique au stator. Par conséquent, elle a le même modèle que celui de la machine asynchrone à cage, à l'exception des tensions rotoriques qui ne sont pas nulles [26, 27, 28, 29].

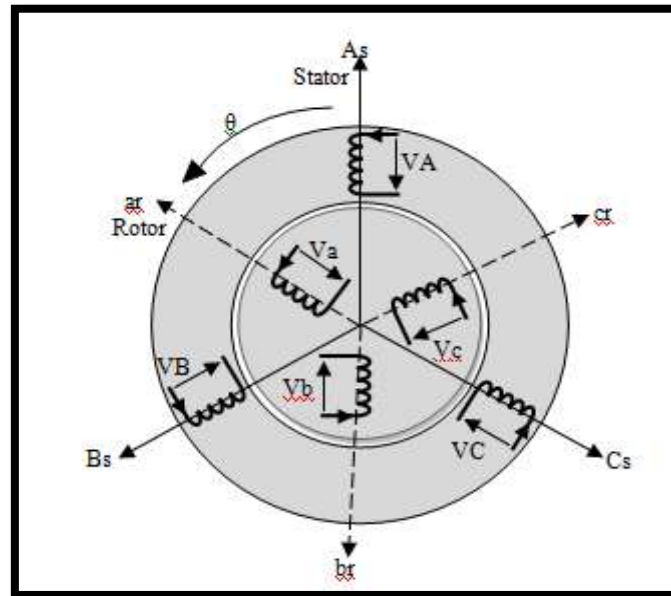


Figure II.14 : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

II.3.1.1. EQUATIONS ELECTRIQUES

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont [30]:

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{I}_s] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\varphi}_s] \\ [\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{I}_r] + \frac{d}{dt} [\boldsymbol{\varphi}_r] \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

Avec :

$$[\mathbf{V}_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{I}_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\boldsymbol{\varphi}_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{V}_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{I}_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\boldsymbol{\varphi}_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

– $\mathbf{V}_s, \mathbf{V}_r$: les tensions simples statoriques et rotoriques.

– $\mathbf{I}_s, \mathbf{I}_r$: les courants de phase statoriques et rotoriques.

- $\boldsymbol{\varphi}_s, \boldsymbol{\varphi}_r$: les flux respectivement statoriques et rotoriques.

II.3.1.2. EQUATIONS MAGNETIQUES

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [\boldsymbol{\varphi}_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\boldsymbol{\varphi}_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

Avec :

$$[\mathbf{L}_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [\mathbf{L}_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où

- $\mathbf{L}_{ss}, \mathbf{L}_{rr}$: sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
- $\mathbf{M}_s, \mathbf{M}_r$: les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.
- $[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}]^T$: la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule (II. 24):

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}]^T = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 22})$$

- M_{max} : est l'inductance mutuelle maximum entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.21) dans (II.20), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r]] \\ [\mathbf{V}_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s]] \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

II.3.1.3.EQUATION MECANIQUE

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

$$C_{em} = C_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (\text{II. 24})$$

Avec :

- \mathbf{C}_{em} : Le couple électromagnétique de la machine;
- \mathbf{C}_r : Le couple résistant;
- f_r : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA;
- Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA;
- \mathbf{J} : L'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{C}_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (\text{II.25})$$

Où

- p : Le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les équations différentielles (II.23), (II.24) et (II.25) représentent le modèle de la MADA dans le repère (a, b, c) .

II.3.2. TRANSFORMATION DE PARK

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif (repère (a, b, c)) à un système biphasé (repère (d, q)), et obtenir un système d'équation à coefficients constants [31, 32, 28, 29].

La matrice de transformation de Park $P(\theta)$ est définie comme suit :

$$[\mathbf{P}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$[\mathbf{P}(\theta)]$: Permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé.

θ : L'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park.

II.3.3. EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (d, q)

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[x_{dq0}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \Rightarrow [x_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [x_{dq0}]$$

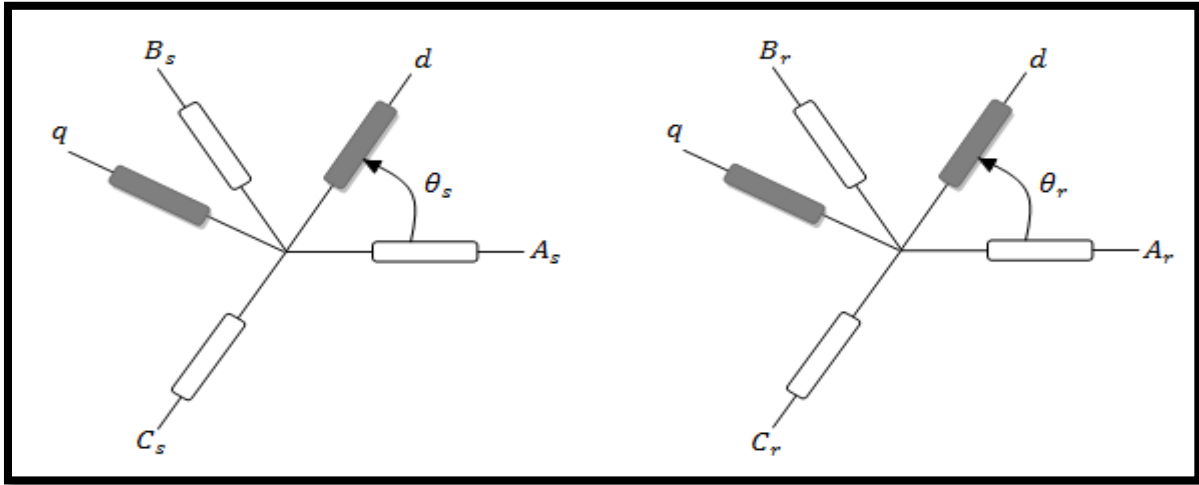


Figure II.15 : Transformation des variables statoriques et rotoriques.

La transformation de Park appliquée aux équations statoriques nous donne:

$$\begin{cases} [V_{sdq0}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{sabc}] \Rightarrow [V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{sdq0}] \\ [I_{sdq0}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{sabc}] \Rightarrow [I_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdq0}] \\ [\varphi_{sdq0}] = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_{sabc}] \Rightarrow [\varphi_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

La transformation de Park appliquée aux équations rotoriques nous donne :

$$\begin{cases} [V_{rdq0}] = [P(\theta_r)] \cdot [V_{rabc}] \Rightarrow [V_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{rdq0}] \\ [I_{rdq0}] = [P(\theta_r)] \cdot [I_{rabc}] \Rightarrow [I_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdq0}] \\ [\varphi_{rdq0}] = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_{rabc}] \Rightarrow [\varphi_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

II.3.3.1. EQUATIONS ELECTRIQUES

En appliquant la transformation de Park dans l'équation (II.22), on obtient :

$$\begin{cases} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{sdq0}] = [R_s] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdq0}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] \\ [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{rdq0}] = [R_r] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdq0}] + \frac{d}{dt} [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

$$\begin{cases} [V_{sdq0}] = [R_s] \cdot [I_{sdq0}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sdq0}] \\ [V_{rdq0}] = [R_r] \cdot [I_{rdq0}] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdq0}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rdq0}] \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_s)]^{-1}] = \frac{d\boldsymbol{\theta}_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_r)]^{-1}] = \frac{d\boldsymbol{\theta}_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Par conséquent, on peut écrire [33, 34, 35, 36, 37]:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ \mathbf{V}_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ \mathbf{V}_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ \mathbf{V}_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

- $\mathbf{V}_{sd}, \mathbf{V}_{sq}, \mathbf{V}_{rd}$ et \mathbf{V}_{rq} : Sont respectivement les tensions directe et en quadrature statoriques rotoriques.
- $\mathbf{I}_{sd}, \mathbf{I}_{sq}, \mathbf{I}_{rd}$ et \mathbf{I}_{rq} : Sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques, rotoriques.
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$ et φ_{rq} : Sont respectivement les flux statoriques et rotoriques directs et en quadratures du système.
- ω_s, ω_r : Sont les pulsations statorique et rotorique.
- $\boldsymbol{\theta}_s, \boldsymbol{\theta}_r$: Sont les angles électriques que forment les axes du stator et du rotor avec l'axe direct du référentiel biphasé de Park.

II.3.3.2. EQUATIONS MAGNETIQUES

De la même manière, les équations des flux sont données par :

$$\begin{cases} [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_s)]^{-1} \cdot [\boldsymbol{\varphi}_{s dq0}] = [L_{ss}] \cdot [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_s)]^{-1} \cdot [I_{s dq0}] + [M_{sr}] \cdot [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_r)]^{-1} \cdot [I_{r dq0}] \\ [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_r)]^{-1} \cdot [\boldsymbol{\varphi}_{r dq0}] = [L_{rr}] \cdot [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_r)]^{-1} \cdot [I_{r dq0}] + [M_{rs}] \cdot [\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta}_s)]^{-1} \cdot [I_{s dq0}] \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

Donc, on peut écrire:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

Avec :

- L_r, L_s : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine;
- M : L'inductance mutuelle.

II.3.3.3 EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II. 34})$$

Avec

- p : Le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances active et réactive statoriques sont:

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

II.3.4. CHOIX DE REPERE DE REFERENCE DE PARK

Le choix d'un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références [38, 39]:

- le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire où : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -w$

Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.

- le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant où : $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$; $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = w$. Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

- le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone où : $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} = w_s = w_r + w$. Dans ce repère, les composantes relatives de

la machine sont constantes, ce qui justifie sa large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

Vu les avantages que représente ce dernier repère de référence, il sera retenu dans notre étude.

II.3.5. MODELE D'ETAT DE LA MADA

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit [40,41, 42].

$$[\dot{\mathbf{X}}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (\text{II. 36})$$

$$\text{avec : } [\mathbf{X}] = [\varphi_{sd} \quad \varphi_{sq} \quad i_{rd} \quad i_{rq}]^t ; \quad [\mathbf{U}] = [v_{sd} \quad v_{sq} \quad v_{rd} \quad v_{rq}]^t ;$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix} ; \quad [B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

– α, β et δ : Sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} ; \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} ; \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s \cdot [A_2] + w_r \cdot [A_3] \quad (\text{II. 37})$$

Telle que :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix}, [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

II.3.6. RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME

La simulation de la machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 4 KW pour les deux modes de fonctionnement moteur et générateur a été exécutée à l'aide du logiciel MATLAB. Son modèle est basé sur les équations obtenues au moyen de la transformation de Park, (repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant). Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous.

❖ En pose $V_r=12v$, l'alimentation du rotor (en vide).

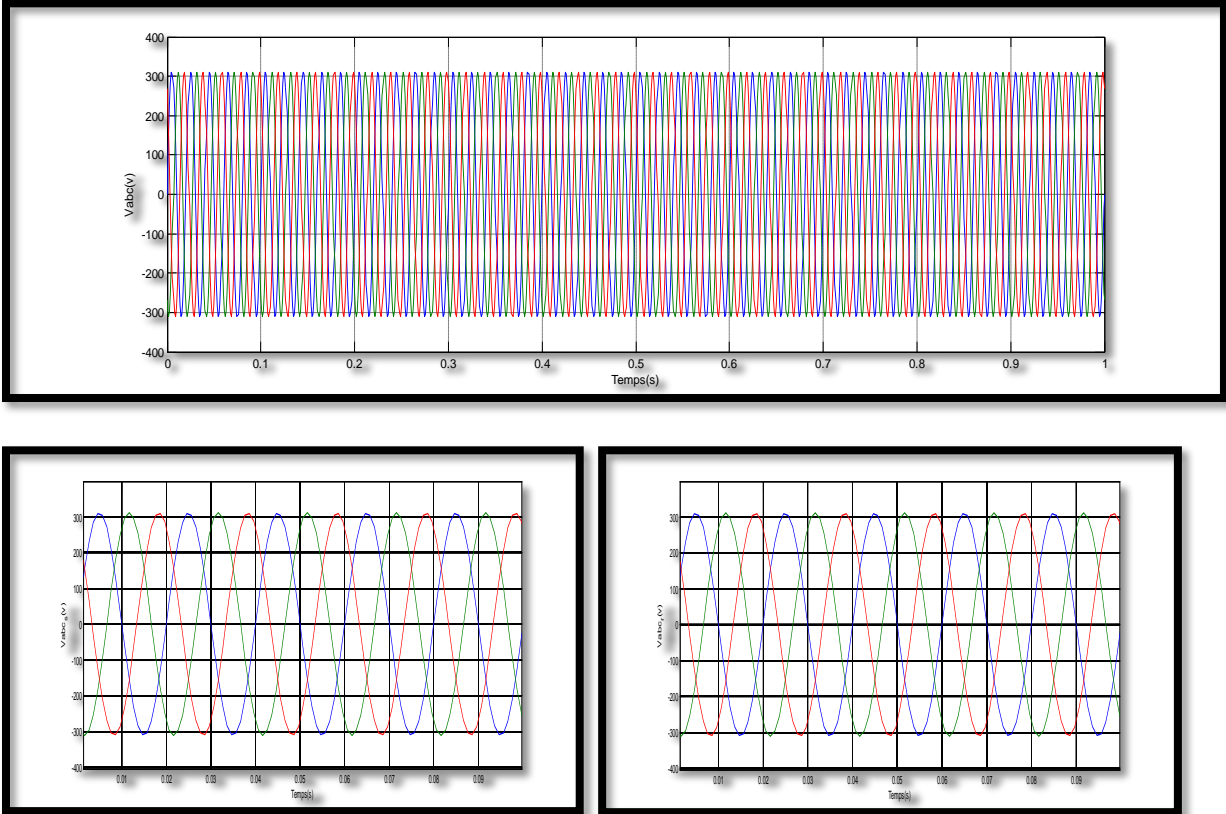


Figure II.16 : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor.

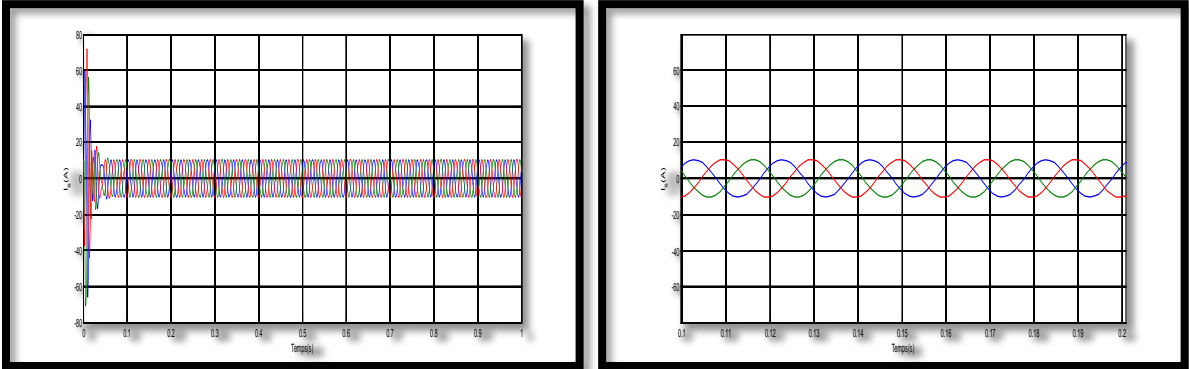


Figure II.17 : Les courants statoriques triphasés avec un zoom.

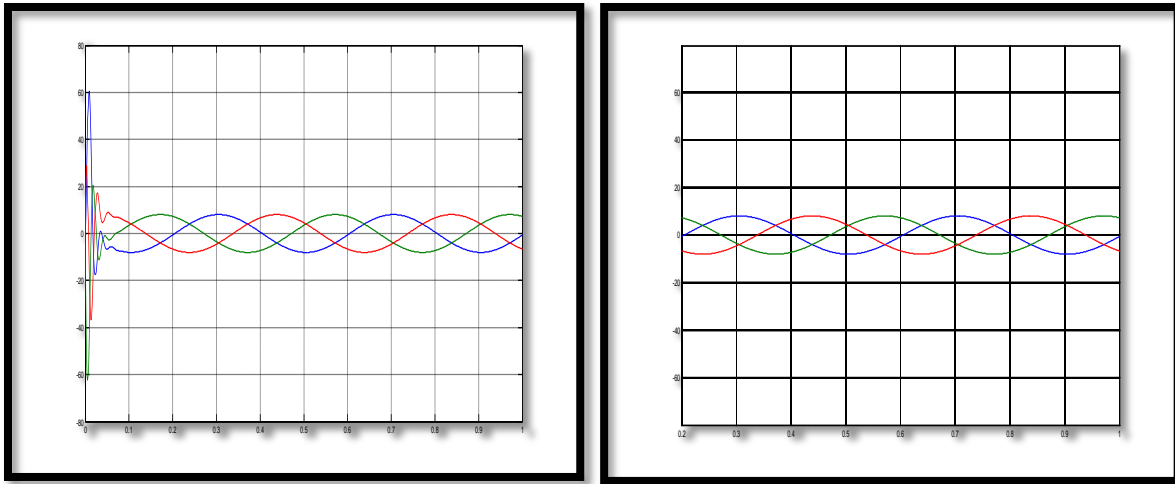


Figure II.18 : Les courants rotoriques triphasés avec un zoom.

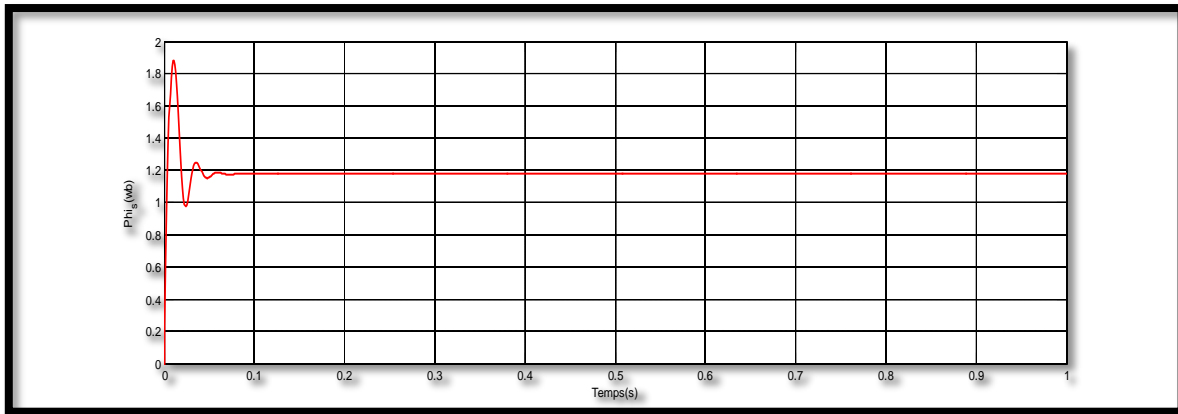


Figure II.19 : Le flux statorique (Wb)

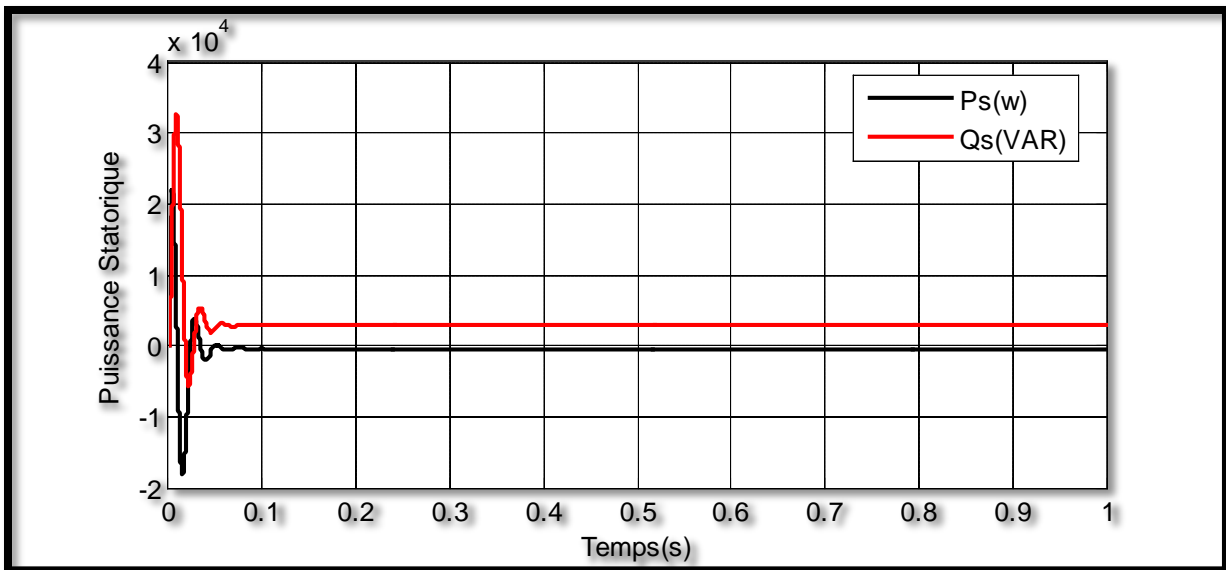


Figure II.20 : La puissance active et réactive statorique.

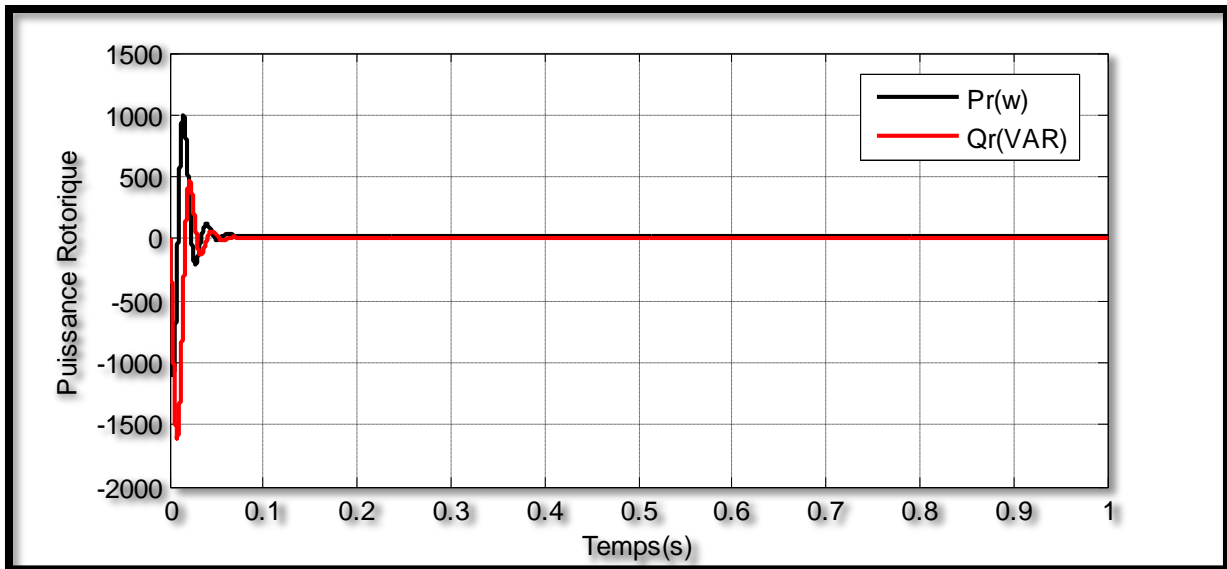


Figure II.21 : La puissance active et réactive rotorique.

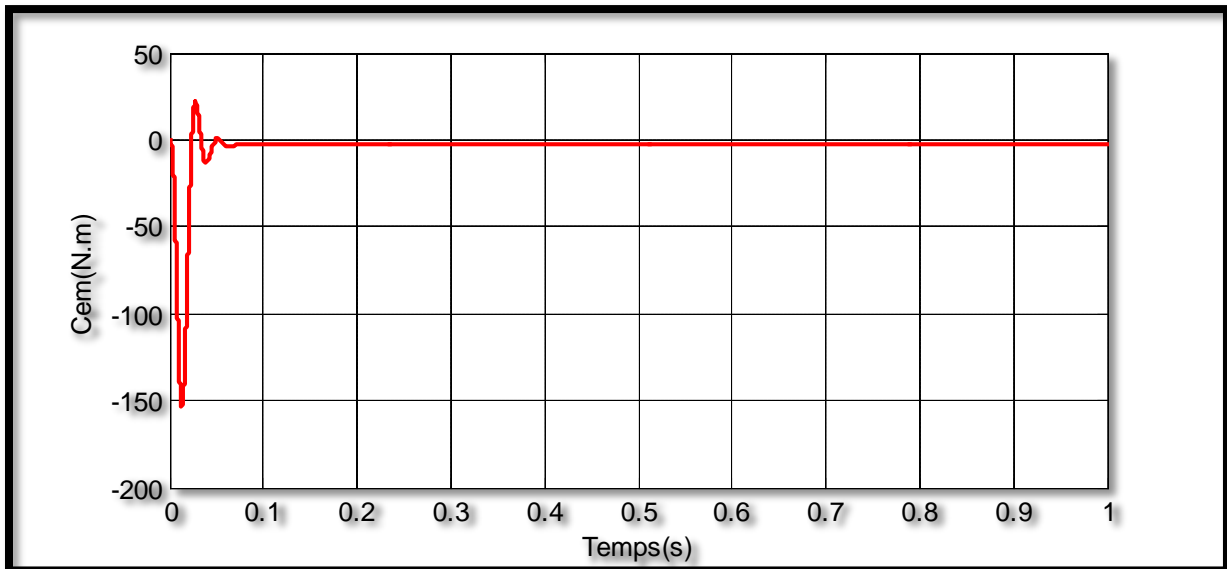


Figure II.22 : Le couple électromécanique (N.m).

II.3.7. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats de simulation montrent que pendant le régime dynamique :

- Lors de démarrage à vide, un fort appel au courant qui est égal à environ 6 fois le courant nominal présenté sous forme d'oscillations successives, qui se stabilisent en régime permanent.
- Le couple est fortement pulsatoire à cause des bruits générés par la partie mécanique. , et il tend vers zéro (charge nulle) au régime permanent.

- Le flux, fait des oscillations de faible amplitude, jusqu'à ce qu'il stabilise a des oscillations sinusoïdales.
- Aussi en remarque pour la puissance, Saut initial (dans 0.01s),qui entra en régime permanent.

II.4. MODELISATION DES CONVERTISSEURS

II.4.1. Redresseur A Trois Phases

Dans cette partie on présentera la modélisation du redresseur à diode. Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative continu (AC/DC), ils sont alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

II.4.1.1. Schéma Symbolique De Redresseur

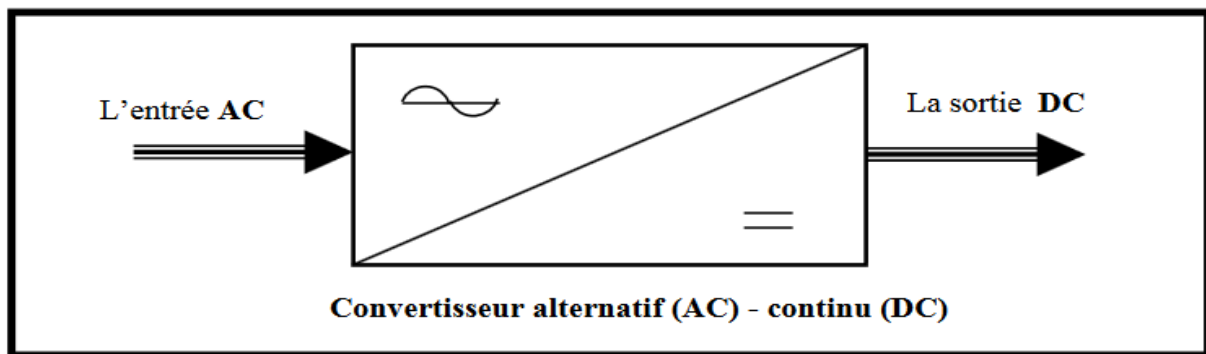


Figure II.23: Schéma de principe de Redresseur

II.4.1.2. SCHEMA BLOK E DE REDRESSEUR

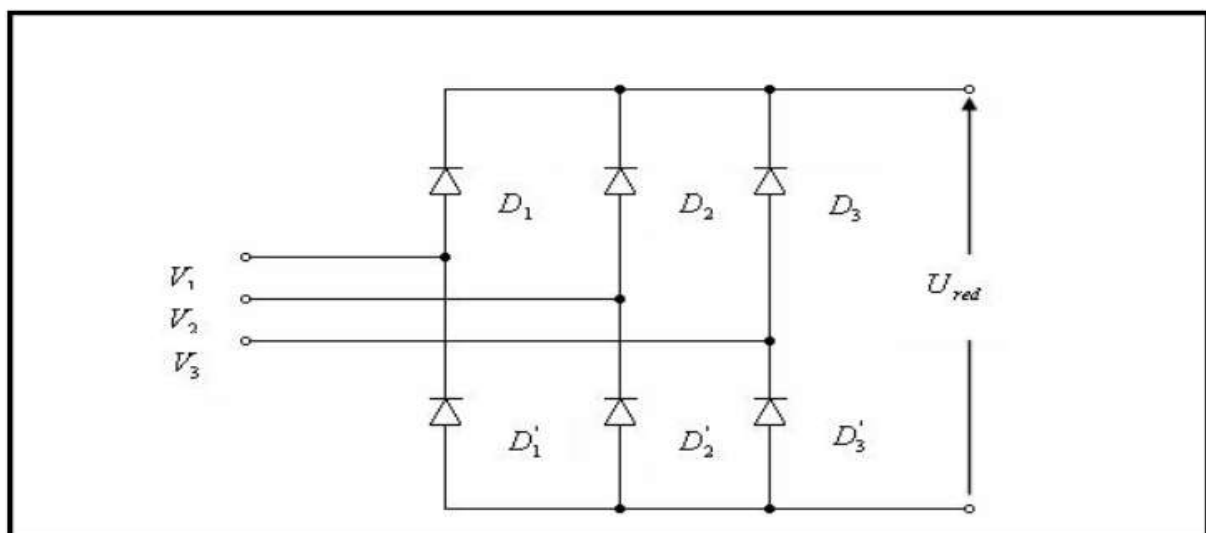
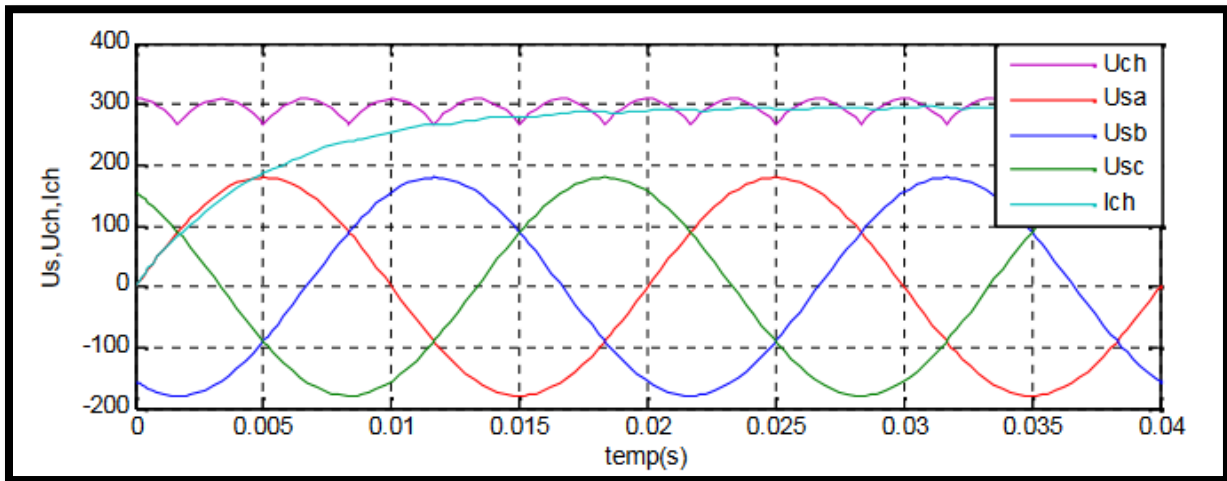
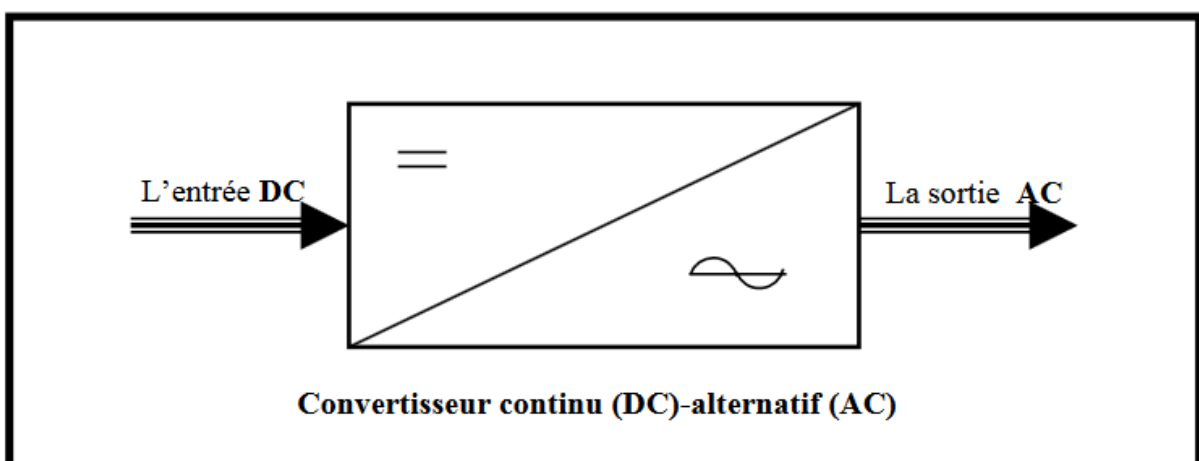


Figure II.24: Redresseur à diode**II.4.1.3. Simulation (Cas Générale)****Figure II.25:** Les tensions de source, Tension de charge et Courant de charge**II.4.2. Onduleur A Trois Phases**

Dans cette partie on présentera la modélisation respectivement de l'onduleur. Un onduleur est un convertisseur statique assurant le convertisseur continu alternatif, alimenté en continu, il modifie la façon périodique les connections entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir d'alternatif à la sortie.

II.4.2.1. Schéma Symbolique De L'onduleur**Figure II.26:** Schéma de principe de l'onduleur

II.4.2.2. Structure De L'onduleur De Tension

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés de l'un ou l'autre, il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases. La **Figure II.26** représente un onduleur triphasés formé de trois demi ponts monophasés et utilisent un diviseur capacitif commun.

Chacune des tensions de sortie est égale tantôt à $(+v/2)$, tantant à $(-u/2)$. Les interrupteurs fonctionnent comme en monophasé la seule différence est que le courant arrivant au point milieu du diviseur est I_N telle que $I_N = I_A + I_B + I_C$

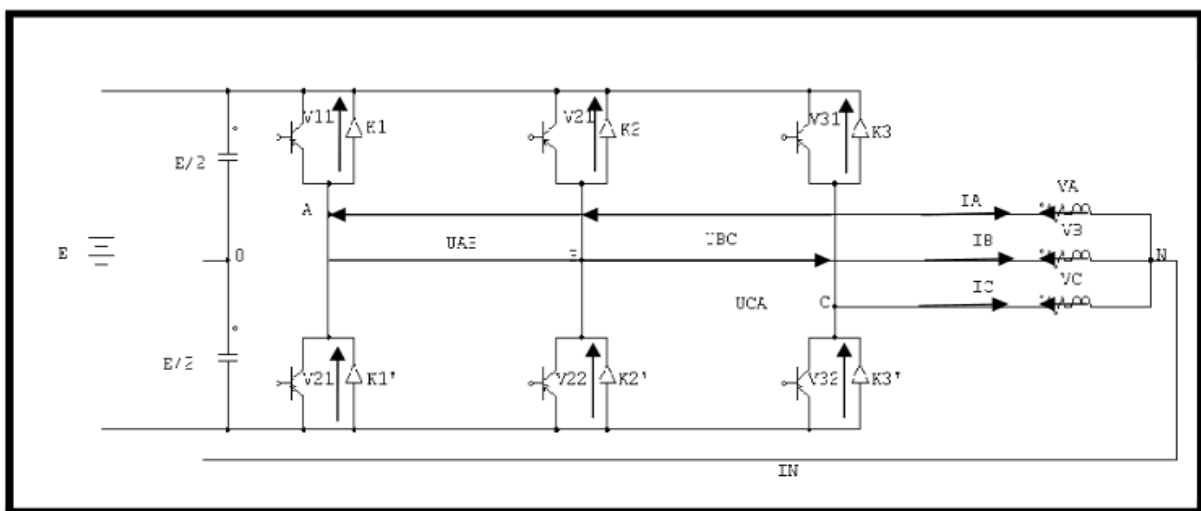


Figure II.27 : Onduleur de tension triphasé

La présence de neutre à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré, tout particulièrement s'il comporte des charges monophasés montées entre phase et neutre.

Si le récepteur triphasé et équilibré, on peut supprimer la liaison entre le point neutre 'N' de la charge et le point milieu 'O' du diviseur capacitif, donc supprimer celui-ci on obtient alors l'onduleur de tension en pont triphasés proprement dit repris sur la **Figure II.26**

II.4.2.3. Modèle De Commande De L'onduleur De Tension

Les interrupteurs K_1 et K'_1 , K_2 et K'_2 , K_3 et K'_3 doivent être complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à adopter, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension.

$$V_A - V_O = \frac{E}{2} \equiv K_1 \text{ fermé, } -\frac{E}{2} \equiv K_1 \text{ ouvert}$$

$$V_B - V_O = \frac{E}{2} \equiv K_2 \text{ fermé, } -\frac{E}{2} \equiv K_2 \text{ ouvert}$$

$$V_C - V_O = \frac{E}{2} \equiv K_3 \text{ fermé, } -\frac{E}{2} \equiv K_3 \text{ ouvert}$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = E \text{ Si } K_1 \text{ fermé et } K_2 \text{ ouvert.}$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \text{ Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermés.}$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = -E \text{ Si } K_1 \text{ ouvert et } K_2 \text{ fermé.}$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \text{ Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ ouverts.}$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_A, V_B et V_C à la sortie de l'onduleur.

Cependant, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_A, I_B et I_C aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, si trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produit impédances 'Z' courant, c'est-à-dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, on ajoute toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions.

$$V_C = \frac{1}{3} \cdot (V_C - V_A) - \frac{1}{3} \cdot (V_B - V_C)$$

A cause de l'équilibre du récepteur:

$$I_A + I_B + I_C = 0 \text{ entraîne } V_A + V_B + V_C = 0$$

On peut donc écrire:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} \cdot (V_A - V_B) - \frac{1}{3} \cdot (V_C - V_A) &= \frac{2}{3} \cdot V_A - \frac{1}{3} \cdot V_B - \frac{1}{3} \cdot V_C \\ &= V_A - \frac{1}{3} \cdot (V_A + V_B + V_C) = V_A \end{aligned}$$

Et

$$V_A = \frac{1}{3} \cdot (V_A - V_B) - \frac{1}{3} \cdot (V_C - V_A)$$

Et de même

$$V_B = \frac{1}{3} \cdot (V_B - V_C) - \frac{1}{3} \cdot (V_A - V_B)$$

On obtient finalement:

$$V_A = \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (V_A - V_O) - (V_B - V_O) - (V_C - V_O)]$$

$$V_B = \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_O) - 2 \cdot (V_B - V_O) - (V_C - V_O)]$$

$$V_C = \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_O) - (V_B - V_O) + 2 \cdot (V_C - V_O)]$$

Si V_{AO} , V_{BO} et V_{CO} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors V_A , V_B et V_C sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeur alternatives), par conséquent, L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice $[T]$ assurant le passage continu-alternatif (DC-AC).

On aura alors:

$$[V_{ABC}] = [T] \cdot [V_{DC}]$$

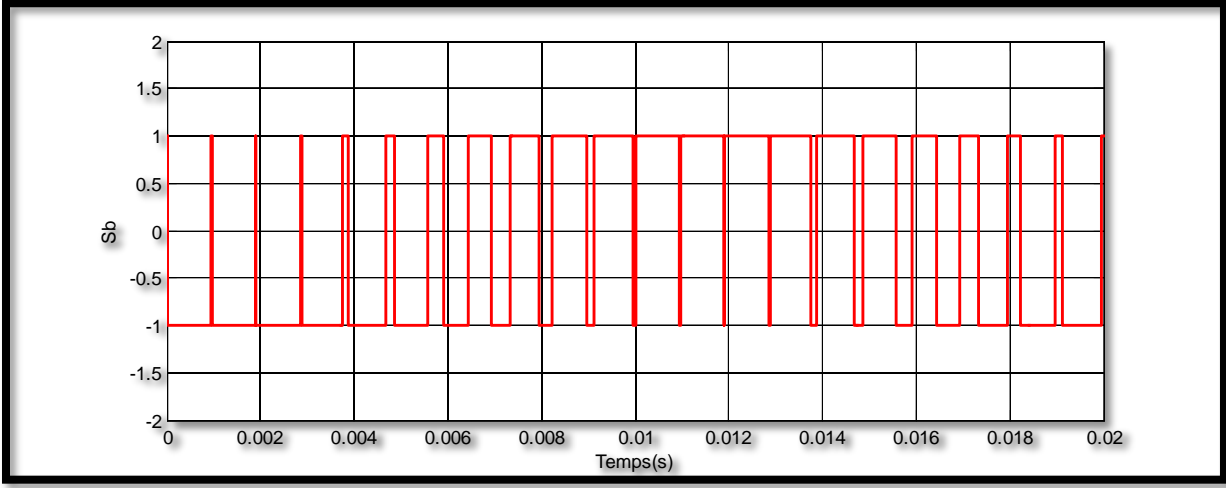
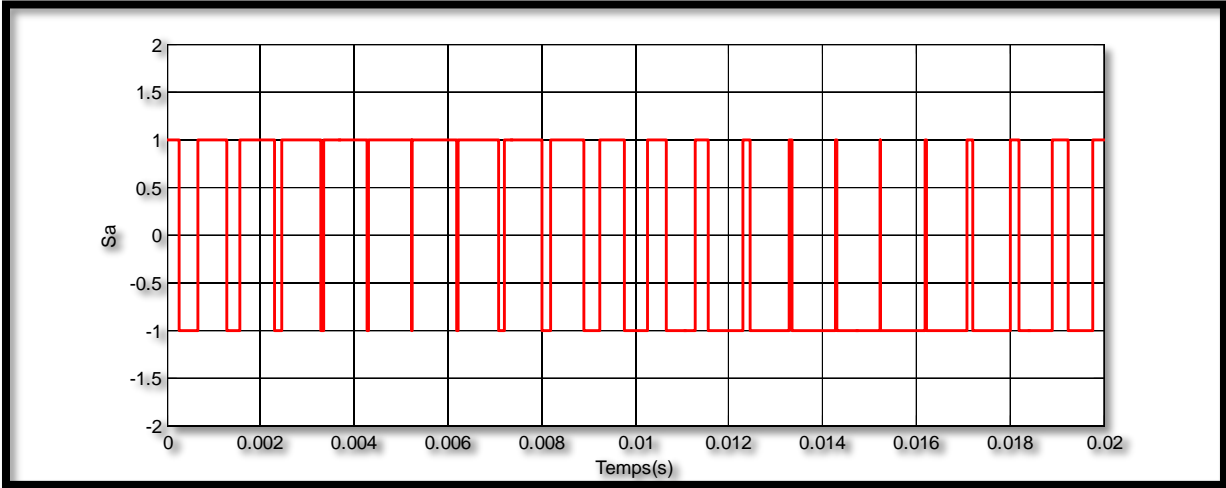
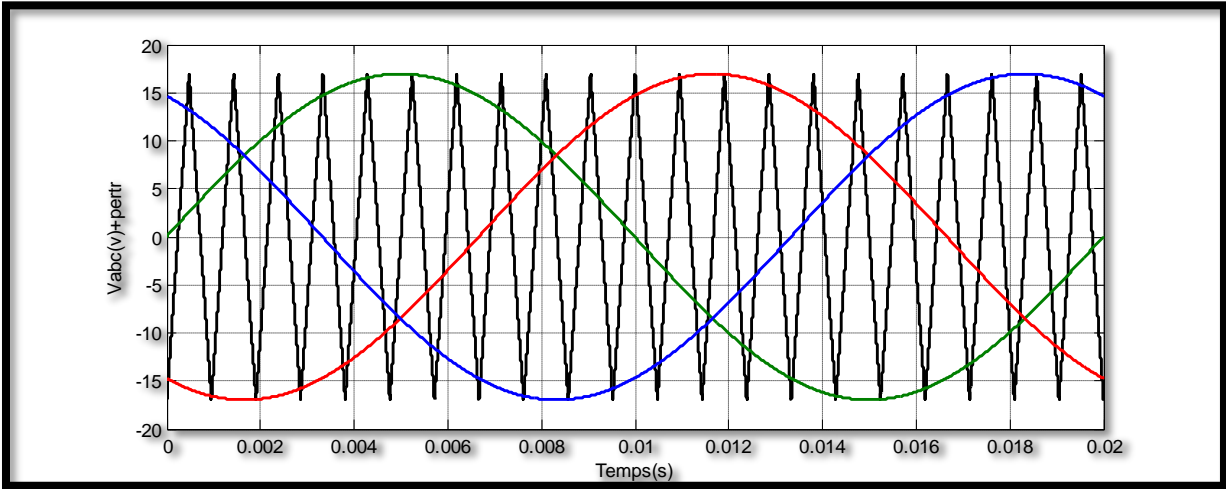
Avec:

$[V_{ABC}] = [V_A V_B V_C]^T$: Tensions alternatifs équilibrées.

$[V_{ABC}] = [V_{AO} V_{BO} V_{CO}]^T$: Tension continues.

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

II.4.2.4. Simulation (L'onduleur Cas Générale)



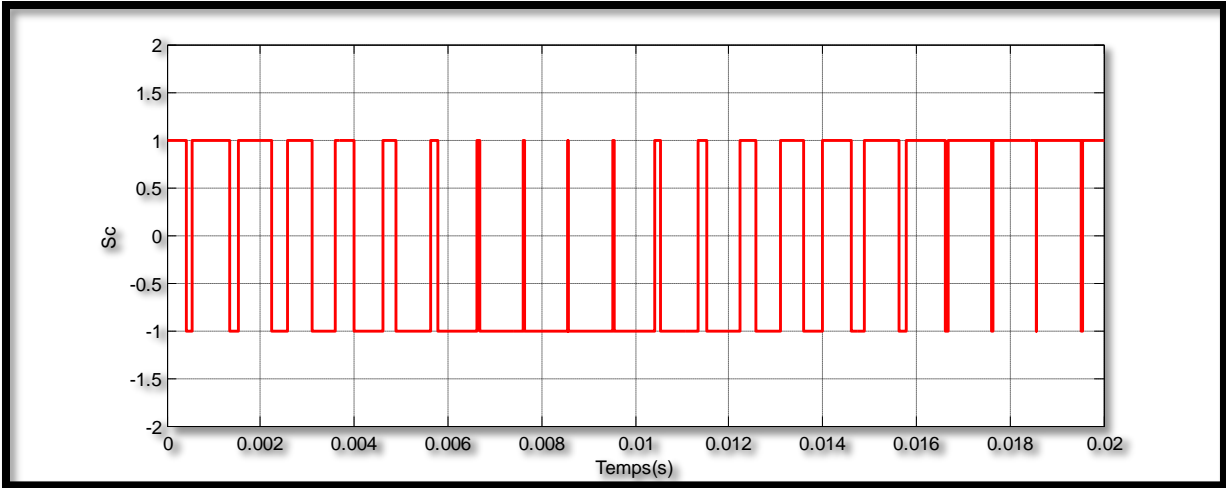
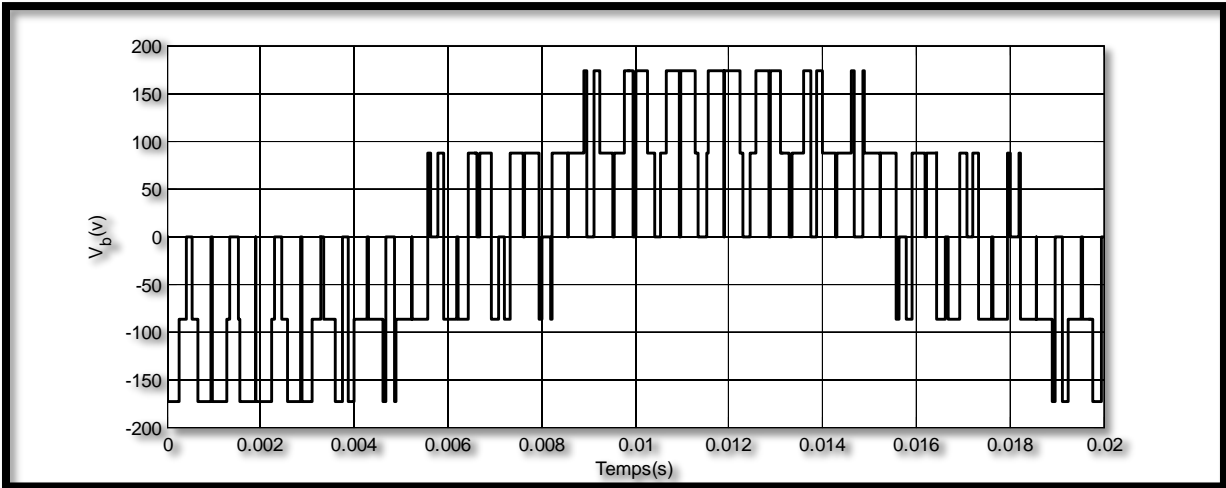
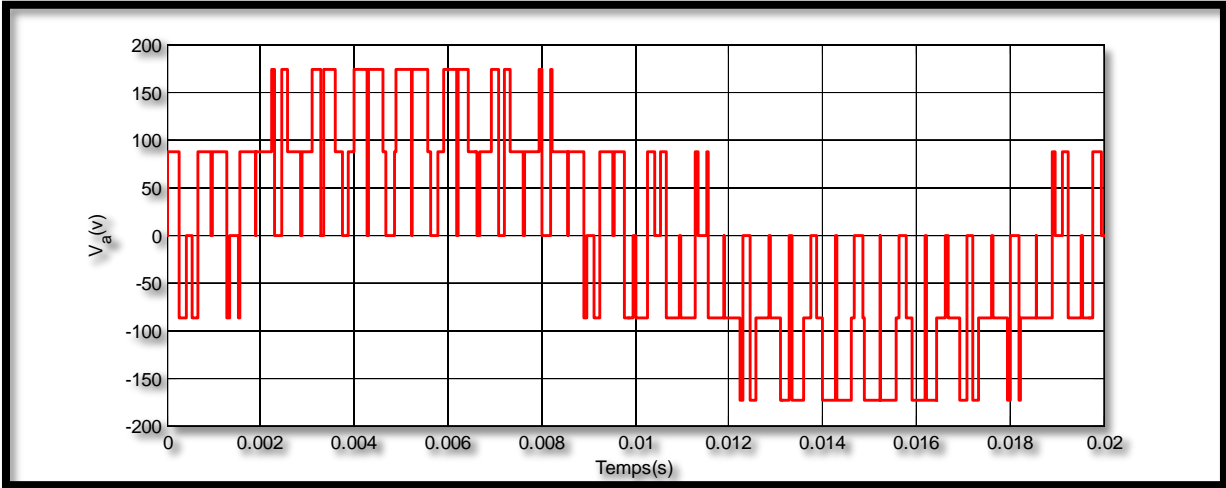


Figure II.28:Porteuse et tension d'Alimentation, et la Commande MLI



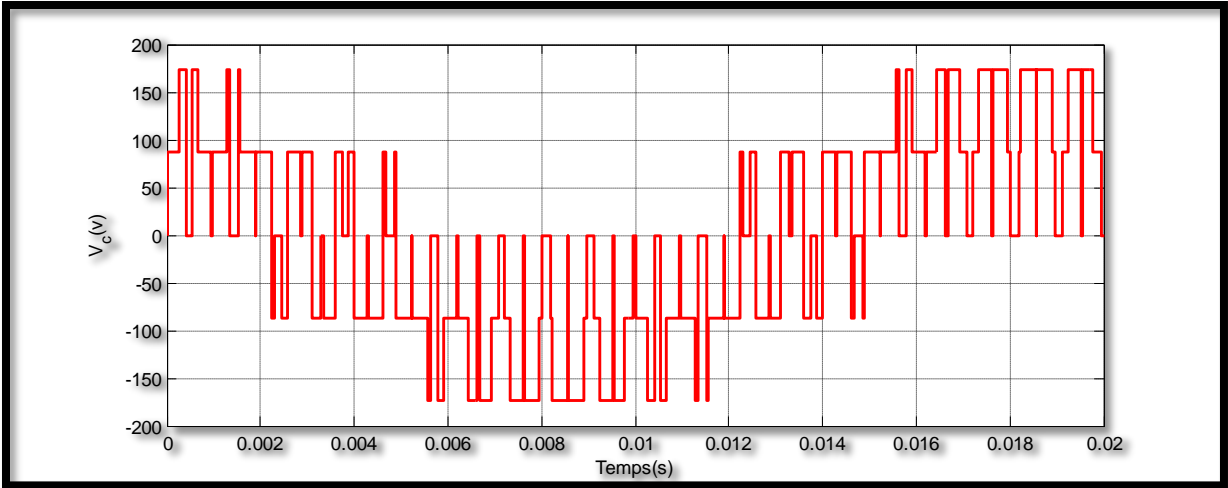


Figure II.29: Les Tensions (V_a, V_b et V_c) composé Sorte on Onduleur

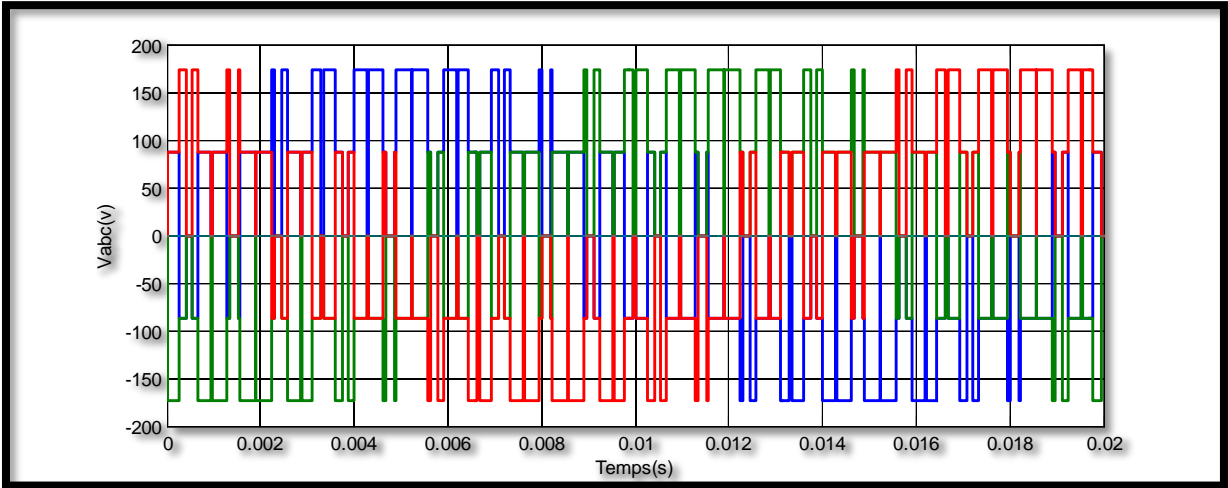


Figure II.30: Tension V_{abc} composé Sorte on Onduleur

II.CONCLUSION

Dans ce chapitre on a étudié la modélisation d'une éolienne (turbine, générateur, convertisseur).

La modélisation de la turbine est composée de trois parties (turbine éolienne, multiplicateur, l'arbre) et la turbine éolienne se compose de trois pales orientables, et le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, et l'arbre sa liaison entre la partie mécanique et la partie électrique ou bien la liaison entre la turbine et le générateur.

On a modélisé le modèle de Park de la génératrice asynchrone double alimentation dont le modèle de GADA est lié au champ tournant.

Les convertisseurs se composent de deux parties (redresseur, onduleur). Le redresseur converti le courant alternatif en courant continu, et l'onduleur converti le courant continu en courant alternatif.

Enfin le chapitre suivant sera consacré à la commande de la conversion d'énergie éolienne à base de la génératrice asynchrone double alimentation.

CHAPITRE III

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 de la commande vectorielle 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 :

Le principe de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit).

Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent [20]. Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator, la puissance active dépend uniquement du courant rotorique I_{qr} , et la puissance réactive dépend uniquement du courant I_{dr} .

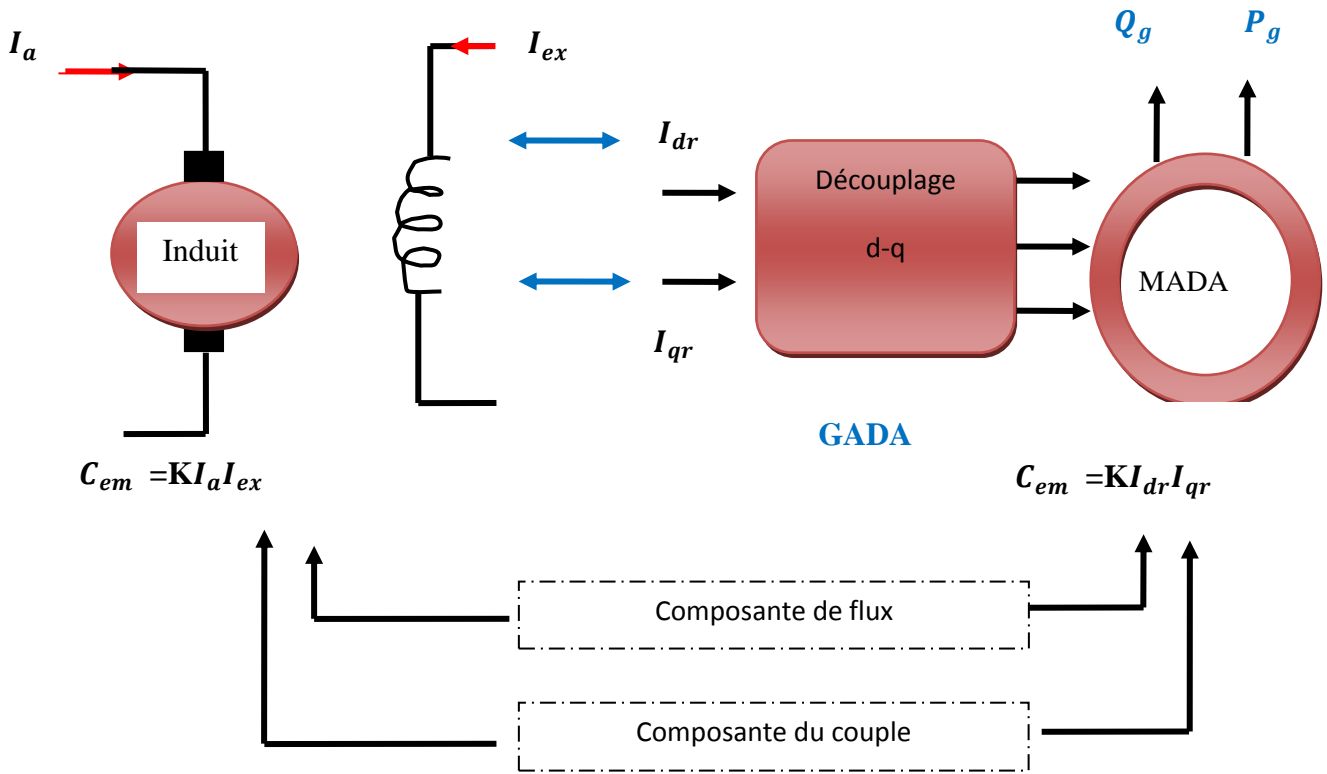


Figure. II.1: Analogie entre MCC à excitation séparée et GADA

III.2. MODELE DE LA GADA AVEC ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE :

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe d du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [21].

Rappelant le système d'équations différentielles (III.1), décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ \mathbf{V}_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ \mathbf{V}_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

III.2.1. 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:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

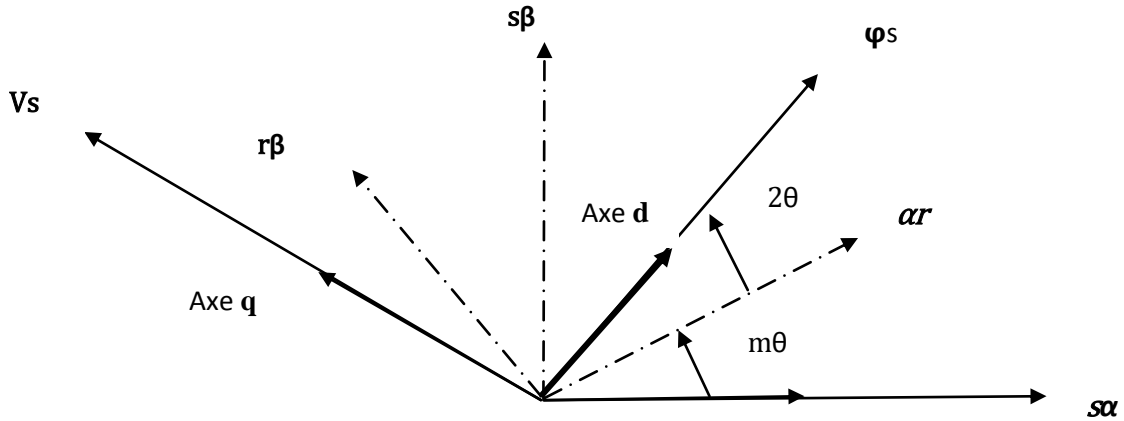


Figure III.2 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

A travers les équations (II.1) et (II.2) on peut simplifier par le système d'équations comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = -R_s I_{ds} \\ \mathbf{V}_{qs} = -R_s I_{qs} + \omega_s \varphi_s \\ \mathbf{V}_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Si on néglige la résistance R_s , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [23], [24] :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = 0 \\ \mathbf{V}_{qs} = \omega_s \varphi_s = V_s \\ \mathbf{V}_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ \mathbf{V}_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

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

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \varphi_s = -L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = -L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} - M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} - M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

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

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{M}{L_s} I_{rd} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

L'équation du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \cdot \varphi_{ds} \quad (\text{III.7})$$

III.2.2. Relation Entre Les Courants Statoriques Et Les Courants Rotoriques :

A partir de l'équation (III.6), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{M}{L_s} I_{dr} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = \frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

III.2.3. Relations Entre Puissances Statoriques Et Courants Rotoriques:

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

par :

$$\begin{cases} P_s = -(V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \\ Q_s = -(V_{sq} I_{sq} - V_{sd} I_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

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

$$\begin{cases} P_s = -V_s I_{sq} \\ Q_s = -V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant I_{sd} et I_{sq} par leurs expressions données dans l'équation (III.8), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

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

$$\Rightarrow \begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{W_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

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 $\frac{V_s^2}{W_s L_s}$. Prés imposée par le réseau [21].



Figure III.3 : Bloc de contrôle à flux orienté.

III.2.4. 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 :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rd} + \frac{V_s M}{W_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

En injectant ces équations dans les expressions des tensions rotoriques :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{V_s M}{W_s L_s} \right) - W_r \left(I_{rq} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + W_r \left(I_{rd} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) + \frac{V_s M}{W_s L_s} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Avec

$$W_r = g W_s \Rightarrow$$

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{rd}}{dt} - g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ \mathbf{V}_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{rq}}{dt} + g W_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

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

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{rd} = R_r I_{rd} - g W_s \left(\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq}\right) \\ \mathbf{V}_{rq} = R_r I_{rq} + g W_s \left(\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd}\right) + g \frac{V_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

L'étude précédemment établie nous permet de définir le schéma bloc du système à réguler (**Figure III.4**).

$$\text{On pose : } \boldsymbol{\varphi}_s = \sqrt{\varphi_{sd}^2 + \varphi_{sq}^2} \quad \text{et} \quad \boldsymbol{\varphi}_r = \sqrt{\varphi_{rd}^2 + \varphi_{rq}^2} \quad (\text{III.16})$$

- \mathbf{V}_{dr} et \mathbf{V}_{qr} : Sont les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques désirés.
 - $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$: est le terme de couplage entre les deux axes. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.
 - $g \frac{V_s M}{L_s}$: Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.
- g : Coefficient de glissement.

A partir des systèmes d'équations (II.9) et (II.14), nous pouvons élaborer le modèle de la machine MADA pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc (**figure II.4**).

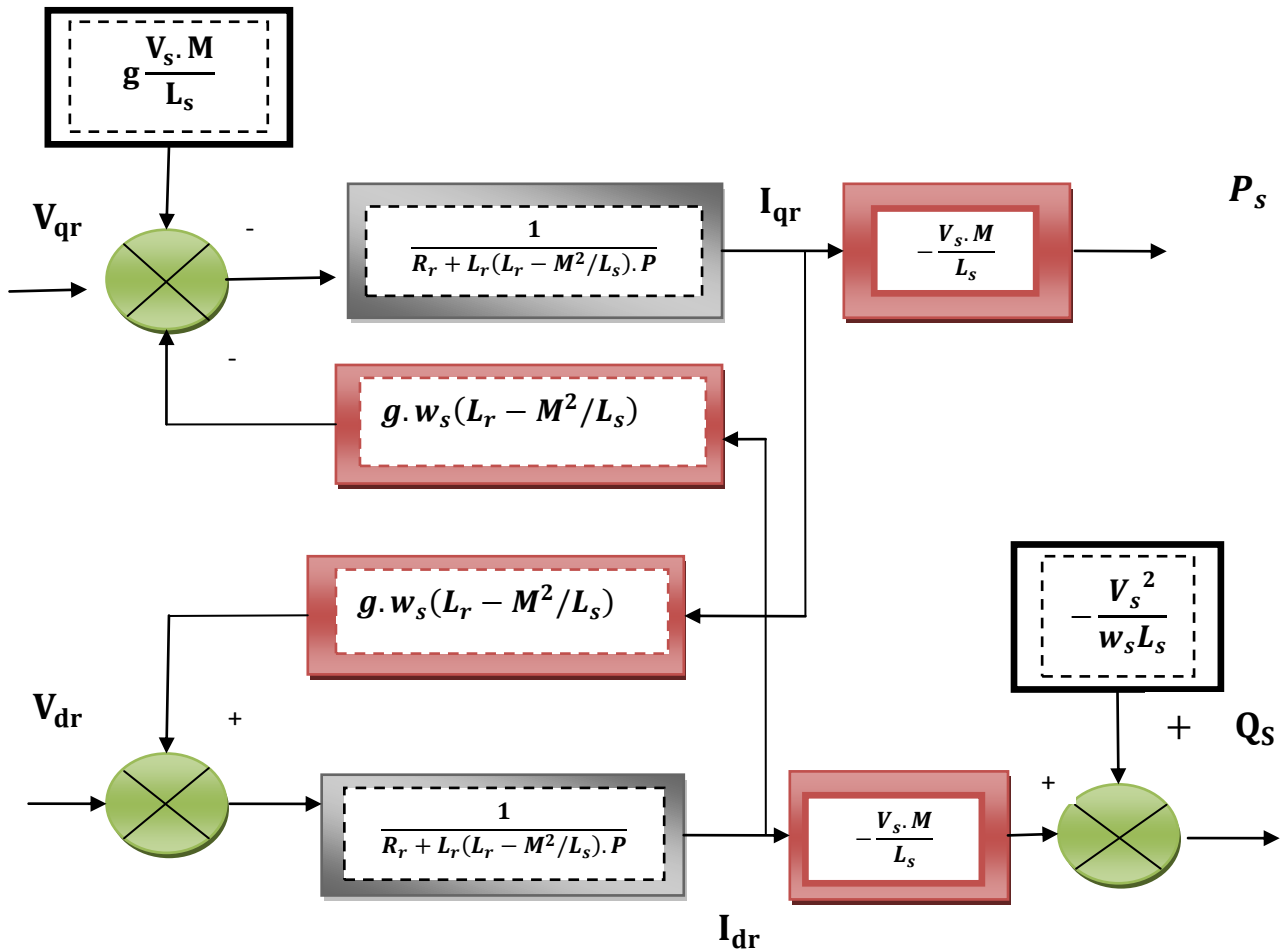


Figure III.4 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances (système interne)

Dans ce schéma, nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné que l'influence du couplage est minime, chaque axe peut être commandé indépendamment avec son propre régulateur [25].

Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau [22].

III.2.5. Type Des Régulateurs Utilisent

Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le

régulateur Proportionnel-Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulations industriels. Les régulateurs de chaque axe a pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances active et réactive de référence et les puissances active et réactive mesurées [24].

La forme du correcteur est la suivante : $K_p + \frac{K_i}{p}$

Avec :

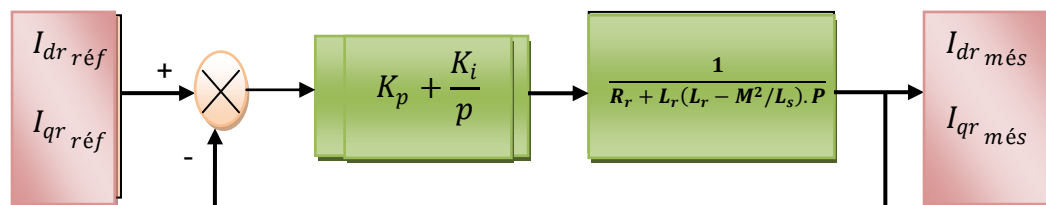
K_p est le gain proportionnel du régulateur.

K_i : est le gain intégral du régulateur.

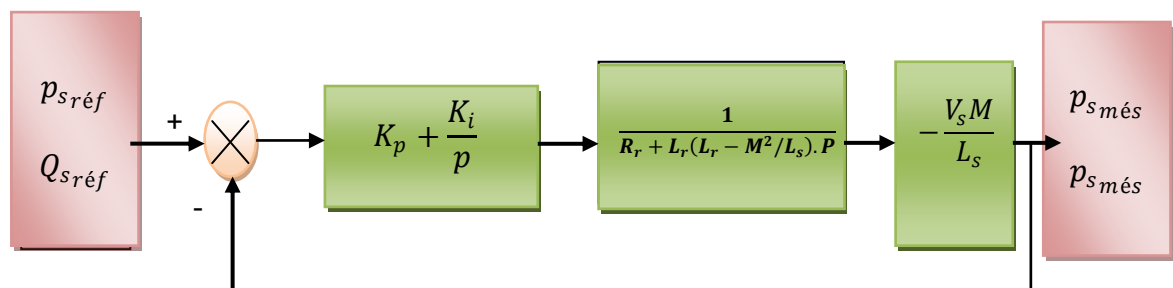
Si on considère la fonction du transfert suivante : $F(p) = \frac{K}{1+\tau p}$

Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur précédemment cité (figure (III.4)).

➤ Système Régulé Par Un Régulateur PI



a) Schéma de la régulation des courants rotoriques.



b) Schéma de la régulation des puissances statoriques

Figure III.5 : Schéma de la régulation.

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

$$\mathbf{FBO}(p) = \frac{k(k_p + \frac{k_i}{p})}{1 + \tau p} = \left(\frac{k(k_p + k_i)}{p(1 + \tau p)} \right) = \frac{k \cdot k_i (1 + \frac{k_p \cdot p}{k_i})}{p(1 + \tau p)}$$

On prend $\tau = \frac{k_p}{k_i}$

Alors $\mathbf{FBO}(p) = \frac{k \cdot k_i}{p}$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$\mathbf{FBF}(p) = \frac{1}{1 + \tau_r p}$$

Et on a $\mathbf{FBF}(p) = \left(\frac{k \cdot k_i}{1 + k \cdot k_i} \right) = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{k \cdot k_i} p} \right) \rightarrow \tau_r = \frac{1}{k \cdot k_i}$

Avec:

τ_r : Le temps de repense du système corrigé qui doit être suffisamment rapide Ainsi, les gains du régulateur peuvent être exprimés de la manière suivante :

Or $k_i = \frac{k_p}{\tau_r}$ Alors $\tau_r = \frac{\tau_r}{k k_p}$

Donc $\left\{ \begin{array}{l} k_p = \frac{\tau_r}{\tau_r k} \\ k_i = \frac{1}{\tau_r k} \end{array} \right.$

Le temps de réponse sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité.

III.3. LES TYPES DE COMMANDE VECTORIELLE

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase). Deux méthodes ont été développée soit:

- ✓ La commande vectorielle directe.
- ✓ La commande vectorielle indirecte [23].

III.3.1. Commande Vectorielle 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.6** présente le principe de la commande dite directe.

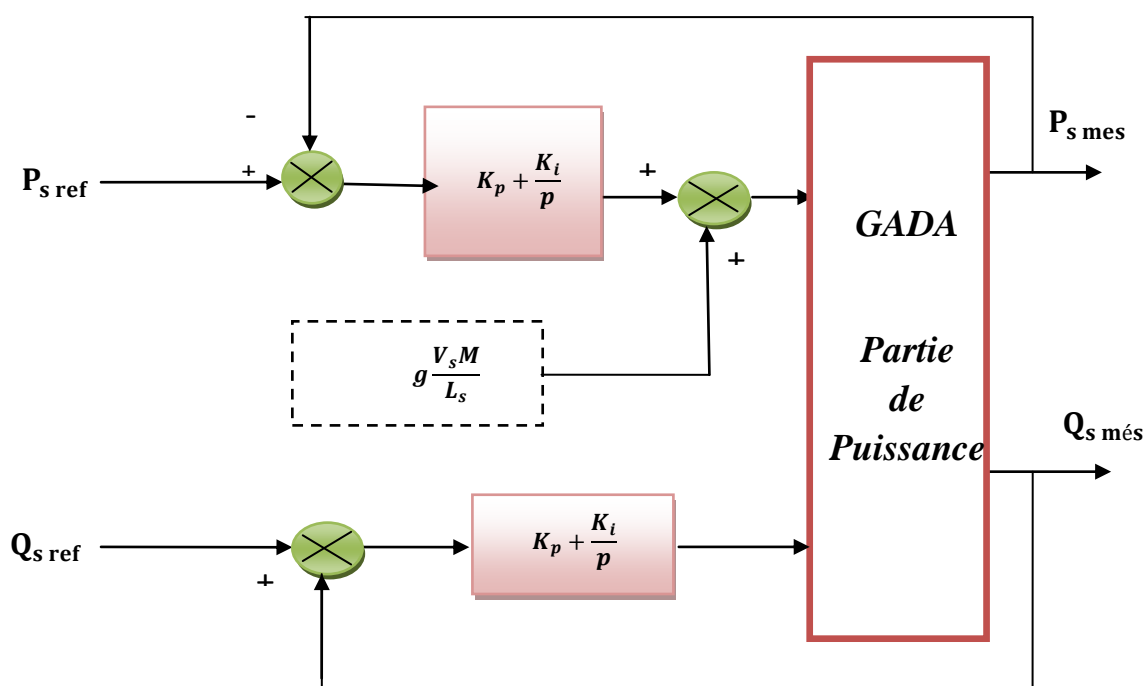


Figure III.6 : Schémas commande vectorielle direct.

III.3.2. La Commande Indirecte :

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances actives et réactives. Ainsi, les courants rotoriques seront régulés indirectement.

III.3.2.1. Commande En Boucle Ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les

puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [19].

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système (III.8) on déduit les références des courants rotorique direct et quadrature suivant les relations.

$$\begin{cases} I_{qr-ref} = \frac{L_s}{V_s M} P_{s-ref} \\ I_{dr-ref} = \frac{L_s}{V_s M} Q_{s-ref} + \frac{V_s}{L_s W_s} \end{cases} \quad (III.17)$$

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

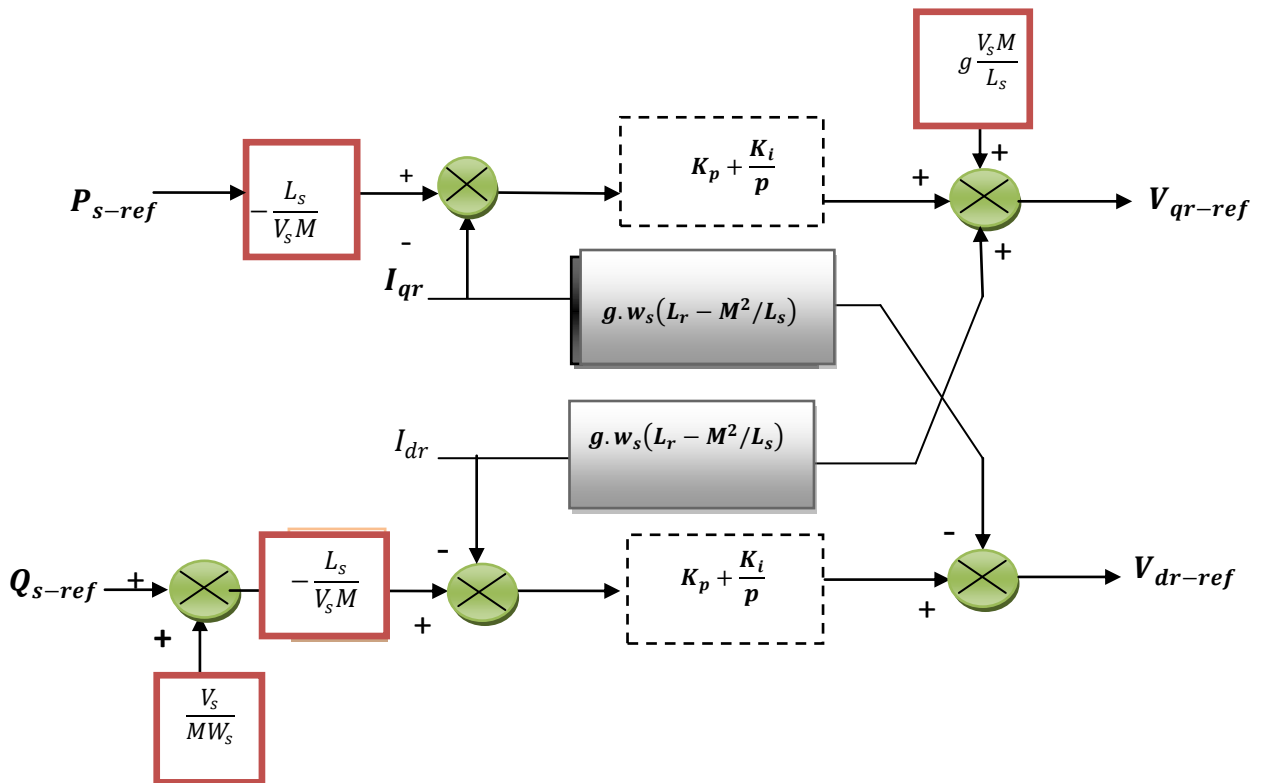


Figure III.7 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

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

III.3.2.2. Commande En Boucle Fermée

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA [24].

Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante :

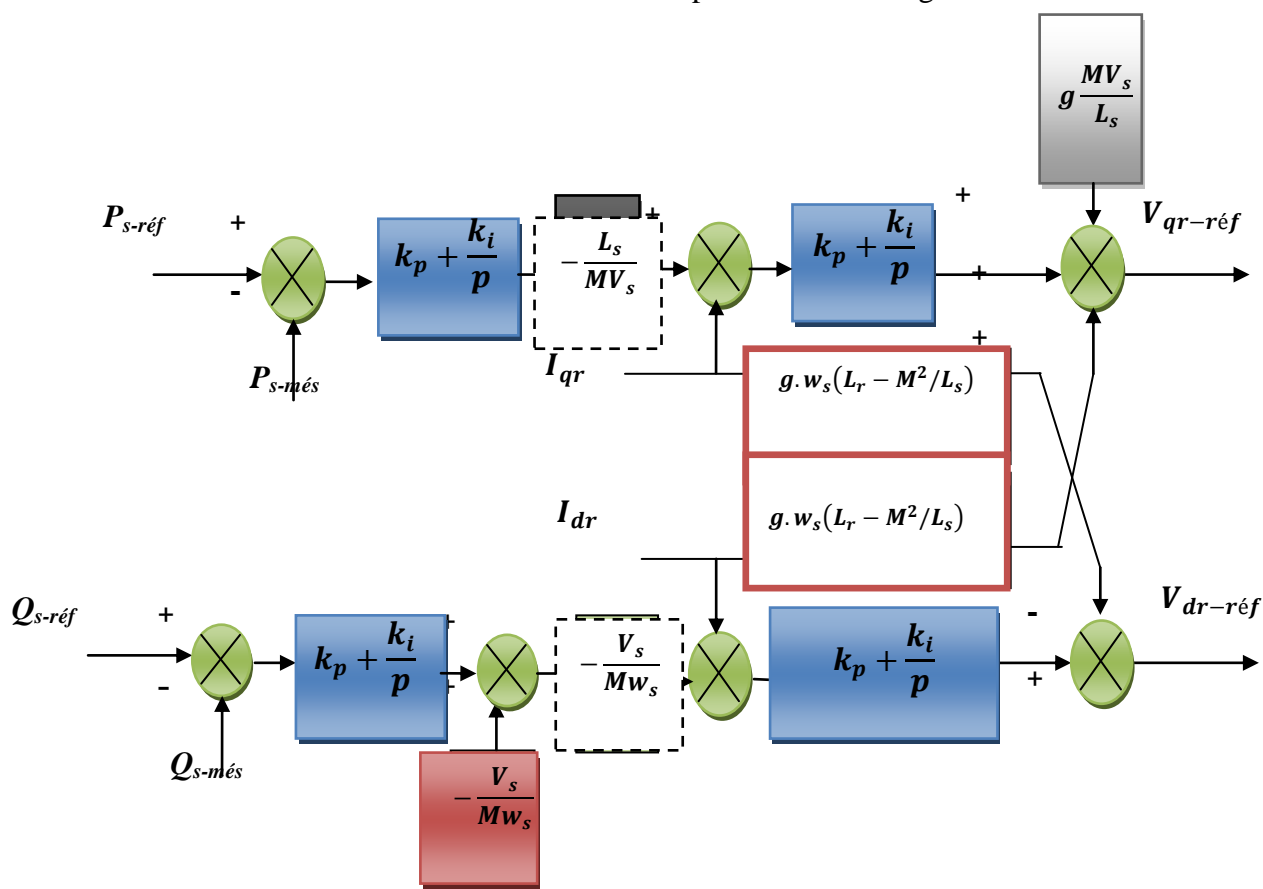


Figure III.8 : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

III.4. RESULTATS DE SIMULATION

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

dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la « GADA » et entraînée à une vitesse fixe : 1550 tr/min.

III.4.1. Résultats De Simulation Sans Onduleur (GADA + SVM)

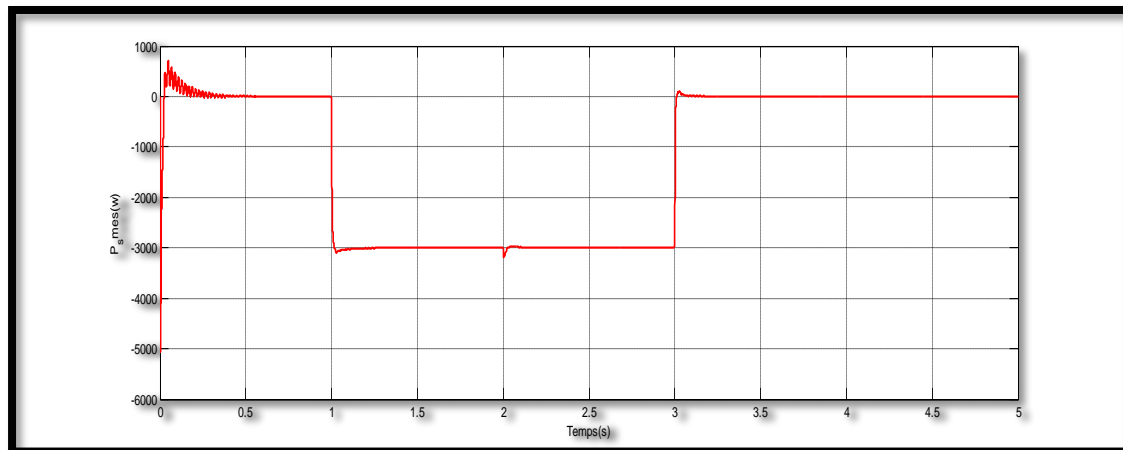


Figure III.9 : Puissance statorique P_{mes} (w)

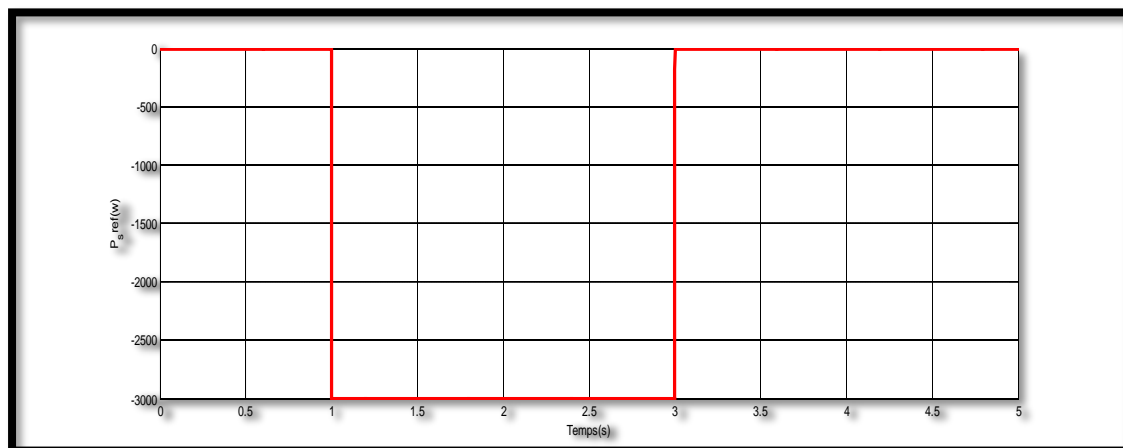


Figure III.10 : Puissance statorique P_{ref} (w)

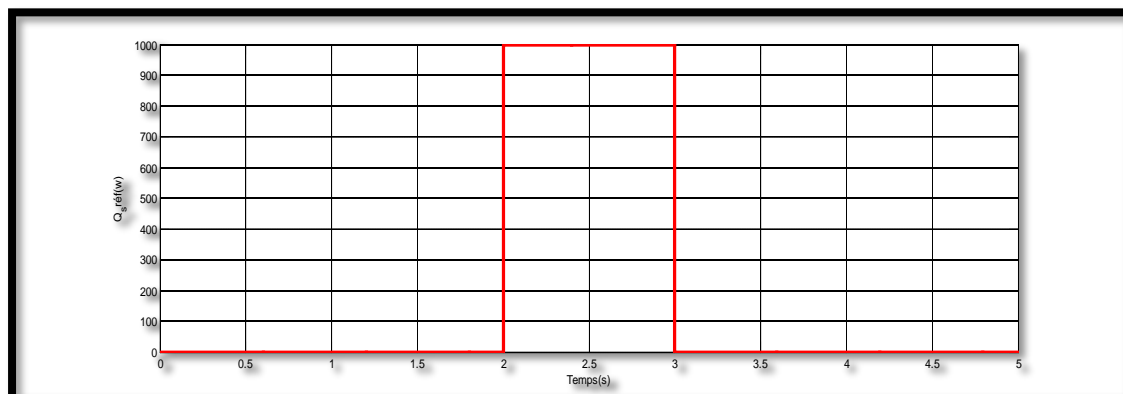
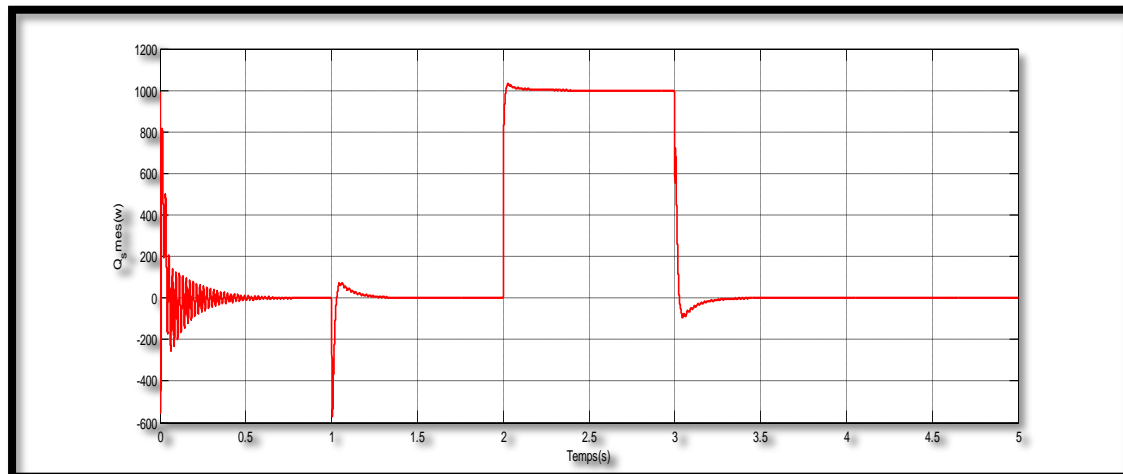
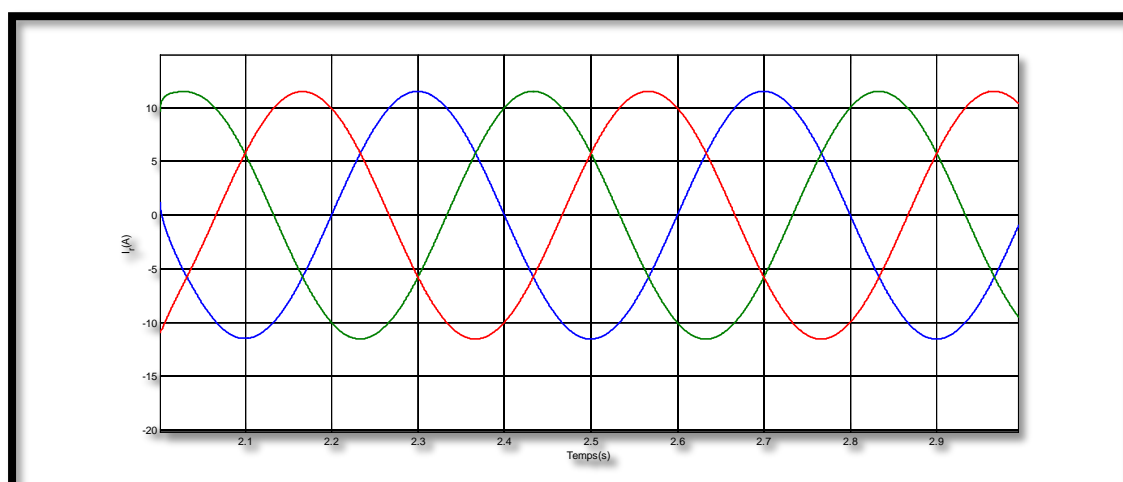
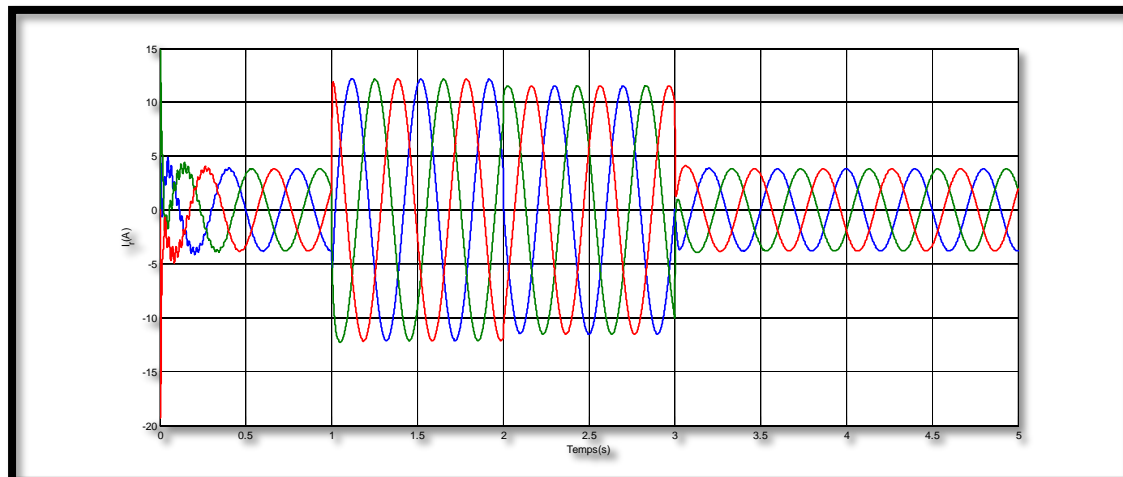


Figure III.11 : Puissance statorique Q_{ref} (VAR)**Figure III.12 : Puissance statorique Q_{mes} (VAR)****Figure III.13 : Courant rotorique I_r (A)**

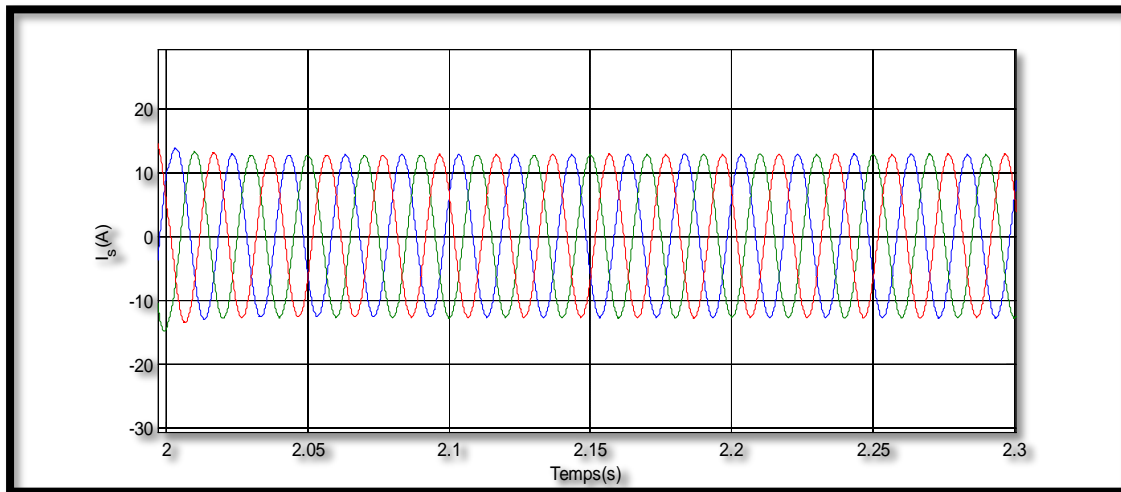
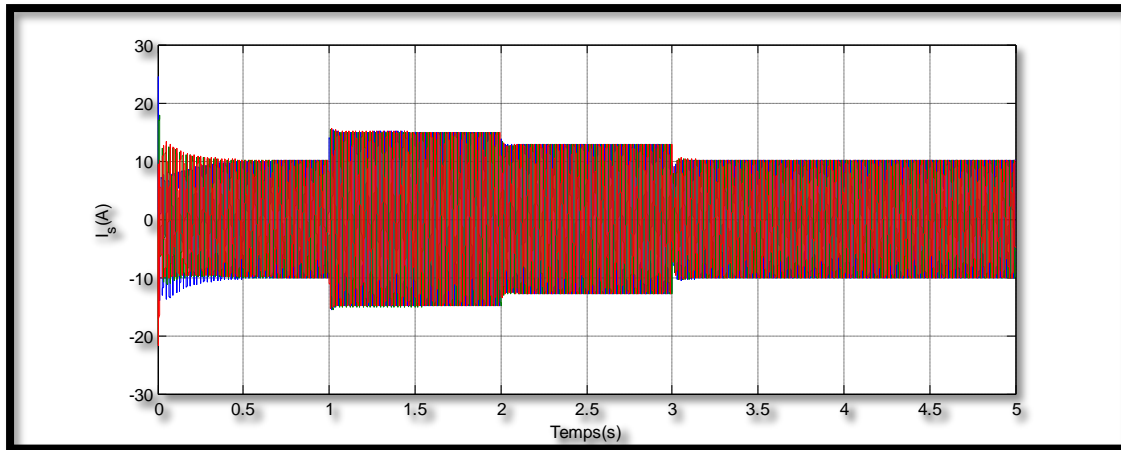
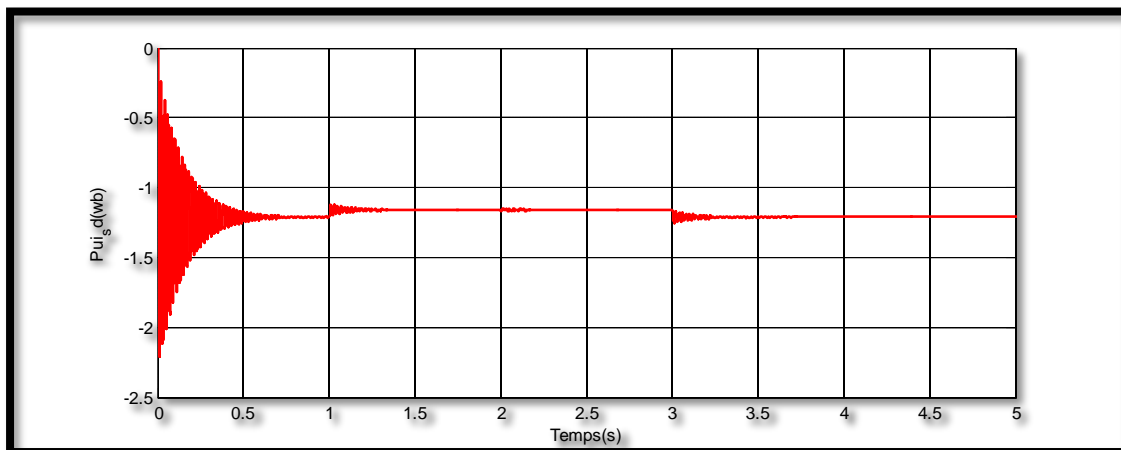


Figure III.14 : Courant statorique I_s (A)



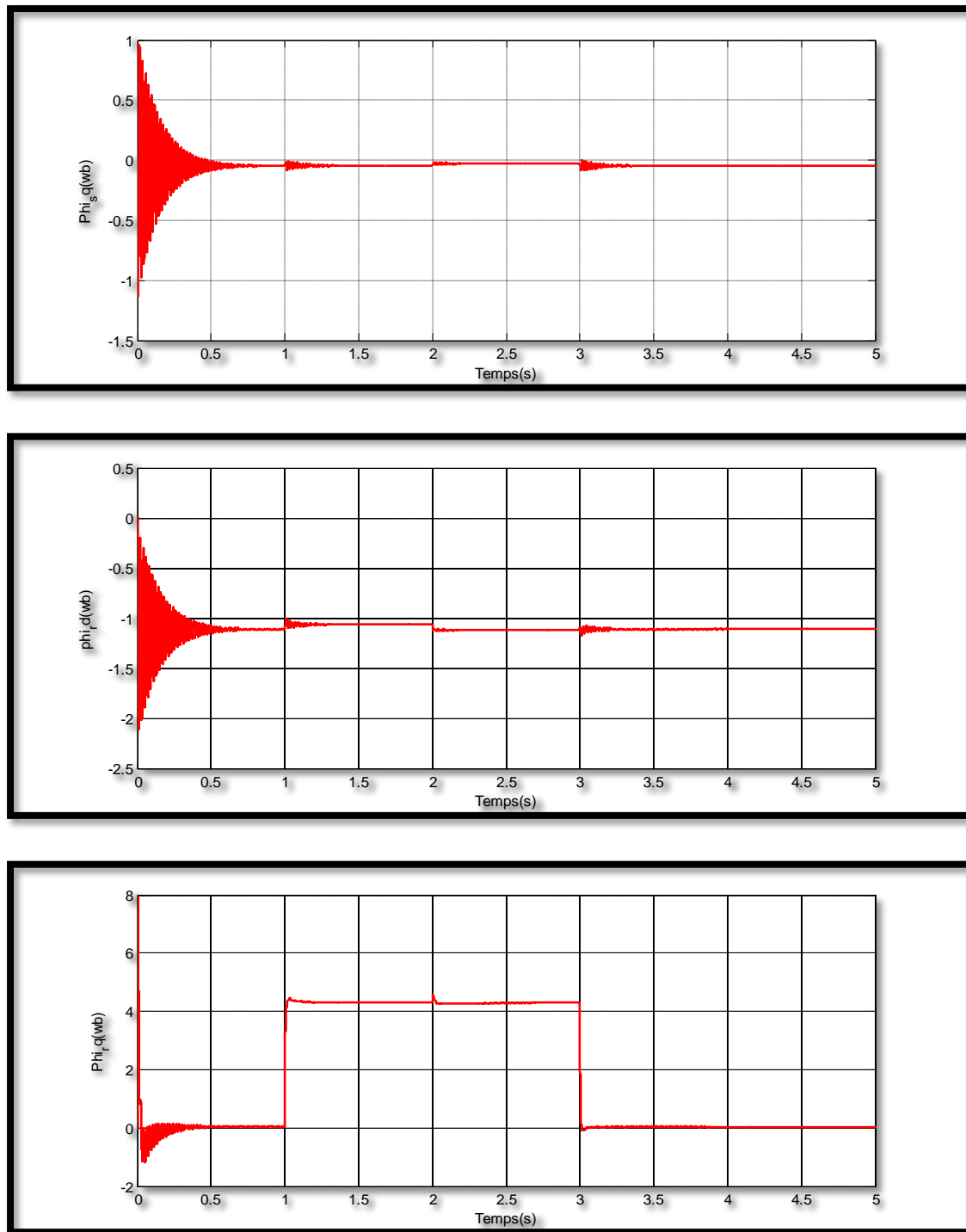
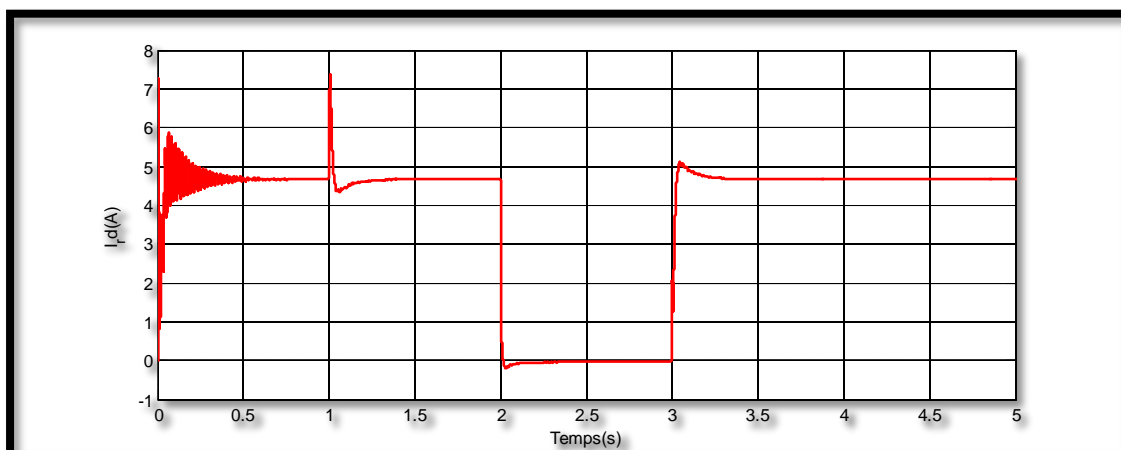
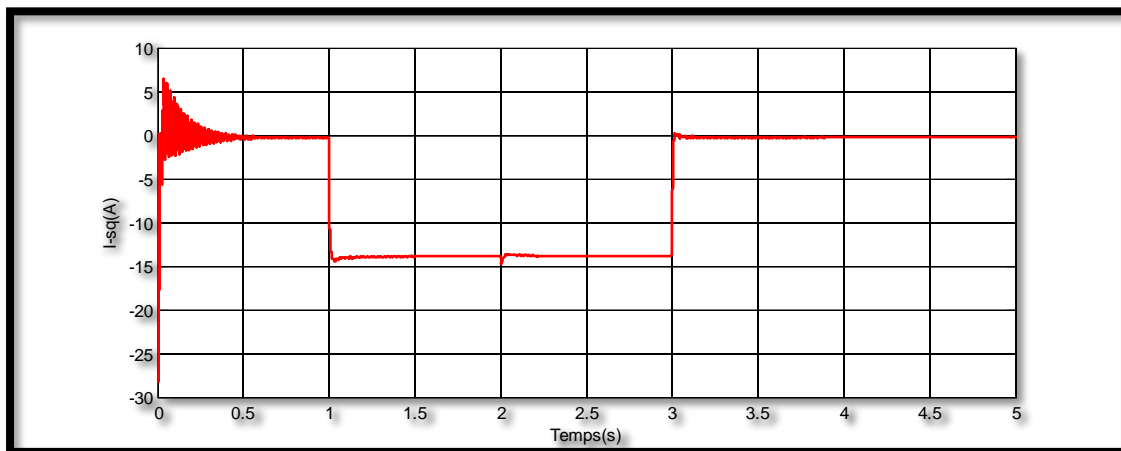
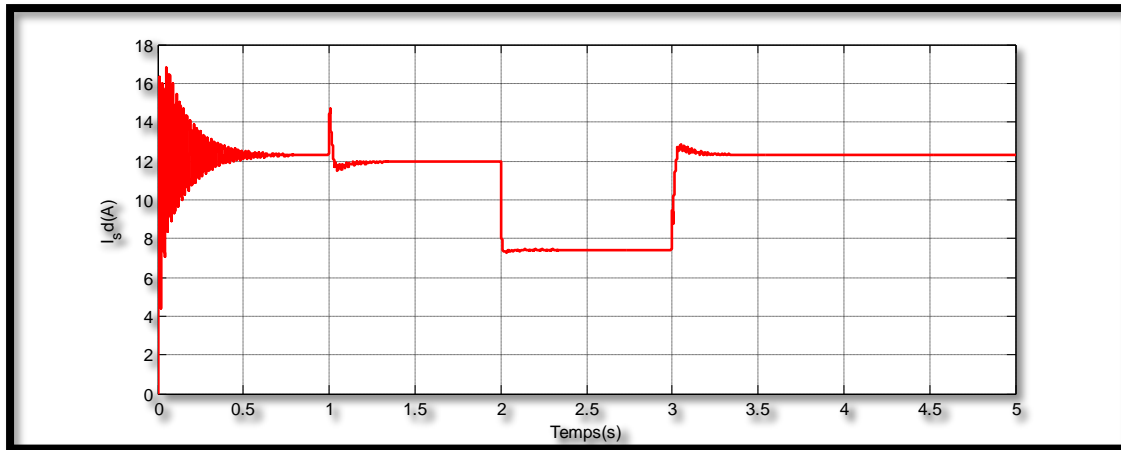


Figure III.15 : Flux statorique et rotorique en forme (d , q)



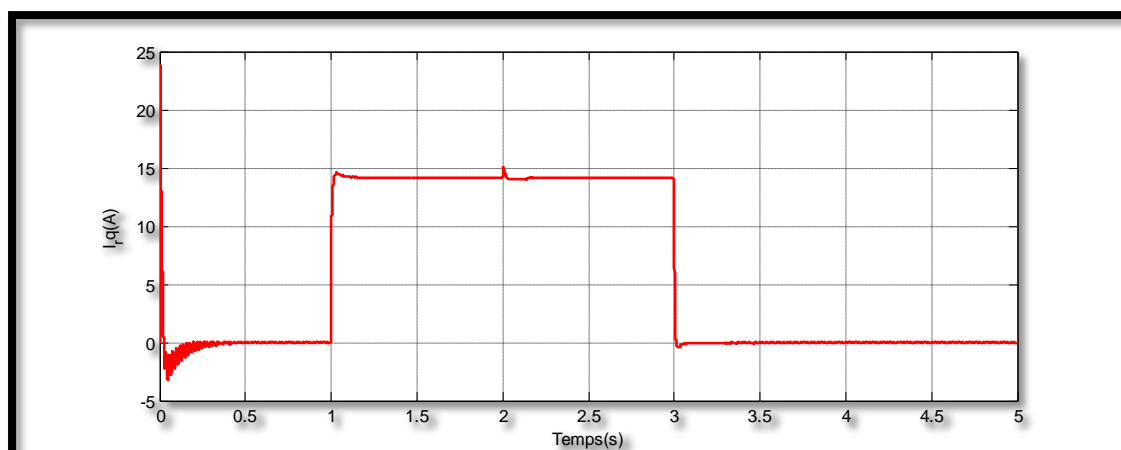


Figure III.16 : Courants statorique et rotorique (d , q)

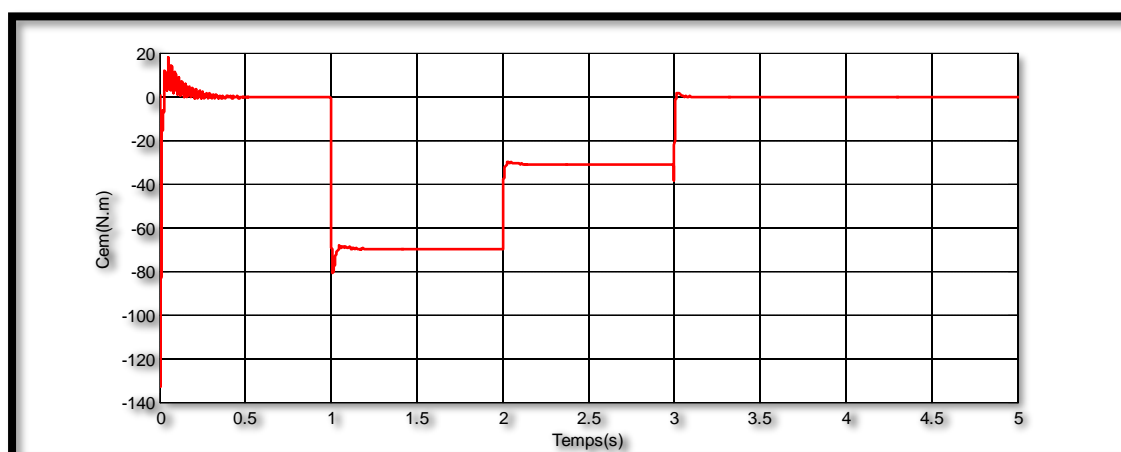


Figure III.17 : Couple électromagnétique

III.4.2. Interprétation Des Résultats

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la GADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique I_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe I_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que découplage de la machine est réalisé avec succès.

- La puissance active du côté statorique est négative entre les instants $t=1s$ et $t=2s$ ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la GADA.
- La puissance réactive est nulle entre les instants $t=1s$ et $t=2s$ c'est une condition de fonctionnement de la GADA pour avoir un facteur de puissance unitaire. On retrouve ainsi le découplage si avantageux des moteurs à courant continu.
- le couple électromagnétique dépend directement de la puissance active et ceci traduit par sa forme identique de celle de la puissance active P_s .
- Et Pour le courant statorique dépend essentiellement de la variation du couple d'entraînement mécanique et que la fréquence du courant rotorique est liée principalement à la variation de la vitesse mécanique de rotation.

Dans ce cas, on peut conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique.

III.4.3. Résultats De Simulation Avec Onduleur (GADA + SVM +OND)

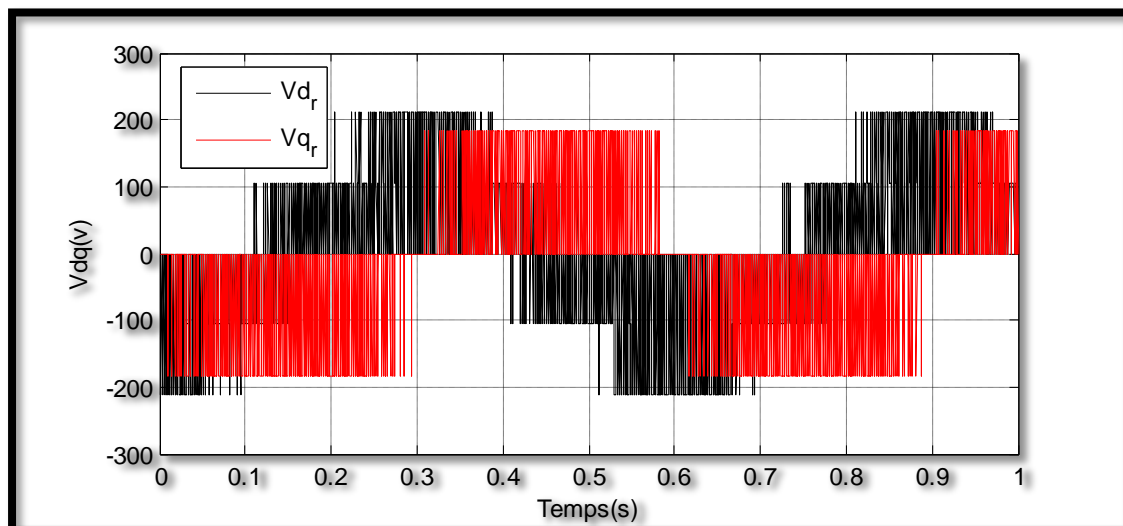


Figure III.18 : Tension transmise le rotor (Vdq)

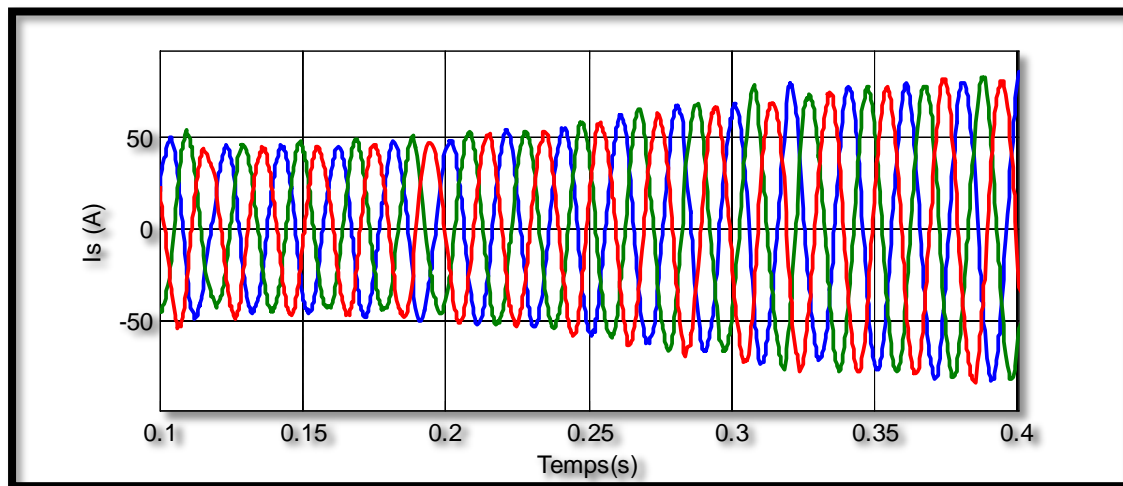
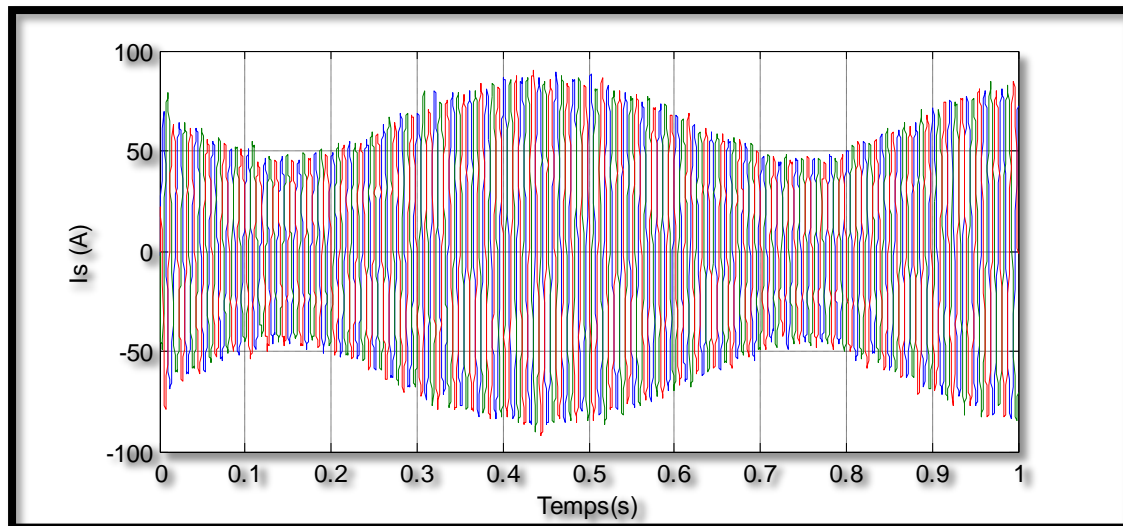


Figure III.19 : le courant statorique avec ZOOM(abc)

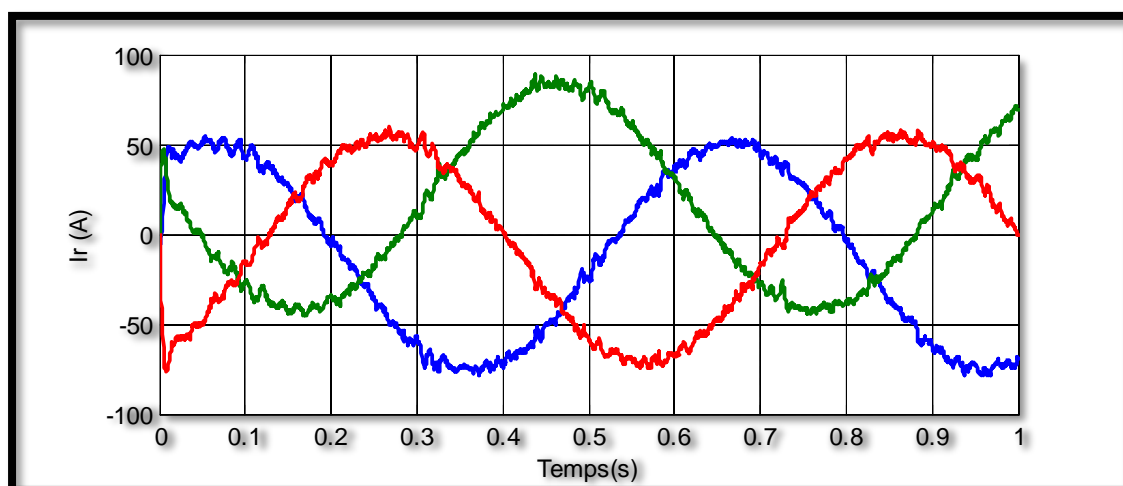


Figure III.20 : le courant rotorique (abc)

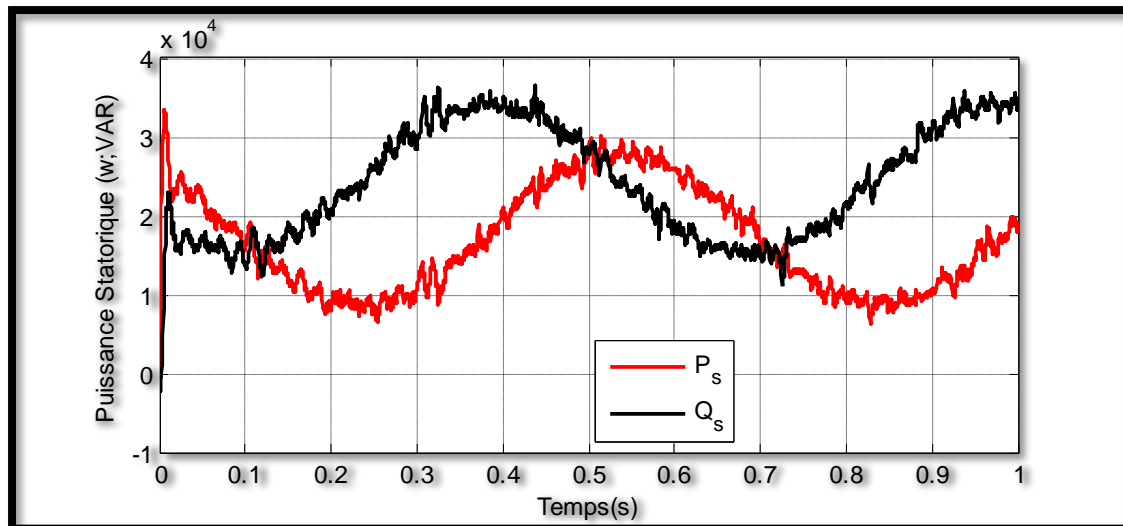


Figure III.21 : La puissance statorique

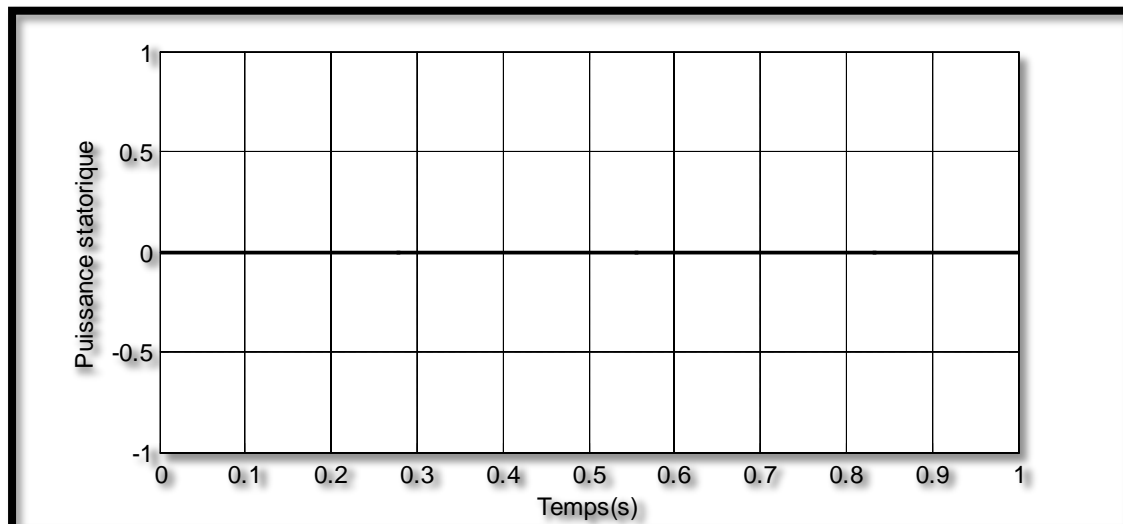


Figure III.22 : La puissance rotorique

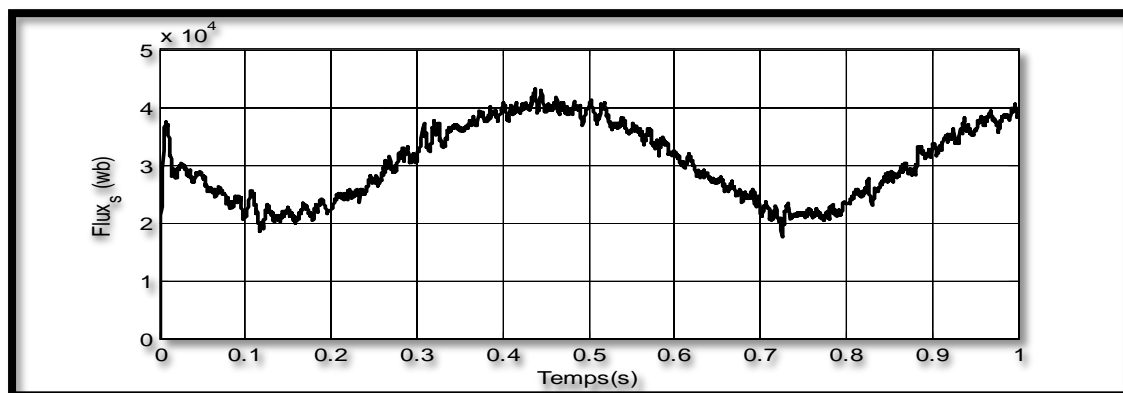


Figure III.23 : Le Flux statorique

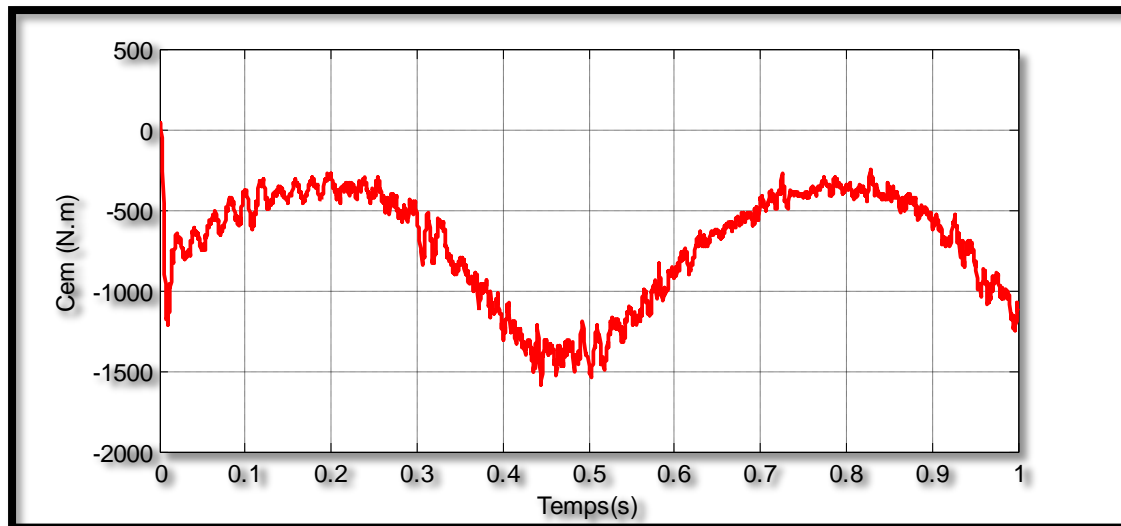


Figure III.25 : couple électromécanique

III.4.4. Interprétation Des Résultats

Avec cette modélisation, on remarque ce qui suit:

- En ce qui concerne la tension, une formation additive de (-200, -200) volts à 0,6 s.
- Quant au courant, il prend la forme d'un système sinusoïdal uniforme dans le temps, avec une augmentation de (0,2, 0,7) seconde et passe de 100 ampères à -100 ampères.
- pour la puissance, elle prend également une forme sinusoïdale, dans ses active et réactive, où elle varie entre 4 et 1 kilowatt. Et nous enregistrons puissance nulle dans le rotor.
- Le flux prend des valeurs positives jusqu'à 4 (wb).
- Le couple électromécanique enregistre en alternance des valeurs négatives de -1500 (N * mètre).

III.6. SIMULATION DE L'ENSEMBLE (GADA+ COMMANDE VECTORIELLE + CONVERTISSEUR (AC/AC) +TURBINE) :

III.6.1. Schémas Globale De Simulation :

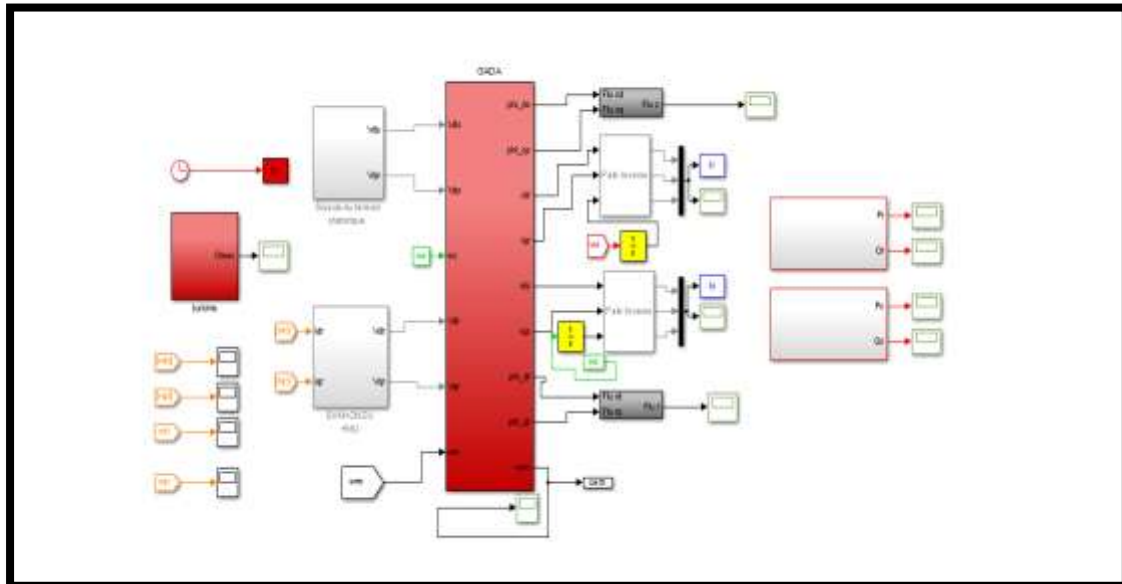
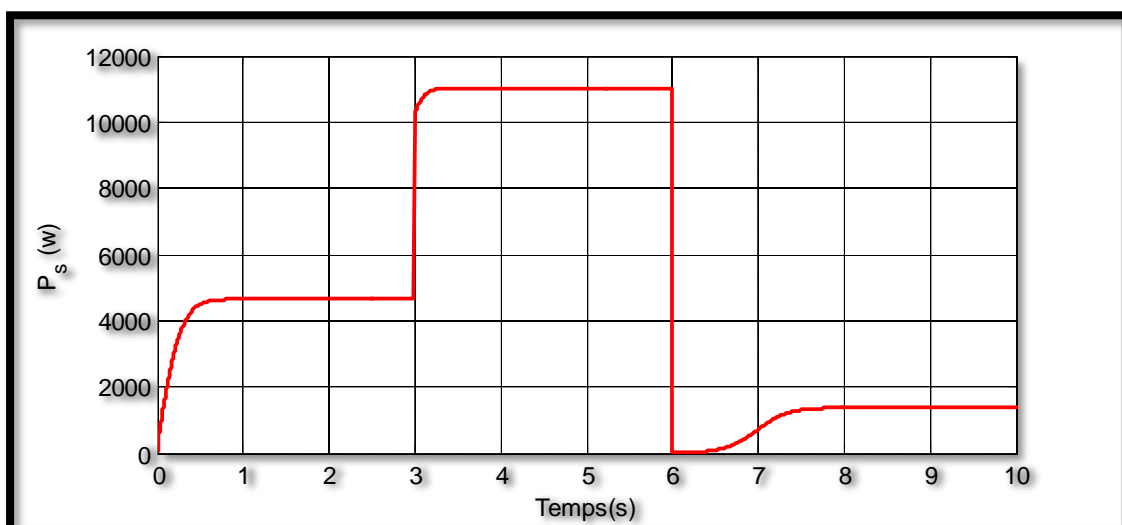


Figure III.26 : Schémas globale de l'ensemble (GADA+ commande Vectorielle+ Convertisseur (AC/AC) +turbine).

III.6.2. Résultats De Simulation De L'ensemble (GADA+ Commande Vectorielle + Convertisseur (AC/AC) +Turbine) :



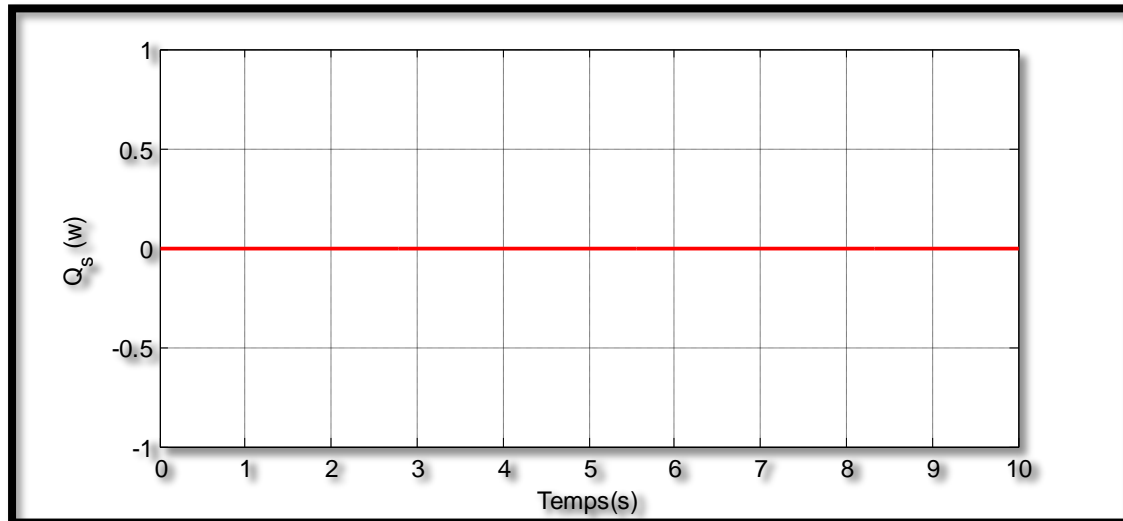


Figure III.27 : Puissance active et réactive statorique référenciel.

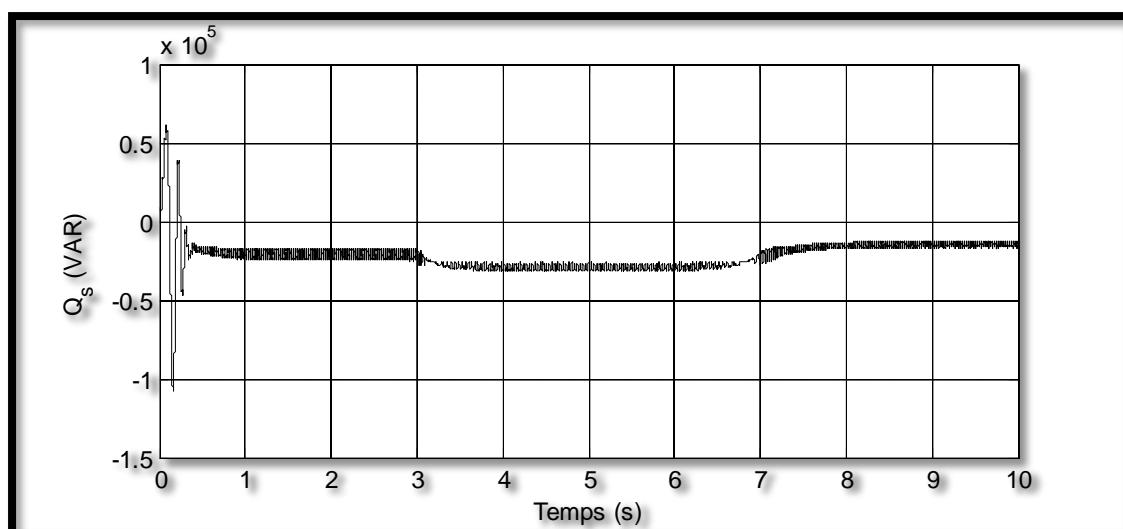
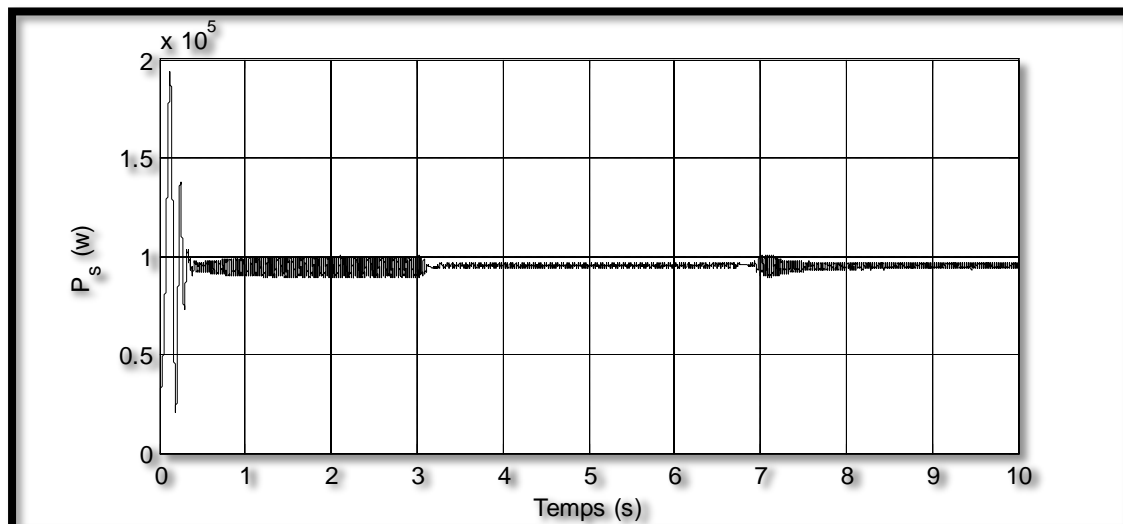
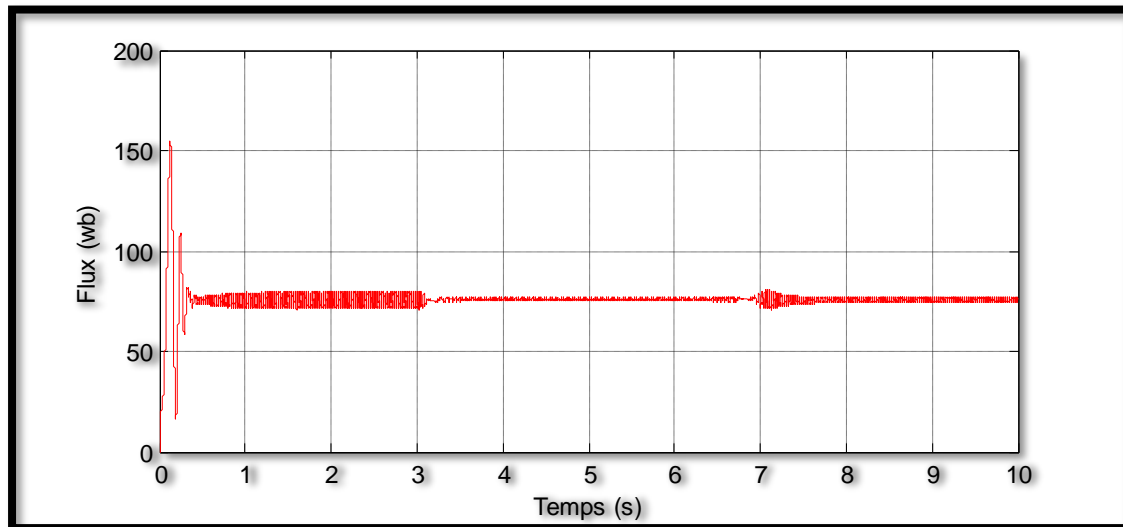
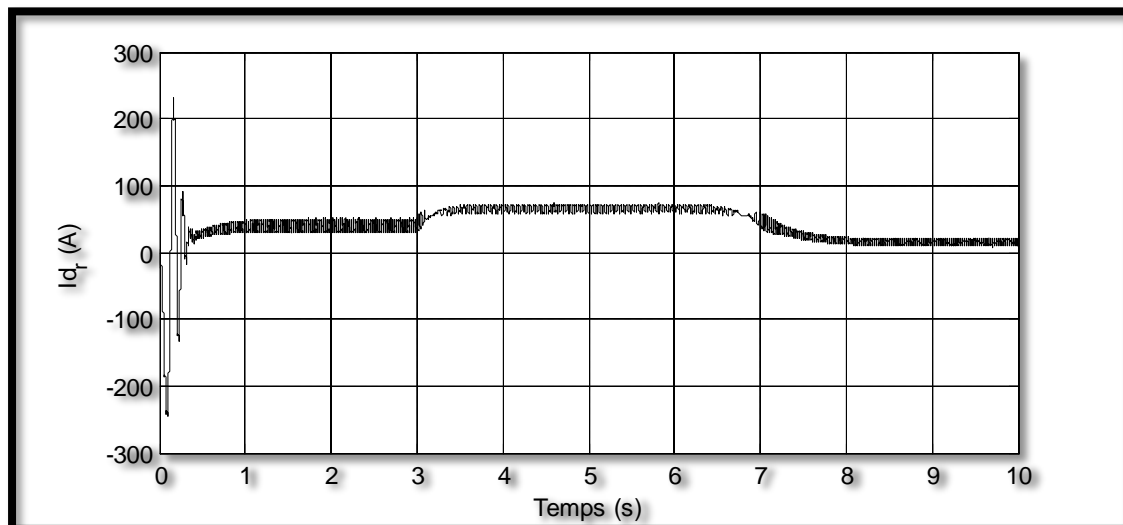
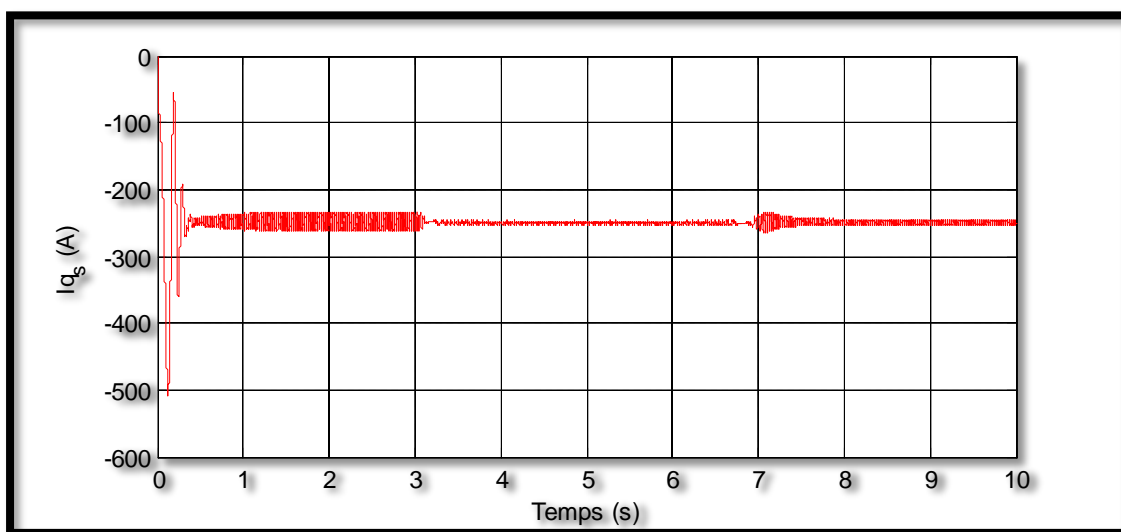
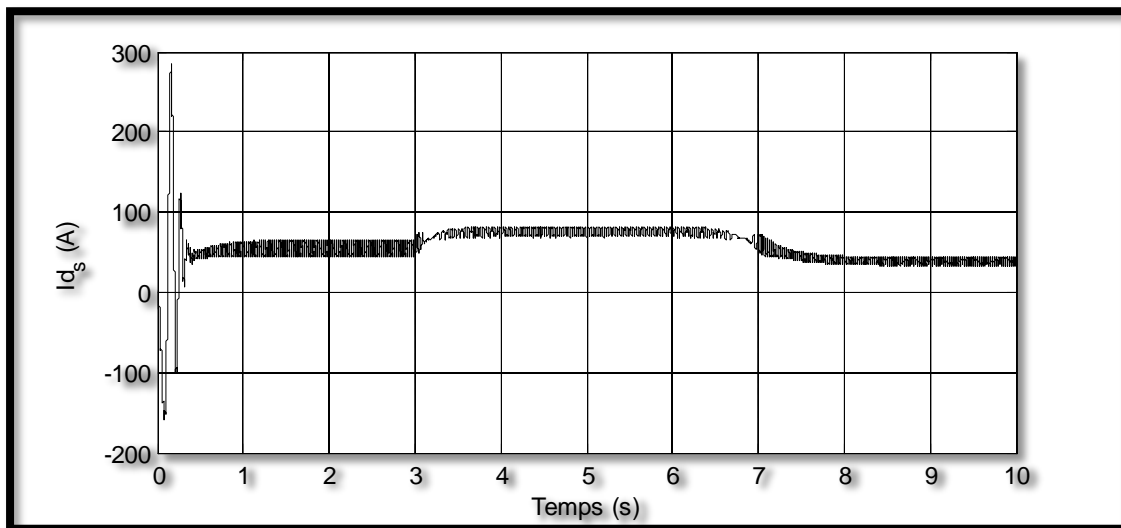
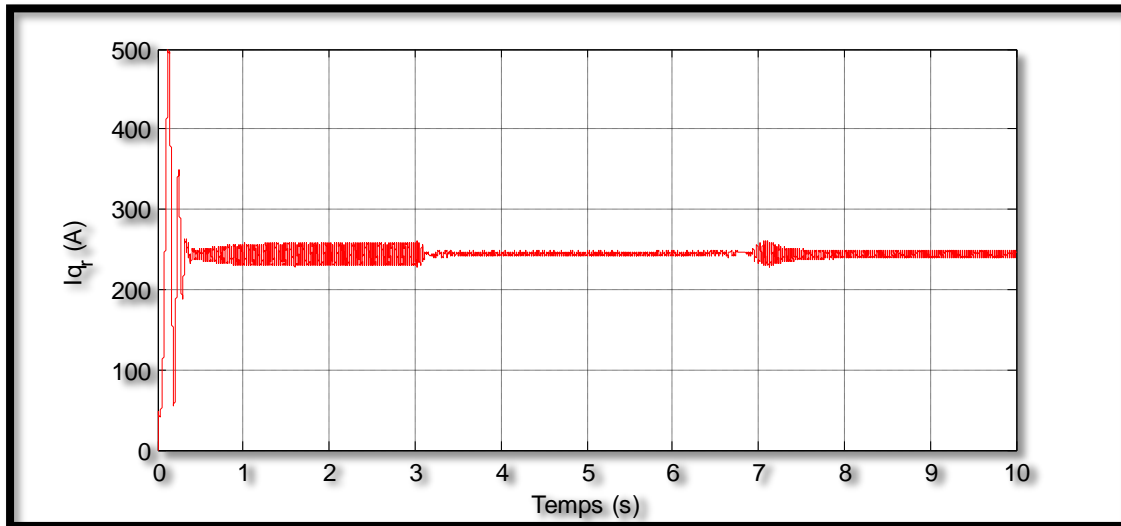
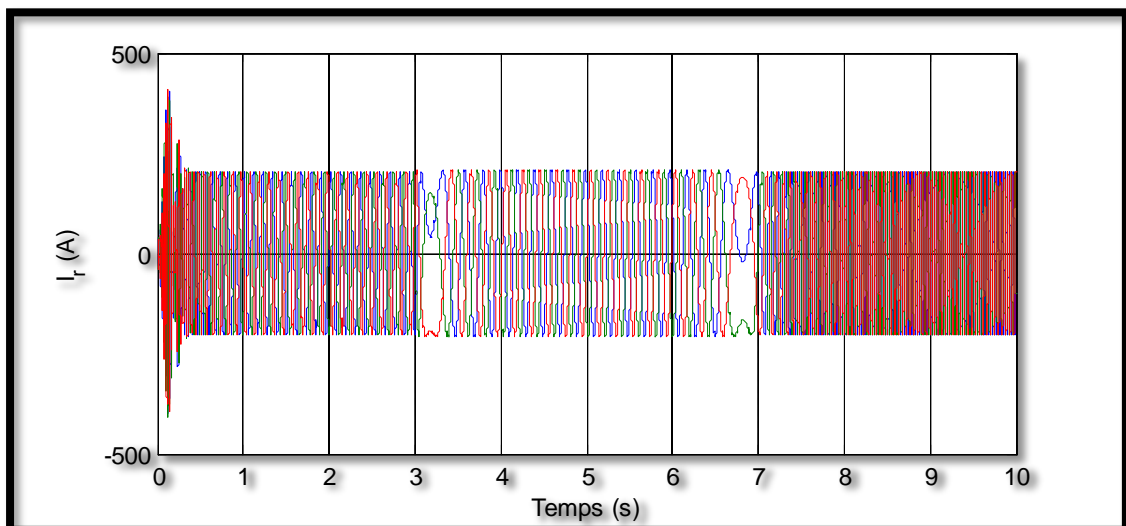
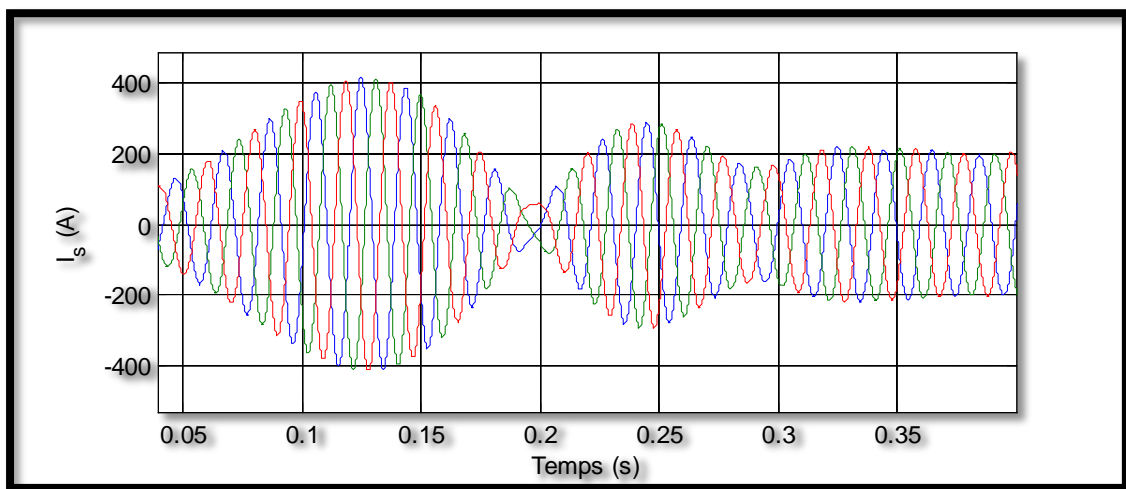
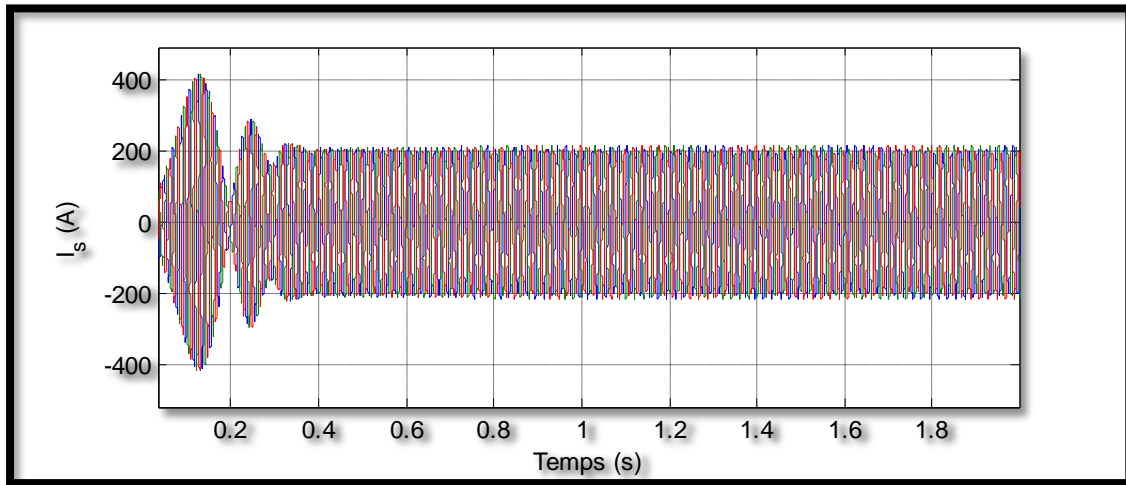


Figure III.28 : Puissance statorique mesure.**Figure III.29** : Flux statorique et rotorique





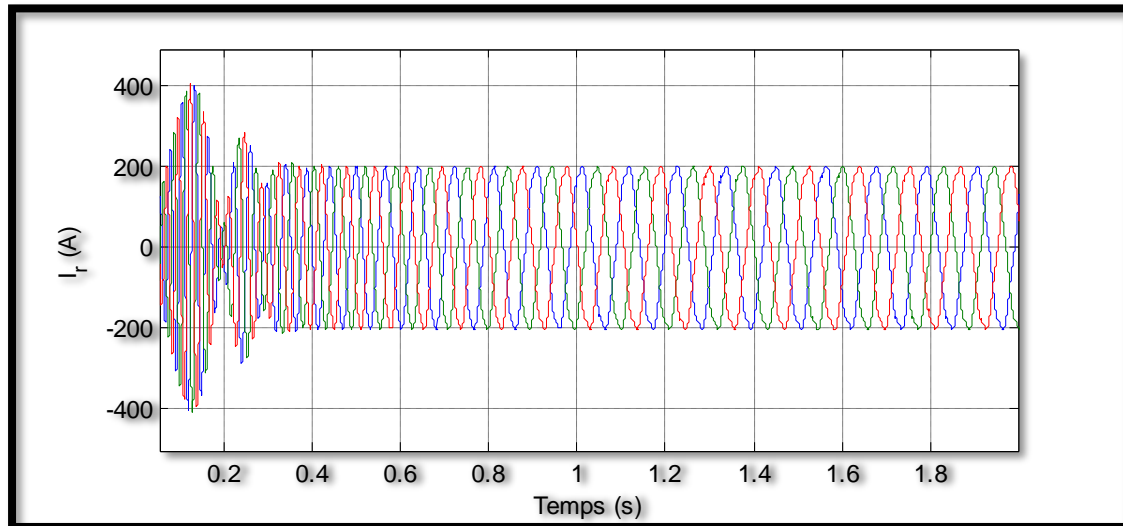


Figure III.30 : le courant statorique et rotorique + ZOOM

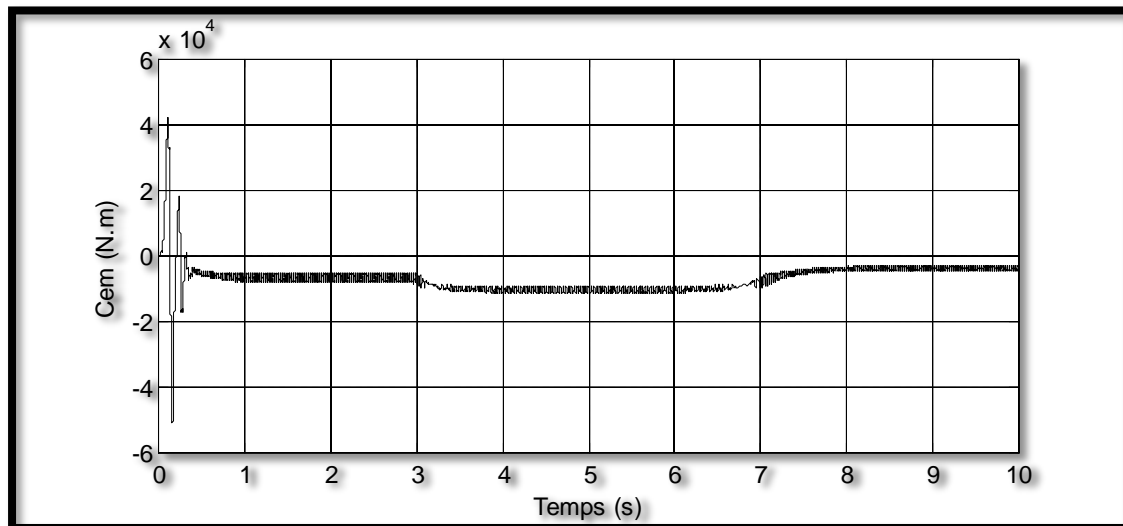


Figure III.31 : le couple électromagnétique.

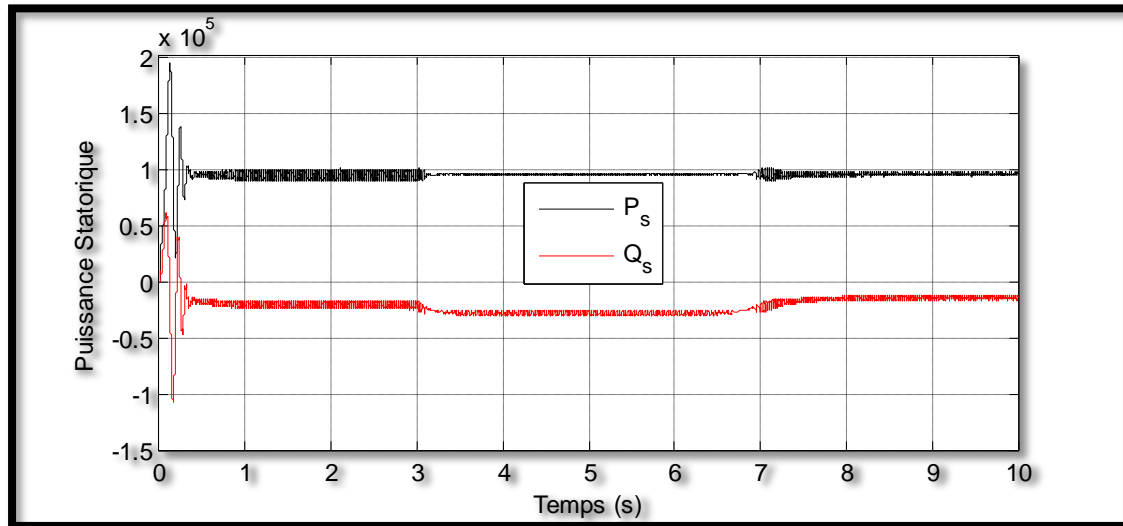


Figure III.32 : Puissance active et réactive statorique qui sorte à partir le GADA

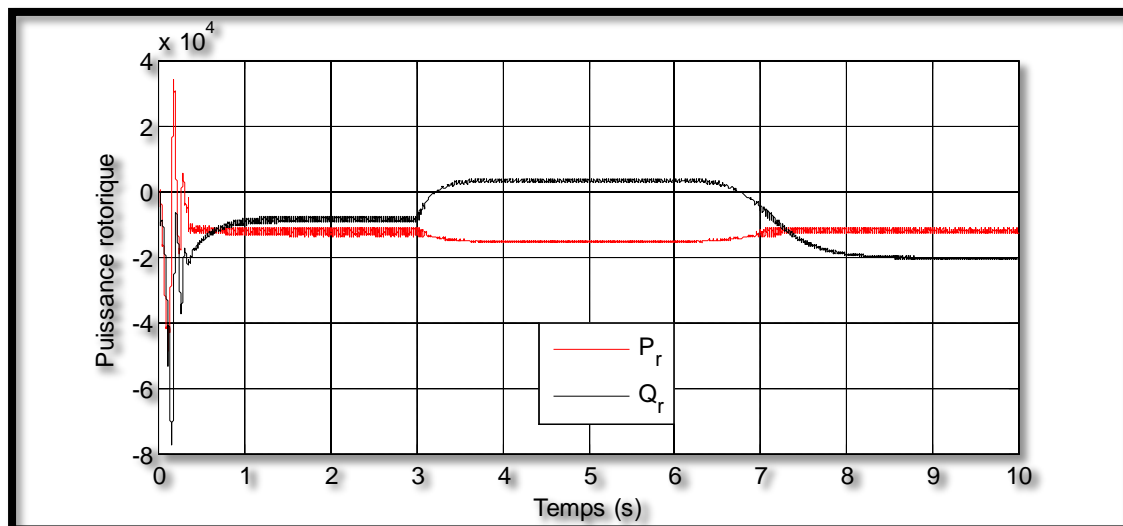


Figure III.33 : Puissance active et réactive rotorique qui sorte à partir le GADA

III. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en génératrice. Pour réaliser cette commande, deux boucles de régulation ont été présentées (une boucle régule les puissances active et réactive et une autre boucle pour la régulation des courants par des régulateurs de type PI). Un choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d, par conséquent la puissance active sera dépendant uniquement du courant I_{qr} . Les résultats obtenus par simulation s'avèrent satisfaisants, vu la stabilité des différentes grandeurs qui constituent la machine asynchrone à double alimentation.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons présenté la machine asynchrone à double alimentation comme une solution originale dans les applications de production d'énergie électrique, en particulier l'énergie éolienne.

Ce type de machine peut fonctionner dans un mode peu spécifique dans les deux quadrants (moteur ou générateur), de plus (GADA) offre une large plage opérationnelle en vitesse (sous-synchronisation ou synchronisation excessive).

Dans ce contexte, un modèle d'éolienne a été construit dans le but d'appliquer une technique de contrôle (MPPT) au niveau des turbines pour une extraction maximale, puis de se familiariser avec le modèle de fabrication d'un double générateur asynchrone à l'aide d'un dispositif de contrôle électronique.

Tout d'abord, nous avons présenté une étude sur les énergies renouvelables et les principaux concepts qui ont été donnés aux éoliennes.

Deuxièmement, nous avons clairement décrit les différents composants d'une turbine. Enfin, nous avons créé un modèle mathématique du générateur.

Troisièmement, un modèle de la machine considérée a été développé en utilisant la transformation du Park. Un contrôle vectoriel est utilisé pour contrôler et échanger indépendamment la puissance active et réactive entre l'appareil et le réseau. La connexion de la commande vectorielle à un régulateur de vitesse PI classique a montré de bonnes performances.

En outre, nous avons montré comment utiliser la commande MLI et un onduleur triphasé (modulation de largeur d'impulsion) de type SVM à l'aide de l'environnement logiciel Matlab. Ainsi, la spécialisation fait partie des éoliennes industrielles modernes consistant en un générateur asynchrone avec une double source d'énergie car elle fournit non seulement des solutions pour une variation continue du vent, mais permet également un transfert d'énergie optimal vers le réseau.

Dans cette partie, nous avons appliqué la technique de modification vectorielle SVM Pour réduire les ondulations de tension et de courant.

Conclusion générale

En perspective comme solution, Nous proposons de mettre en œuvre un système hybride (énergie solaire + énergie éolienne) comme la meilleure solution proposée pour améliorer les problèmes auxquels nous sommes confrontés dans notre système de discussion.

ANNEXES

Annexe A

A.1) 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	0.15568
Inductance magnétisante M	0.15
Nombre de paires de pôles P	2
Inertie J	0.2
Fréquence f	0.001
Vitesse synchronisme $\omega_s = 2\pi f$	314 rad/s
La tension simple de réseau V_s	220V

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

A.2) PARAMETRE DE REGULATEUR

Tableau :Gains des régulateurs utilisés

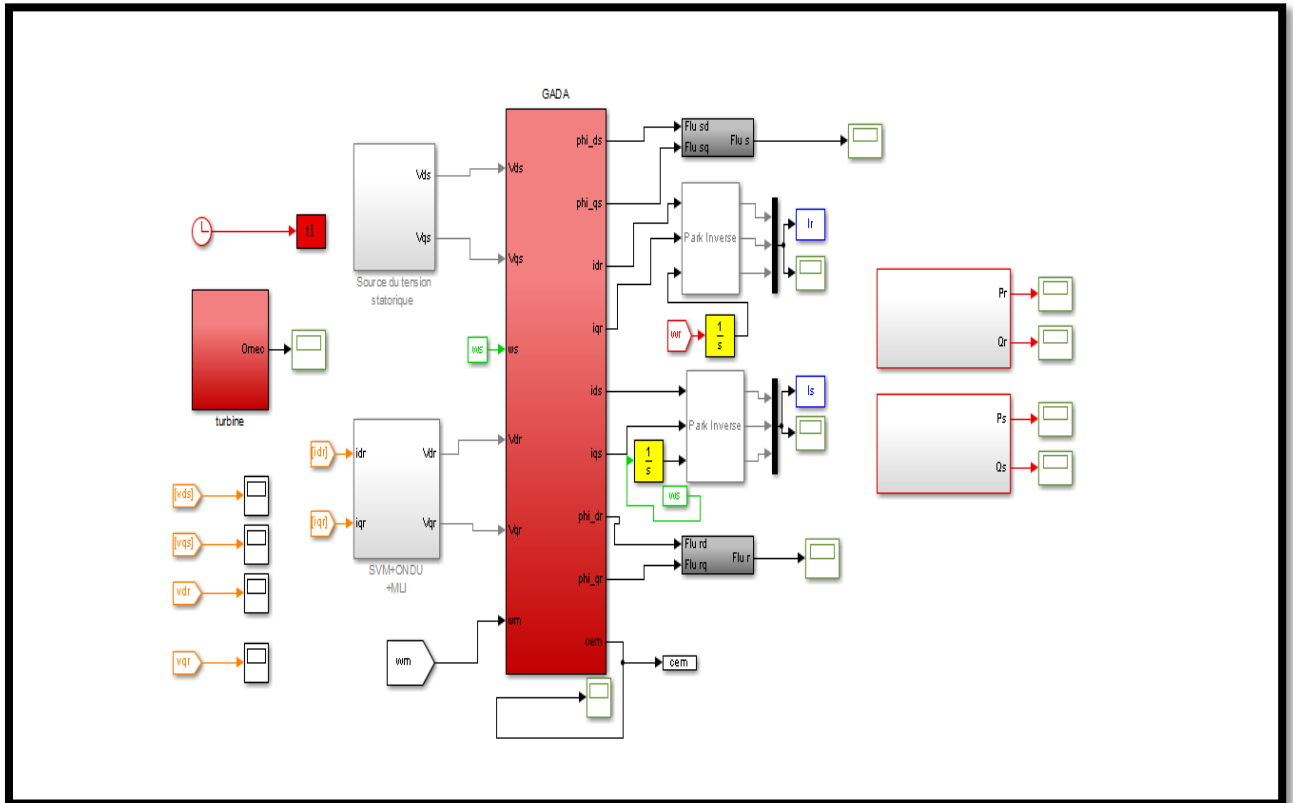
Méthode	Commande directe	Commande indirecte BO	Commande indirecte BF	
Grandeurs	Puissances	Courants	Courants	Puissances
	1.255429263	124.546	124.546	1.25549263
	9.3791	937.93	93793	9.3703

A.3) PARAMETRES DE LA TURBINE

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

Annexe B

B) SIMULATION DE L'ENSEMBLE (GADA+ COMMANDE VECTORIELLE + CONVERTISSEUR (AC/AC) +TURBINE) :



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Bull, St.R.** Renewable energy today and tomorrow. Proc. IEEE, vol. 89, 2001, pp. 1216–1226.
- [2] **M. Rapin, J.M. Noël**, “Energie Eolienne, principe - Etude de cas”, Dunod, ISBN: 978-2-10-050801-3, 2010.
- [3] **H.Ben Ahmed O.Gergaud, B.Multon**. Mode'éolisation d'une chaine de conversion'éolienne,Electrotechnique du Futur 2001, pp.17-22. Nancy, novembre, 2001.
- [4] **F. Poitiers** - « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne » Thèse Doctorat de l'Université de Nantes, France, Décembre 2003.
- [5] **R. Drareni et Z. Ouahrani** - « Commande d'un Aérogénérateur à Base d'une Machine Asynchrone à Cage Connectée au Réseau à Travers un Convertisseur AC-DC-AC »Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique,10 AV. Hassen.
- [6] **5 IEEE Canadian Review** - Summer/ Été 2002.
- [7] **Le groupe EDF** - « L'Energie Eolienne » Estimation d'un Projet Eolien France, Octobre 2008.
- [8] **Y. A. Bencherif** - « Modélisation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la Production de l'Energie Eolienne »Mémoire d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, de l'Ecole Nationale Polytechnique,10 AV. Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie, Juin 2008.
- [9] **Bernard MULTON** 1 , Olivier GERGAUD 1 , Hamid BEN AHMED 1 , Xavier ROBOAM 2 , Stéphan ASTIER 2 , Brayman DAKYO 3, Cristian NICHITA3 1LÉSIR , «Etat de l'art dans lesaérogénérateurs électriques », Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure deCachan Campus de Ker Lann 35170 BRUZ 2LEEI ENSEIHT Toulouse,3GREAHUniversité du Havre.
- [10] **Vincent COURTECUISSÉ**, «Supervision d'une centrale multi sources à based'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat, L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2008.
- [11] **Haritza CAMBLONG** « Minmisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génératrice d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables » Thèse doctorale, Ecole nationale Supérieure d'Art et Métriers Centre de Bordeaux, soutenue le 18 décembre 2003.
- [12] **Naouel HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Mémoire de magister Université MENTOURI de CONSTANTINE 24 /01/2008.
- [13] **CHERFIA NAÏM** « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » MAGISTER EN ÉLECTROTECHNIQUE, Université Mentouri Constantine, Algérie, Soutenu le : 07/ 06 / 2010.

- [14] **TOUAL Belkacem** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Mémoire de magister Université de Batna 2010.
- [15] **Mayouf Mesaoud**, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.
- [16] **Dr. Gary L. Johnson**, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001.
- [17] **A.Boyette**, « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat /Université de Henri Poincaré, Nancy, France, Décembre 2006.
- [18] **Y. Bekakra**, « Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées »,Mémoire de Magister, Centre Universitaire d'El-Oued, 2010.
- [19] **R. Abdessamed**, «Modélisation des machines électriques», Presse de l'université de Batna 1997.
- [20] **A. Tamarat**, « modélisation d'une chaine de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra,2009.
- [21] **D. Aouzellag, K. Ghedamsi**, E.M. Berkouk, «Network power flux control of a wind generator», Renewable Energy, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [22] **Y. Bekakra D. Ben Attous**, «Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion», Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 12, pp. 2274-2286, 2011.
- [23] **Y. Bekakra, D. Ben attous**, « DFIG sliding mode control driven by wind turbine with using a SVM inverter for improve the quality of energy injected into the electrical grid», ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications, Vol.11, No. 1, pp. 63-75, February 2013.
- [24] **C. Bennour**, «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, université de Biskra, 2012.
- [25] **P.Leeconte**, M.Rapin, E.Szechenyi « éolienne »,Technique de l'ingénieur, BM 4640.
- [26] **A. Dendouga**, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine adouble alimentation (DFIM) ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 10/02/2010.
- [27] **D.Kairous**, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie 2013.
- [28] **S. Hamecha**, « Etude et commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à aimants Permanents ». Thèse doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Alger, Le 13 Juin 2013.

- [28] **N. Hamdi**, « Amélioration des performances des aérogénérateurs ». Thèse doctorat, Université Mentouri de Constantine, Alger, Le 03/ 07/ 2013.
- [29] **F. KENDOULI**, « Centrale éolienne et qualité de énergies électrique ». Thèse doctorat, À l'Université Mentouri de Constantine 2012.
- [30] **Y. Soufi**^{a,*}, **T. Bahi**^b, **S. Lekhchine**^b, **D. Dib**^a, « Performance analysis of DFIM fed by matrix converter and multi level inverter ». *Energy Convers Manage.* 72 (2013) 187–193.
- [31] **F. Boumaraf**, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 24 Juin 2014.
- [32] **H. Amimeur**, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, 27/06/2012.
- [33] **K. Belmokhtar**, **M.L. Doumbia**, **K. Agbossou**, « Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator) ». *Energy*, Vol. 76, 2012, pp. 679-693.
- [34] **S. Abdeddaim**, **A. Betka**, **S. Drid**, **M. Becherif**, « Implementation of MRAC controller of a DFIG based variable speed grid connected wind turbine ». *Energy Convers Manage.* 79 (2014), pp. 281–288.
- [35] **K. Ouari**^a, **T. Rekioua**^{a,*}, **M. Ouhrouche**^b, « Real time simulation of nonlinear generalized predictive control for wind energy conversion system with nonlinear observer ». *ISA Transactions*, Vol. 53, 2014, pp. 76-84.
- [36] **A. Ourici**, « Double flux orientation control for a doubly fed induction machine ». *Electrical Power and Energy Systems* 43 (2012) 617–620.
- [37] **O. Bouhali**, « Contribution des convertisseurs multi niveaux au raccordement d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [38] **Y. Mihoub**, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone ». Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 08 février 2012.
- [39] **O. e-Mun**, « Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink ». Prentice hall, 1998.
- [40] **R. Rouabhi**, **R. Abdessemed**, **A. Chouder**, **A. Djerioui**, « Hybrid Backstepping Control of a Doubly Fed Wind Energy Induction Generator ». *The Mediterranean Journal of Measurement and Control*, Vol: 11, N: 1, January 2015, pp. 367-376.
- [41] **R. Rouabhi**, **R. Abdessemed**, **A. Chouder**, **A. Djerioui**, « Power Quality Enhancement of Grid Connected Doubly-Fed Induction Generator Using Sliding Mode Control ». *International Review of Electrical Engineering*, Vol: 10, N: 2, March-April 2015, pp. 266-276.

Bibliographie

[42] **R. Rouabhi, A. Djerioui**, « Control of the power generated by variable speed wind turbine driving a doubly fed induction generator ». *Journal of Electrical Engineering*, Vol: 14 /2014-Edition:3, pp. 1-7.

[43] **S. EL AIMANI**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de doctorat, École Centrale De Lille 2004.

ملخص

Abstract – Résumé–

ملخص:

يتعلق هذا العمل بالنمذجة والتحكم في توربينات الرياح في سرعة متغيرة تعتمد على المولد غير المتزامن ثنائي الطاقة (GADA) للحصول على طاقة عالية متبوعا بمعدل تباطؤ (MLI) تم تطوير خوارزمية تحتماتلاب محاكات

Matlab/Simulink

الكلمات المفتاحية:

توربينات الرياح-مولد غير متزامن مزود بمصدر طاقة مزدوج- نطاق التباطؤ (MLI)- عاكس ثلاثي الطور بمستويين

Résumé

Ce travail porte sur la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pour les fortes puissances, suivie d'un redresseur MLI à bande d'hystérésis. Un algorithme est développé sous Matlab/Simulink.

Motsclés

Éolienne - générateur asynchrone avec double alimentation - plage de ralenti (MLI) - onduleur triphasé à deux niveaux

Abstract

This paper describes the modeling and control system of a wind turbine for high power using a variable speed doubly fed induction generator (DFIG) with a hysteresis band Pulse Width Modulation (PWM) rectifier. The algorithm has been developed using Matlab/Simulink

Key words:

Wind turbine - asynchronous generator with dual power supply - idle range (PWM) - three-phase inverter with two levels

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

SPECIALITE : ENERGIE RENOUVELABLE

Proposé et dirigé par **M^r : D^r. KHODJA Djalal Eddine**

Présenté par : **BOUCHERIF Abir & DJEBLAHI Soumia**

Thème

Commande d'une Génératrice Asynchrone dans une Chaine de Conversion d'Energie

Résumé

Ce travail porte sur la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pour les fortes puissances, suivie d'un redresseur MLI à bande d'hystérésis et d'une batterie pour stocker l'énergie emmagasiné.

Mots clés

Turbine éolienne - GADA - MLI à bande d'hystérésis.

N° d'ordre : **CSE-016**