

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : ELECTROMECHANIQUE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION :

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de
Master en électromécanique**

Option : Maintenance des équipements industriels

Par :

SOUADIA Badr Eddine

ZIOUECHE Mohamed

Intitulé

**Modélisation et simulation de la commande d'une
centrale éolienne utilisant une génératrice asynchrone
double alimentation (GADA).**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BERRABEH Fouad	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. ZOUGGAR El Oualid	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr. ROUABHI Riyadh	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الشكر والعرفان

نود أن نشكر الله أولاً وقبل كل شيء جبار من أجل الإرادة والصحة والصبر الذي أعطانا إياه خلال كل هذه السنوات الطويلة

كما نود أن نعرب عن خالص شكرنا لمشرفنا السيد زوقار الوليد لاقتراحه هذا لأول مرة موضوع، للمراقبة المستمرة من خلال تحقيق هذه الأطروحة والذي لم يتوقف عن إعطائنا نصائحه.

نود أن نشكر بصدق كل أولئك الذين لديهم ساعد في تطوير وإنتاج هذه الرسالة وكذلك لكل نتوجه بالشكر أيضاً إلى جميع من ساعدنا بشكل مباشر أو غير مباشر على إنجاز هذا العمل معلمي قسم الهندسة الكهربائية الذين ساهموا في أعمالنا.

خالص شكرنا لجميع أعضاء لجنة التحكيم الذين مقبول للحكم على عملنا.

أخيراً، نود أن نعرب عن امتناننا لجميعنا الأصدقاء والزملاء للدعم المعنوي والمادي....

Mes vives salutations.

إهداء

إلهي لا يطيب الليل الا بشكرك ولا يطيب النهار إلى بطاعتك.. ولا تطيب اللحظات إلا بذكرك.. ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك .. وال تطيب الجنة إلا برويتك

الله جل جلاله

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة.. إلى نبي الرحمة ونور العالمين

سيدنا محمد صلى هلا عليه وسلم

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار.. إلى من علمني العطاء بدون انتظار.. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار.. أرجو من الله أن يمد في عمرك لتري ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد والدي العزيز

إلى ملاكي في الحياة.. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني.. إلى بسمه الحياة وسر الوجود

إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي.. إلى أغلى الحبايب

أمي الحبيبة

إلى النور الذي ينير ظلمة حياتي.. إلى من بوجودها أكتسب قوة ومحبة لا حدود لها.. إلى من عرفت معها معنى الحياة

أخويا سند ضهري

إلى الذين تسكن صورتها وأصواتها أجمل اللحظات والأيام التي عشته في حياتي

اختي رحمها الله

نود أن نعرب عن امتناننا لجميعنا الأصدقاء والزلاء

الطالب سواعدية بدرالدين

إهداء

أحمد الله عز وجل على منه وعونه لإتمام هذه المذكرة.

إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له آماله، إلى من كان يدفعني قدما نحو الأمام لنيل
المبتغى، إلى الإنسان الذي إمتلك الإنسانية بكل قوة، إلى الذي سهر على تعليمي بتضحيات
جسام

مترجمة في تقديسه للعلم، إلى مدرستي الأولى في الحياة،

أبي الغالي علي قلبي أطل الله في عمره؛

إلى التي وهبت فلذة كبدها كل العطاء والحنان، إلى التي صبرت على كل شيء، التي
رعتني

حق رعاية وكانت سندي في الشدائد، وكانت دعواها لي بالتوفيق، تتبعني خطوة خطوة
في عملي، إلى من إرتحت كلما تذكرت إبتسامتها في وجهي **نبح الحنان أمي** أعز ملاك على

القلب والعين جزاها الله عني خير الجزاء في الدارين؛

إليهما أهدي هذا العمل المتواضع لكي أدخل على قلبهما شيئا من السعادة إلى إخوتي

و أخواتي الذين تقاسموا معي عبء الحياة ؛

؛ إلى كل أساتذة **قسم الهندسة الكهربائية**؛

و إلى كل من يؤمن بأن بذور نجاح التغيير هي في ذواتنا و في أنفسنا قبل أن تكون في

أشياء أخرى...

قال الله تعالى : " إن الله لا يغير ما بقوم حتى يغيروا ما بأنفسهم...."

الآية 11 من سورة الرعد

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل

الطالب : زيواش محمد

Table des Matières

Chapitre I : Modélisation De La Chaîne éolienne

I.1.Introduction:.....	2
I.2.Energie éolienne en Algérie:	2
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	14
I.2.1 Critères de choix d'un site éolien :	3
I.2.2. Potentiel éolien en Algérie :	3
I.2.3 Capacité de production de l'énergie éolienne en Algérie :	4
I.3. Modélisation De la turbine éolienne:.....	5
I .3.1 Conversion de l'énergie éolienne :	5
I .3.2. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :	6
I .3.3. Modélisation du vent :	7
I .3.3.1. Puissance mécanique du vent :	7
I .2.3.2. Paramètres aérodynamiques de l'éolienne :	8
I.3.Commande indirecte de la vitesse :	12
I.4. Résultats de simulation :	14
I.4.1. Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse :..	16
Conclusion :	17

Chapitre II:Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1. Introduction :	19
II .2. Différentes topologies de la MADA :	19
II .2.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Bushes » :	19
II .2.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné :	20
II .2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :	20
II .2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Kramer :	21

II .2.2.3. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Sacheries avec Cyclo convertisseur :	22
II.2.2.4. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Sacheries avec Convertisseur MLI :	22
II.3. Description de la machine asynchrone à double alimentation :	23
II.3.1. Emploi des machines asynchrones à double alimentation :	24
II.4.1. Principe de fonctionnement de la MADA :	25
II. 4.2 Fonctionnement de la MADA à quatre quadrants :	26
II.5. Etude de la puissance pour la MADA :	28
II.6. Les formes Application des machines asynchrones à double alimentation :	28
II.6.2. Application génératrice (Fonctionnement en génératrice à vitesse variable) :	. 29
II. 6.3. Domaine d’applications de la GADA :	29
II. 6.4. Application de la MADA dans les systèmes éoliens (GADA):	29
II.7. Modélisation de la machine (génératrice) asynchrone à double alimentation :	29
II .7. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :	30
II.7.1 Modèle mathématique de la MADA dans le référentiel général :	30
II.7.2 Hypothèses simplificatrices :	30
II .7.3. Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc) :	30
II.8. Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park) :	33
II.8. 1.La transformation de Park appliquée aux équations statiques nous donne :....	34
II.8.2.La transformation de Park appliquée aux équations rétorque nous donne:	34
II.8.3. Equations électriques :	34
II.8.4. Les équations magnétiques :	34
II.8.5. Equation mécanique :	35
II.8.6. Le couple électromagnétique :	35
II.8.7. Les puissances actives et réactives échangées avec le réseau électrique dépendent aussi des variables électriques du stator et du rotor :	35

II.9. Modèle d'état de Park de la MADA :	35
II.10. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA) :	35
Conclusion :	37

Chapitre III: Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

III.1. Introduction :	39
III.2. Principe de la commande vectorielle avec l'orientation du flux magnétique :	39
III.2.1. Equations électriques :	40
III.2.2. Equations magnétiques :	40
III.3. Commande directe basée sur l'orientation du flux statorique :	43
IV. Conclusion	49
Conclusion générale	50
BIBLIOGRAPHIE	51
Les paramètres	53
1- Les paramètres de la machine à induction double alimentée:	53
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE	54
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	54

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)	4
Figure I.2: Ferme éolienne à Adrar.	5
Figure I.3: Configuration générale d'un système éolien.	6
Figure I.4: Représentation d'une colonne d'air.....	7
Figure I.5: Vitesse du vent v et vitesse tangentielle $Rt \ \Omega t$	9
Figure I.6: Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.	10
Figure I.7: Modèle mécanique du système éolien.....	11
Figure I.8 : Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.	12
Figure I.9 : Commande indirecte de vitesse.....	14
Figure I.10: coefficient de vitesse réduite (vitesse spécifique) λ	14
Figure I.11 : Coefficient de puissance C_p	15
Figure I.12 : la vitesse du vent appliqué à la turbine.	15
Figure I.13: La Vitesse mécanique.....	16

Chapitre II

Figure II.1: MADA à double stator.....	19
Figure II.2: MADA Bushes.....	20
Figure II.3 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique...	21
Figure II.3 : MADA, structure Kramer.	21
Figure II.4 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.	22
Figure II.5: Structure de Scherbius avec MLI.....	23
Figure II.6: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	23
Figure II.7 : Système à vitesse variable par double alimentation	24
Figure II.9 : Structure de la MADA sans balais.....	24
Figure II.8 : Schéma du rotor de la MADA	24
Figure II.10 : Configuration des enroulements et des flux dans une MADA	25
Figure II.11 :Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone hypo Synchrone.....	27
Figure II.12 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	27
Figure II.13 :Fonctionnement en mode génératrice	27
Figure II.14 :Fonctionnement en mode génératrice	27

Figure II.15: Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée.....	31
Figure II.16: Transformation des variables statiques et rétorques.....	33
Figure II.17: Transformation des variables statiques et rétorques.....	36
Figure II.18 : Les tensions d'alimentations au rotor.....	36
Figure II.19 : Les courants statoriques triphasés avec un zoom.....	36
Figure II.20 : Les courants rotoriques triphasés avec un zoom.....	37
Figure II.21 : Le couple électromagnétique.....	37

Chapitre III

Figure III 1.: Principe de control vectoriel sans boucle de puissance.....	44
Figure III.2: Schéma bloc du système à réguler.....	45
Figure III.3: Schémas globale de l'ensemble (GADA+ commande Vectorielle+ +turbine).	47
Figure III.4: Puissance active statorique mesure.....	48
Figure III.5: Puissance réactive statorique mesure.....	50
Figure III.6 : le courant et rotorique I_{rd} et I_{rq}	51
Figure III.7 : le courant et rotorique I_{sd} et I_{sq}	52
Figure III.8 : le courant et rotorique.....	53
Figure III.9 : le courant et rotorique + ZOOM.....	54
Figure III.10: le courant statorique.....	55
Figure III.11 : le courant statorique + ZOOM.....	56
Figure III 12: le couple électromagnétique.....	57
Figure III 13 Flux statorique et rotorique.....	58

Liste des Tableaux

Tableau II.1: Etude de la puissance pour la MADA.....	1
Tableau III.1 :Les paramètres de la machine(GADA).....	2
Tableau III.2: Les paramètres de la turbine éolienne utilisée.....	3

Symboles spécifiques à la turbine

V_v	Vitesse du vent
Pa_{er}	Puissance aérodynamique
λ	Ration de Vitesse
C_p (λ, β)	Coefficient de puissance
β	Angle d'orientation des pales
ρ	Masse volumique de l'air
S	Surface circulaire balayée par la turbine
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine
R_t	Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.
C_t	Couple de la turbine.
J	Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolienne.
J_t	Moment d'inertie de la turbine.
J_m	Moment d'inertie de la GADA.
F_v	Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA.
C_m	Couple mécanique sur l'arbre de la GADA
C_{em}	Couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA
G	Gain du multiplicateur
Ω_m	Vitesse de rotation de la GADA
N_r et N_s	Nombre de spires des bobinages rotorique et statorique
g	Glissement
p	Nombre de paires de pôles
u	Rapport de transformation rotor/stator
ω_s et ω_r	Pulsations statorique et rotorique de la GADA.
R_s, R_r	Résistance statorique et rotorique
i_{as}(t), i_{bs}(t) et i_{cs}(t)	Courants statoriques des phases a, b et c
v_{as}(t), v_{bs}(t) et v_{cs}(t)	Tensions statoriques.
φ_{as}(t), φ_{bs}(t) et φ_{cs}(t)	Flux de stator
i_{ar}(t), i_{br}(t) et i_{cr}(t)	Courants rotoriques des phases a, b et c
v_{ar}(t), v_{br}(t) et v_{cr}(t)	Tensions rotoriques.
φ_{ar}(t), φ_{br}(t) et φ_{cr}(t)	Flux de rotor
L_s, L_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques

LISTE DES SYMBOLES

Ms, Mr	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
Vsd, Vsq, Vrd, Vrq,	Tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.
Isd, Isq, Ird, Irq,	Courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
Isd, Isq, Ird, Irq,	Flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
ICCG ,iCCR	Courants issus des deux convertisseurs
Vdc	Tension du bus continu
Fem	Forces électromotrices

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les énergies renouvelables conduit à une croissance rapide de la filière éolienne à l'échelle mondiale. Grâce à la diminution du coût d'installation et à l'application des technologies Le contexte politique, économique et énergétique actuel très favorable aux développements avancés basées sur l'électronique de puissance, la filière éolienne se développe très rapidement et sa part dans le mix énergétique devient de plus en plus importante. L'énergie éolienne fait aujourd'hui partie du paysage des producteurs d'électricité et représente déjà dans certains pays une part significative de la capacité totale de production d'électricité.

L'aspect le plus visible de cette évolution est sans conteste celui des installations d'éoliennes de grande taille, reliées aux réseaux électriques. Les coûts pour ces grandes éoliennes ont diminué jusqu'au point où ils commencent à être comparables aux technologies traditionnelles de production d'électricité.

Un autre aspect, moins visible mais qui a tout autant d'importance, est celui des petites unités de production. En effet, ces dernières sont de plus en plus prisées pour des fonctionnements autonomes pour assurer l'alimentation de sites isolés et/ ou autonome

Dans le cas de l'utilisation en centrales autonomes, un intérêt de plus en plus croissant est accordé aux systèmes de conversion à base de machines asynchrones à rotor bobiné. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre cette catégorie de machine, du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor.

Cependant, quelle que soit la machine utilisée, le fonctionnement en générateur autonome se distingue par des contraintes et des spécificités autres que celles rencontrées dans le cas des grandes centrales éoliennes. En, effet la préoccupation principale de ce fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes quelles que soit la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée dans une certaine plage. Ceci passe alors par la mise en œuvre d'une commande du système éolien. A ce point s'ajoute le facteur économique, en effet le coût doit être modéré dans le cas de centrales éoliennes autonomes

Notre travail consiste à étudier et à évaluer les performances d'un système éolien autonome à base d'une machine asynchrone double alimentée totalement interfacée, permettant de produire une puissance nécessaire pour l'alimentation d'un site isolé. Pour ce faire, ce mémoire sera organisé comme suit[A] :

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le premier et Le deuxième chapitre abordera la modélisation de la turbine de conversion éolienne étudiée (Turbine, MADA et Convertisseurs).

Le troisième chapitre

- Sera dédié à la présentation de la technique de commande vectorielle de la MADA.
- Donnera les résultats de simulation du système global autonome.

Chapitre I

Modélisation De la turbine éolienne

I.1.Introduction :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent le plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes

Dans ce chapitre, on va présenter l'historique et la définition de l'énergie éolienne d'une manière générale, et l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies.

Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production de l'énergie par les éoliennes dans le monde, ainsi que les différents types de ces appareils[1].

I.2.Energie éolienne en Algérie :

En l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre à cause d'une topographie et d'un climat très diversifiés [2].

I.2.1 Critères de choix d'un site éolien :

Le choix d'un site est déterminant quant à l'efficacité de l'éolienne. Un site intéressant doit afficher une moyenne de vent supérieure à 4 m/s et présenter une grande régularité. En effet, pour produire de l'électricité, des vents initiaux de 2.7 m/s sont nécessaires afin d'amener le rotor de l'éolienne à effectuer en moyenne de 18 à 28 tours à la minute. La moyenne des vents constitue une bonne indication pour le choix d'un site. Cependant, la mesure de la régularité des vents présents ainsi que la dispersion de ces vents sont des données indispensables dont il faut tenir compte. La détermination du potentiel éolien d'un site ne constitue toutefois pas l'unique facteur à considérer pour choisir un site. D'autres aspects tels l'occupation et la vocation du territoire, l'accès au réseau d'électricité, les contraintes physiques liées à l'aménagement des éoliennes et la protection de l'environnement sont autant d'éléments qui influencent la sélection du site [2].

I.2.2. Potentiel éolien en Algérie :

Selon quelques évaluations, près de cinq millions d'algériens ne sont pas raccordés au réseau d'électricité, alors que beaucoup de communautés rurales ont besoin d'eau potable et d'eau pour l'irrigation. Ces besoins ruraux représentent un marché potentiel pour des technologies d'énergie renouvelable. L'Algérie doit s'engager sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Malgré un potentiel assez faible, le programme ne doit pas exclure l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner selon des estimations du Centre de Développement des Energies Renouvelables les 3% de la production d'électricité vers 2030. L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée est nécessaire avant toute éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement d'un atlas éolien de la région. On peut citer quelques travaux effectués pour tracer l'Atlas du vent en Algérie. En 2000, la carte des vents a été tracée par Kas Badji-Marzouk en utilisant les données répertoriées en 1990 par Hamouche. La carte a été réajustée par le même auteur en 2006 avec laquelle Kas Badji-Marzouk a présenté sa thèse de doctorat. En 2011, Cheulai et al ont contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [2].

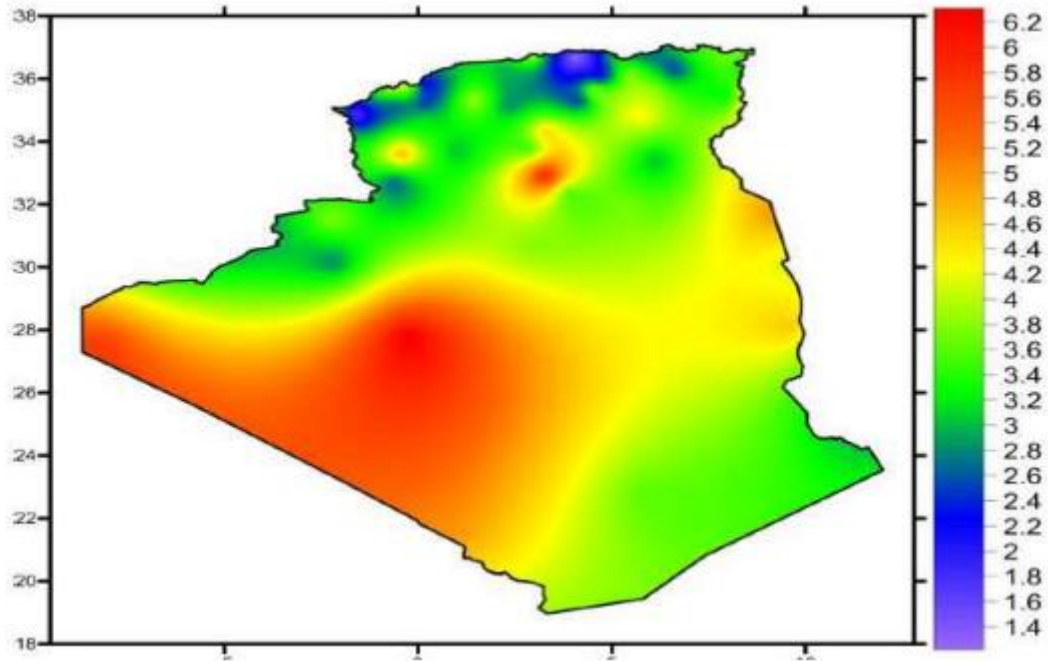


Figure I.1: Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

La carte ci-dessus est tracée en introduisant des vitesses moyennes annuelles fournies par 24 stations météorologiques situées près des frontières algériennes. Les mesures sont effectuées durant la dernière décennie à 10 m du sol.

Selon la cartographie représentée à la **figure I.1**, le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre, mais on peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud du pays et particulièrement dans la région du sud-ouest où la vitesse du vent est plus grande que 6 m/s.

I.2.3 Capacité de production de l'énergie éolienne en Algérie :

Jusqu'à maintenant, la puissance extraite à partir des énergies renouvelables installée en Algérie est insignifiante, au moins par rapport à ses voisins (le Maroc et la Tunisie). Malgré un potentiel assez faible, un programme ambitieux n'exclut pas de voir la part de l'éolien avoisiner les 3% (1,7 GW) de la production d'électricité à l'horizon 2030. Il est clair donc que l'énergie éolienne constitue un second axe de développement des énergies renouvelables en Algérie (après le solaire). Dans ce cadre, la wilaya d'Adrar a bénéficié, à la faveur d'un partenariat Alger-français, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune, localisée dans la zone de Kabertene (80 km au nord d'Adrar).

Les éoliennes fournies par l'Espagnol Games délivrent leurs 10 MW de puissance à la vitesse de 8 m/s du vent. Ces éoliennes sont connectées au réseau de transport. Par ailleurs, des études seront menées pour identifier les emplacements favorables afin de réaliser d'autres

Chapitre I : Modélisation De la turbine éolienne

projets sur la période 2016-2020. À cet effet, ce programme consiste en l'acquisition de 10 stations de mesure météorologique [2].



Figure I.2: Ferme éolienne à Adrar.

Pour favoriser le développement à grande échelle de l'éolien en Algérie, il faut encourager la production locale de matériel éolien et parvenir à un taux d'intégration d'au moins 50% dans une première phase.

I.3. Modélisation De la turbine éolienne:

I .3.1 Conversion de l'énergie éolienne :

Une éolienne (ou aérogénérateur) est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse, sans lequel la génératrice ne peut débiter, car sa vitesse de rotation ne peut être trop faible. L'énergie mécanique reçue sur l'arbre de rotation de la génératrice électrique est ainsi transformée en énergie électrique.

Dans notre cas, le système éolien est constitué principalement des organes suivants :

- Une turbine à axe horizontal comprenant trois pales orientables et possédant des coefficients propres d'inertie, d'élasticité et de frottement par rapport à l'air et par rapport au support de la turbine.
- Une boîte multiplicatrice de vitesse de gain G .
- Une génératrice possédant une inertie et un coefficient de frottement.

Chapitre I : Modélisation De la turbine éolienne

- Dans cette partie, nous décrivons les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie [3.4].

I .3.2. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [5] :

- la vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique.
- le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être ignoré.
- les pertes par frottement du rotor de la turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

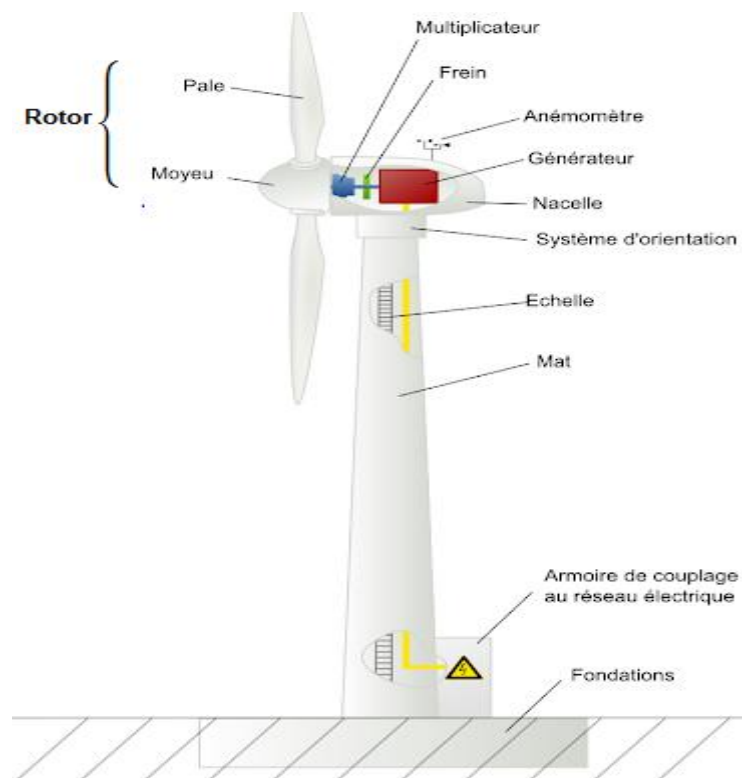


Figure I.3: Configuration générale d'un système éolien.

I.3.3. Modélisation 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.

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 [6].

I.3.3.1. Puissance mécanique du vent :

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 [m²] de masse volumique ρ en [Kg/m³], animée d'une vitesse v (en m/s), s'écrit comme indiqué dans **la figure I.3** :

$$dE_c = \frac{\rho S dx v^2}{2} \dots \dots \dots I.1$$

E_c : En joule

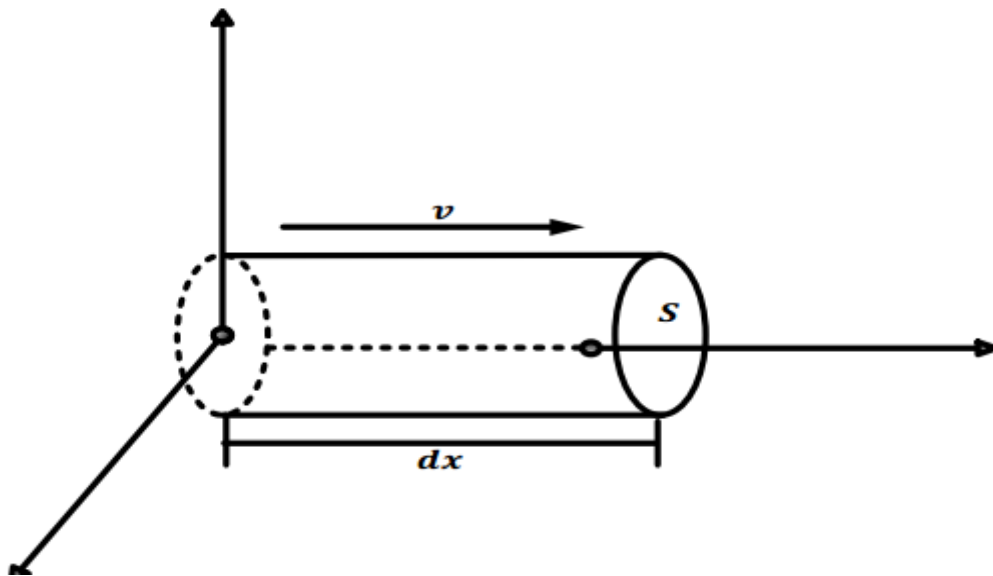


Figure I.4: Représentation d'une colonne d'air.

Chapitre I : Modélisation De la turbine éolienne

L'énergie cinétique de cette colonne d'air de longueur dx est donc :

$$dE = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot v_v^2 \dots \dots \dots I.2$$

Avec :

$dm = \rho \cdot S \cdot dx$ Masse de cette colonne d'aire.

Or nous savons que : $V_v = \frac{dx}{dt}$

D'où

$$dE = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot dt \dots \dots \dots I.3$$

On en déduit ainsi l'expression de la puissance disponible :

$$P_{vent} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \dots \dots \dots I.4$$

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable que traverse une certaine surface

$S = \pi \cdot R^2$. La puissance est proportionnelle au cube la vitesse du vent :

Avec :

- P_{vent} : puissance mécanique du vent [w].
- ρ : masse volumique de l'air [kg/m^3].
- V_v : vitesses instantanée du vent [m/s].
- R : longueur de la pale [m].
- E : énergie cinétique du vent [J].

I.2.3.2. Paramètres aérodynamiques de l'éolienne :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

a) Puissance mécanique de la turbine :

En tenant compte de l'expression (I.4), la puissance aérodynamique extraite à partir de la puissance du vent peut donc être écrite comme suit :

$$P_t = C_n \cdot P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p \cdot V_v^3 \dots \dots \dots I.5$$

Avec :

- p_t : puissance aérodynamique de la turbine de vent [w]
- C_p : coefficient de puissance représentant le rendement de l'énergie du vent .

b) Coefficient de puissance de la turbine

Malheureusement, pour les éoliennes, le C_p n'est pas constante, les paramètres les plus communes sur les quelles C_p dépend sont le 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. (I.5)**

$$\text{Alors : } \lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \dots \dots \dots \text{I.6}$$

Où :

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

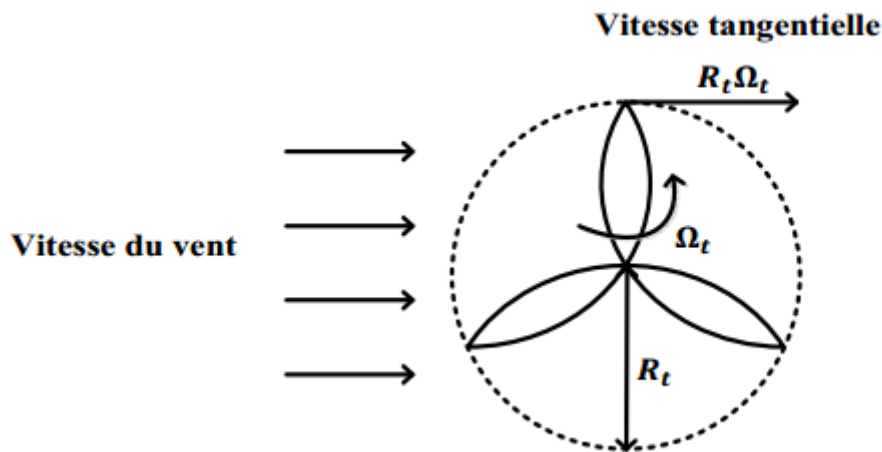


Figure I.5: Vitesse du vent v et vitesse tangentielle $R_t \Omega_t$

$C_p(\lambda, \beta)$ - 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 (I. 5)

$$C_p(\lambda, \beta) = [0,5 - 0,0167(\beta - 2)] \sin[\pi(\lambda + 0,1)18,5 - 0,3(\beta - 2)] - 0,00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad \text{(I.7)}$$

Chapitre I : Modélisation De la turbine éolienne

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales β , (Figure II-6), permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ($C_p = 0.5$) qui correspond aux valeurs optimales $\lambda = 9.2$ et $\beta = 2$. Avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale

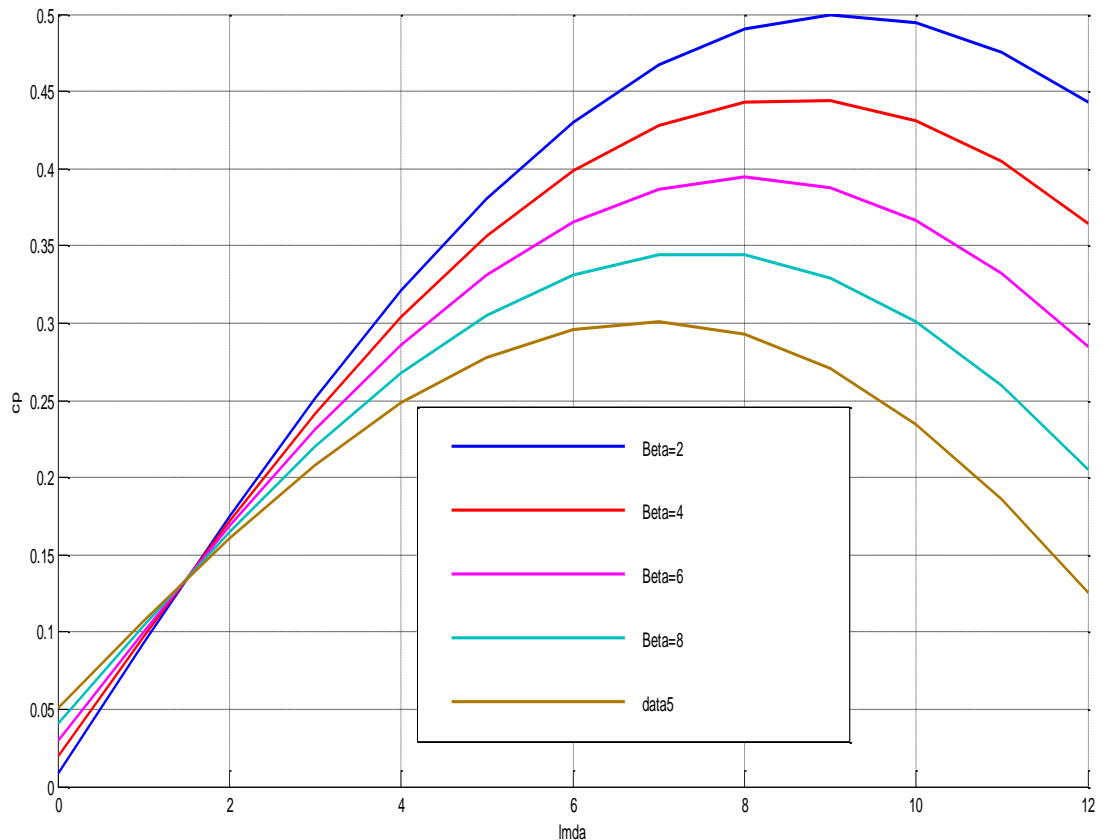


Figure I.6: Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales.

c) Vitesse spécifique :

Afin de permettre une utilisation pratique du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ on introduit habituellement la vitesse spécifique λ donnée par l'expression suivante

$$\lambda = \frac{R_t \Omega_t}{v} \dots \dots \dots \mathbf{I.8}$$

d) Couple mécanique de la turbine :

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \right) \cdot \left(\frac{R_T}{V \cdot \lambda} \right) \dots \dots \dots \mathbf{I.9}$$

$$C_T = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R_T^2 \cdot V^2}{\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \dots \dots \dots \mathbf{I.10}$$

e) Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur transforme la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique de la turbine en couple d'entraînement de la génératrice selon les expressions suivantes :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{turb} \dots\dots\dots I.11$$

$$C_{mec} = \frac{C_{turb}}{G} \dots\dots\dots I.12$$

Avec:

- Ω_{mec} : Vitesse de rotation de la génératrice [rad/s]
- G : Gain du multiplicateur
- Ω_{turb} : Vitesse angulaire de rotation de la turbine [rad/s]
- C_{mec} : Couple de la génératrice [Nm]
- C_{turb} : Couple aérodynamique de la turbine [Nm]

f) Equation dynamique de l'arbre de transmission :

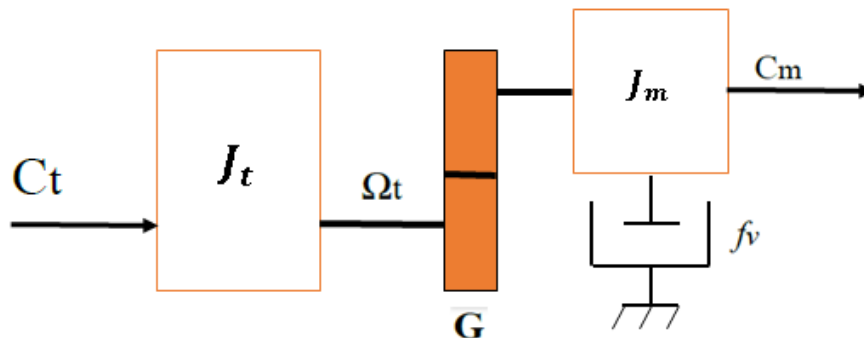


Figure I.7: Modèle mécanique du système éolien.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique à partir du couple mécanique exercé sur l'arbre du rotor de l'éolienne T_{mec} et le couple électromagnétique T_{em} :

$$j \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \dots\dots\dots I.13$$

$$\Omega_{mec} = \frac{d\Omega_{mec}}{dt}$$

Chapitre I : Modélisation De la turbine éolienne

- J : moment d'inertie global de la turbine éolienne [kg. m²]
- C_{em} : couple électromagnétique [N. m]
- f : coefficient de frottement mécanique de la turbine éolienne [N. m. s/rd]

A partir des expressions précédentes le schéma bloc correspondant a modélisation de la turbine peut être déduit.

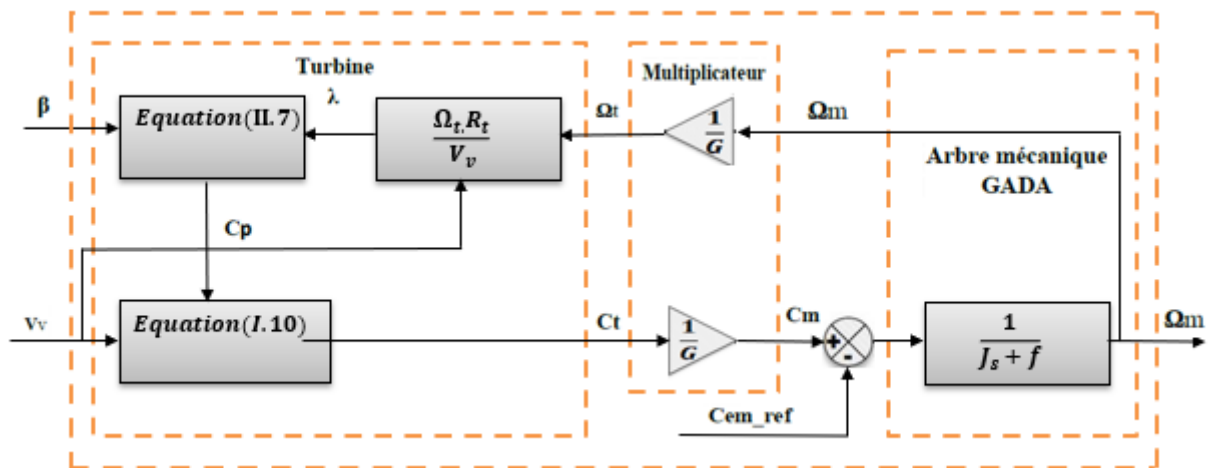


Figure I.8 : Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

I.3. Commande indirecte de la vitesse :

La mesure de la vitesse du vent est généralement faite par un anémomètre monté sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace sachant que le diamètre de la surface balayée par les pales est important, ce qui donne une mesure erronée de la vitesse donc une diminution de la puissance captée. C'est pourquoi, la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse et une estimation de cette dernière est souvent utilisée pour contourner problème [7.8.9.10].

La vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit :

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}} \dots \dots \dots (I.14)$$

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Le couple optimal est. :

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \dots \dots \dots (I.15)$$

Chapitre I : Modélisation De la turbine éolienne

En remplaçant la vitesse du vent dans l'équation (I.15), le couple optimal devient :

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_T^2$$

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

$$C_{T_{opt}} = K_{opt} \cdot \Omega_T^2 \dots \dots \dots (I.16)$$

Tel que :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \dots \dots \dots (I.17)$$

En régime permanent, l'équation mécanique s'écrit sous la forme :

$$\frac{G_T}{G} - C_g - f \Omega_g = 0 \dots \dots \dots (I.18)$$

En remplaçant (I.12) dans l'équation (II. 18), l'équation mécanique devient :

$$\frac{K_{opt}}{G} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g - C_g = 0 \dots \dots \dots (I.19)$$

Si le couple électromagnétique C_g est commandé de manière à suivre le couple Optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal, le couple devient un couple optimal $C_{g_{opt}}$.

$$C_{g_{opt}} = \frac{k_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g = 0 \dots \dots \dots (I.20)$$

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

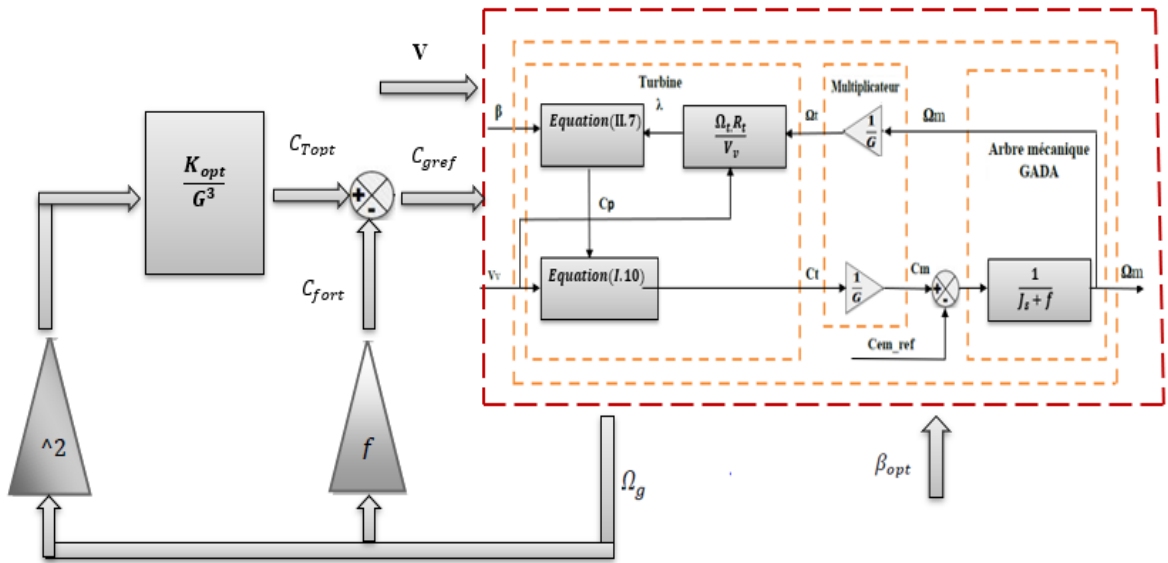


Figure I.9 : Commande indirecte de vitesse.

I.4. Résultats de simulation :

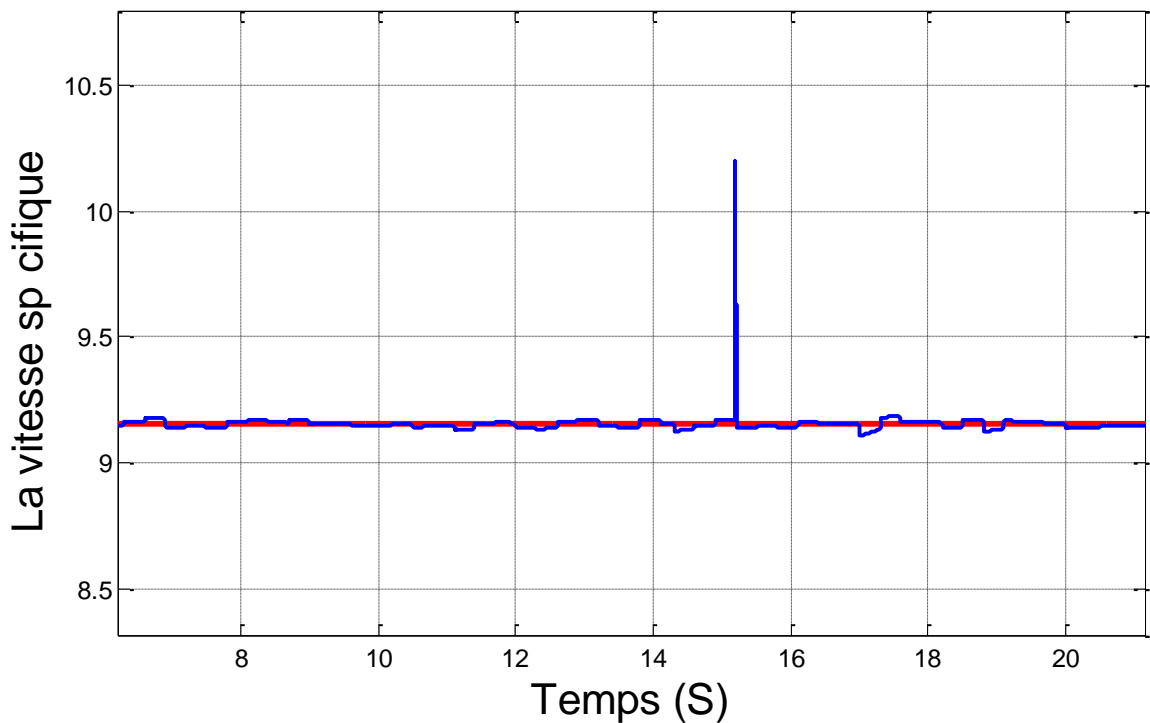


Figure I.10: coefficient de vitesse réduite (vitesse spécifique) λ .

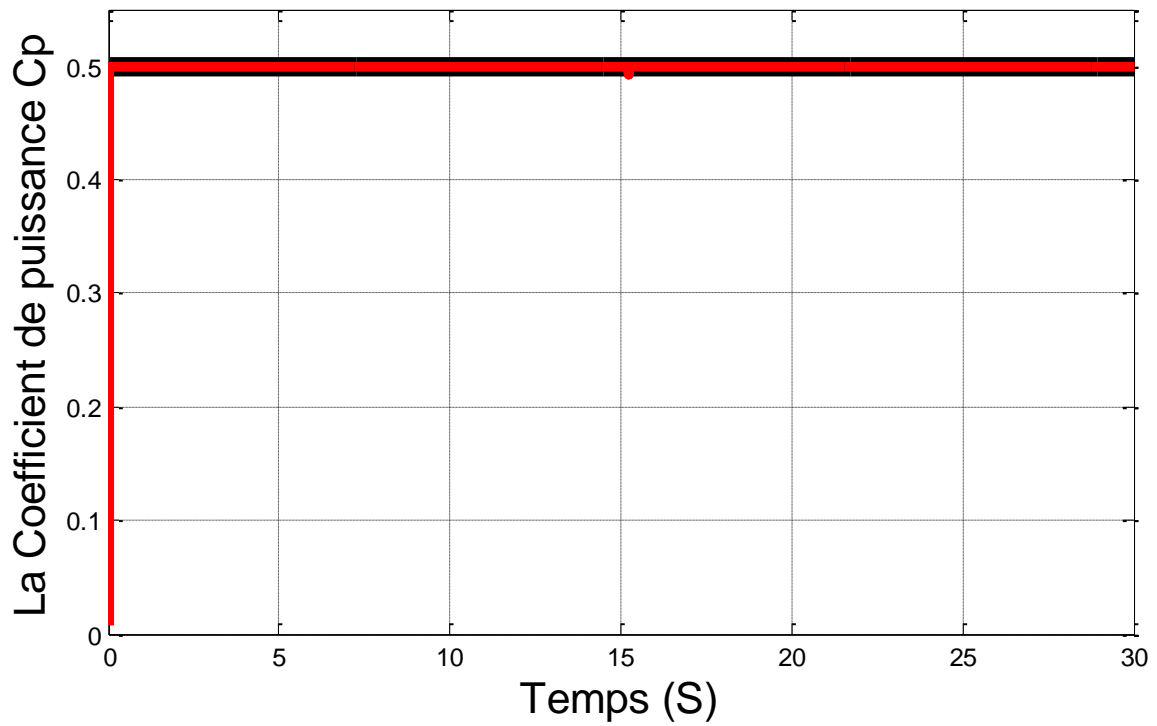


Figure I.11 : Coefficient de puissance C_p .

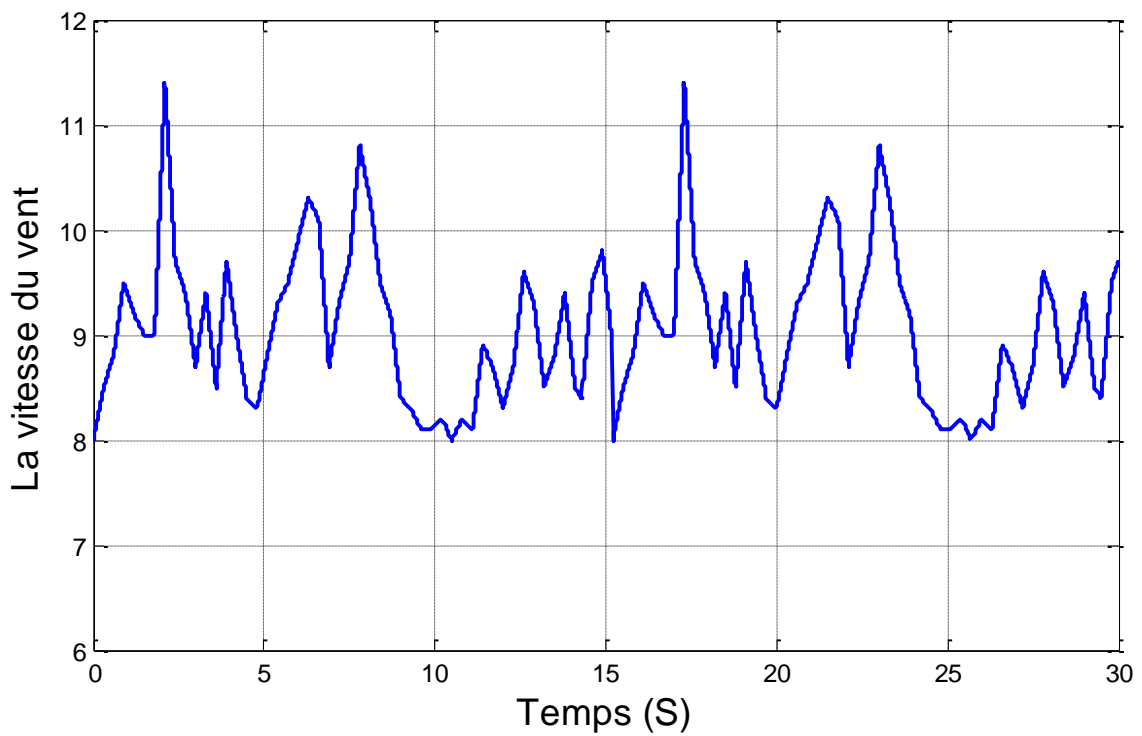


Figure I.12 : la vitesse du vent appliqué à la turbine.

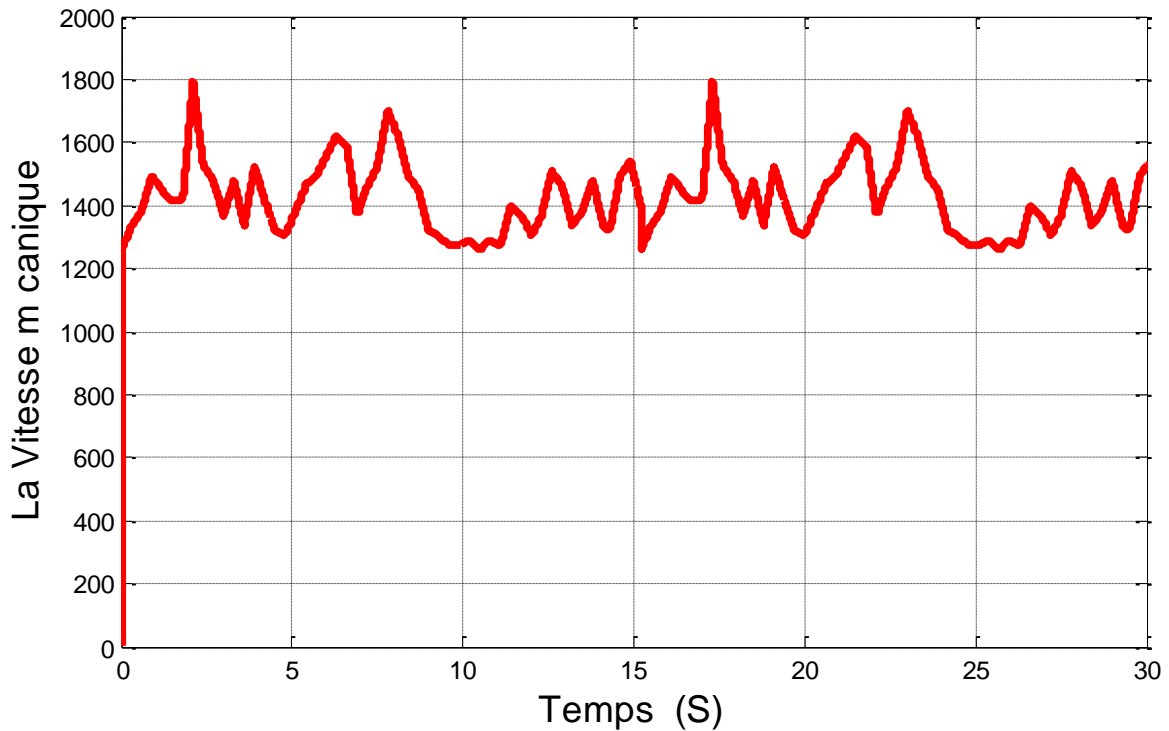


Figure I.13: La Vitesse mécanique.

I.4.1. Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse :

La figure I.10, I.11 illustre l'évolution du coefficient de puissance et la vitesse spécifique en fonction du temps pour les trois commandes. D'après les résultats de simulation, on constate que le coefficient de puissance et le rapport de vitesse de la méthode indirecte basée sur la logique floue sont ajustés à leurs valeurs optimales et moins fluctuant par rapport aux autres méthodes ou il y a une fluctuation entre les valeurs de références et les valeurs désirées. Et on constate aussi que la valeur du C_p ne dépasse pas la valeur maximale donnée par le constructeur qu'est égale 0.44 pour les trois commandes.

Conclusion :

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

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

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

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

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

Chapitre II

Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II.1. Introduction :

La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) a suscité un grand intérêt surtout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaissons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

Nous essayons d'aborder par la suite la modélisation en mode générateur, ceci a pour l'objectif la connaissance du comportement de ce type de machine dans ses différents régimes de fonctionnement, éventuellement lors de son contrôle (commande).

II .2. Différentes topologies de la MADA :

II .2.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Bushes » :

Cette machine est à double stator figure « II.1 ». Un bobinage transite la puissance il a une grande sectionnement est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation. Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant Il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques [11],[12].

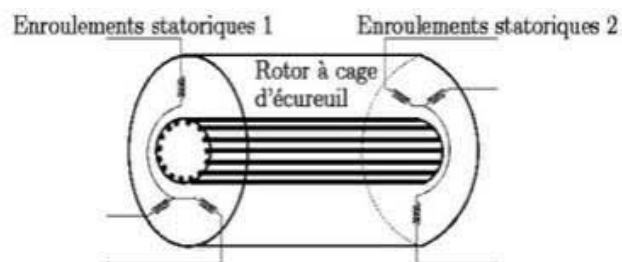


Figure II.1: MADA à double stator.

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

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

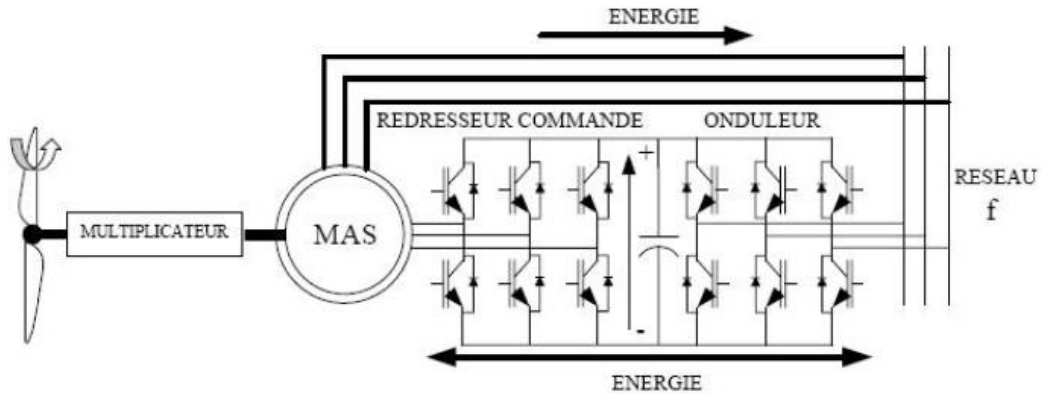


Figure II.2: MADA Bushes.

Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement. La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum.

Cependant si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur.

II .2.2. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné :

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

II .2.2.1. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

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

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

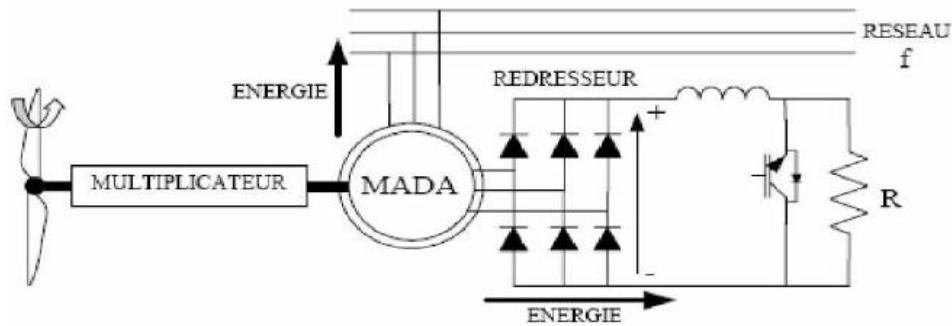


Figure II.3 : MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance [13].

II .2.2.2. Machine asynchrone à double alimentation –structure de Kramer :

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

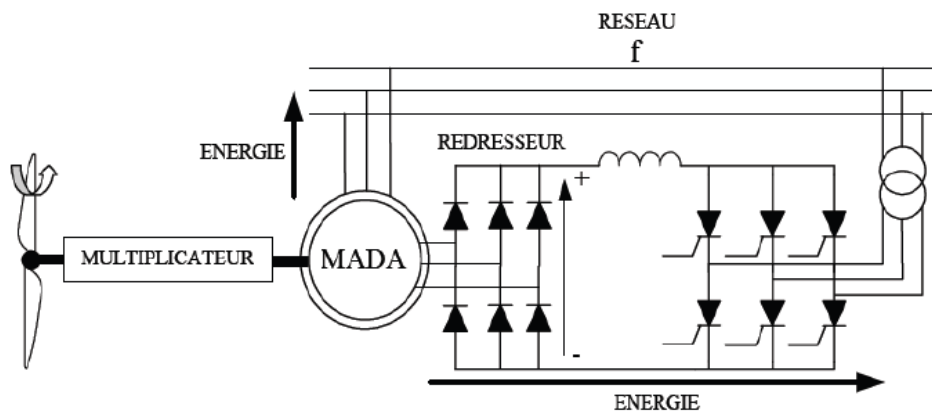


Figure II.4: MADA, structure Kramer.

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

L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est Unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT (§ II .1.2.4) [11].

II .2.2.3. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec Cyclo convertisseur :

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

L'ensemble est appelé structure Scherbius [11]. Grâce à la bidirectionnalité du convertisseur, la plage de variation de la vitesse est doublée (de 70 à 130 % de la vitesse de synchronisme).

L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance [12].

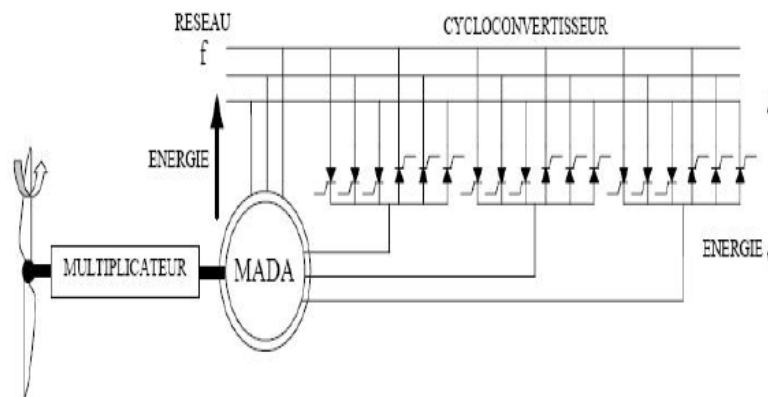


Figure II.5: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

II.2.2.4. Machine asynchrone à double alimentation –Structure Scherbius avec Convertisseur MLI :

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

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

Le glissement est compris entre [-30, +30] %, le convertisseur et donc dimensionné pour 30% de la puissance nominale. La puissance produite n'est pas limitée à la puissance nominale car

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

le rotor au fonctionnement hypersynchrone produit de l'énergie et la fournit au réseau. Cependant la commande MLI entraîne des gradients de tension importants d'où la présence de courants rotoriques de fréquences élevée responsable de pertes fer plus importantes. Plusieurs études récentes confirmées par des réalisations industrielles montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien.

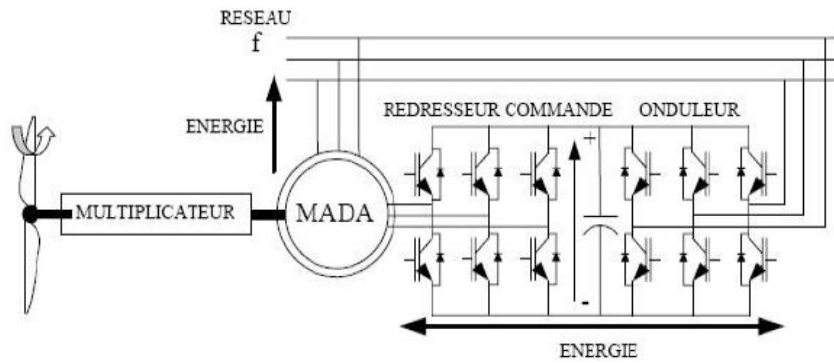


Figure II.6: Structure de Scherbius avec MLI.

II.3. Description de la machine asynchrone à double alimentation

:

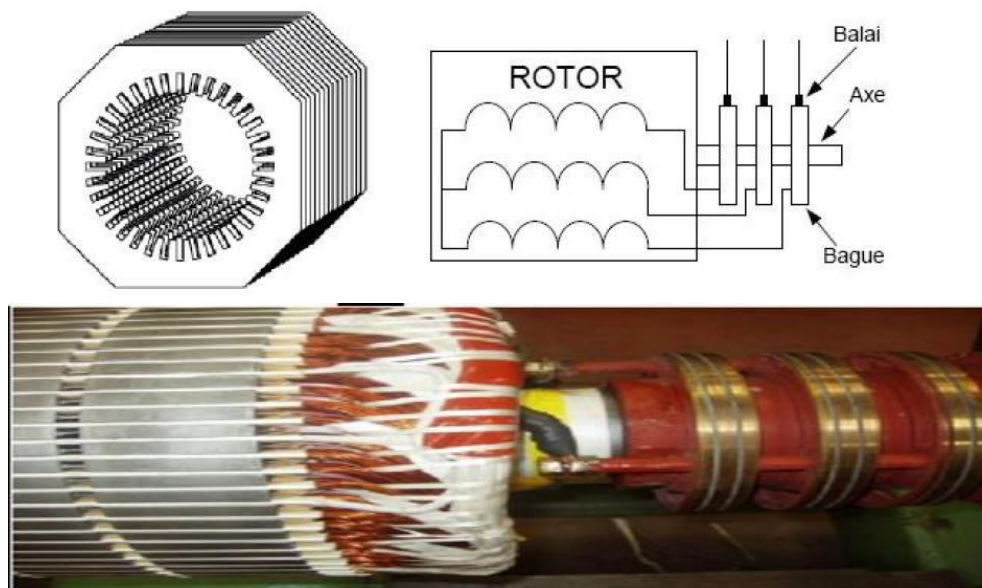


Figure II.7: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (Figure II.7).

II.3.1. Emploi des machines asynchrones à double alimentation :

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo synchrone [14].

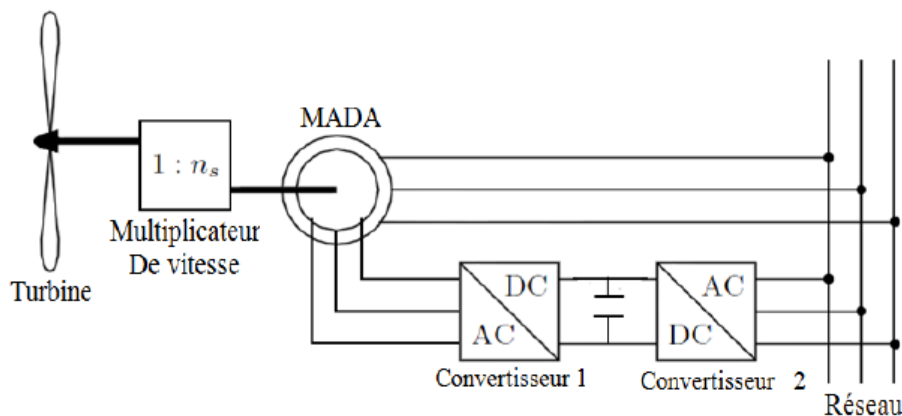


Figure II.8 : Système à vitesse variable par double alimentation

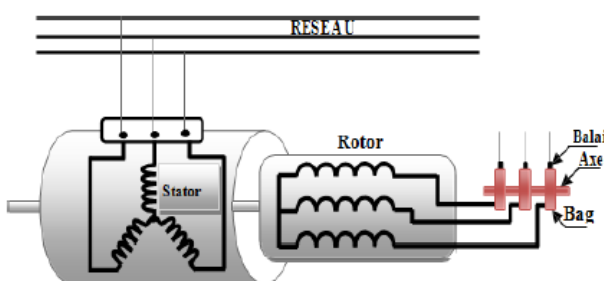


Figure II.9 : Schéma du rotor de la MADA

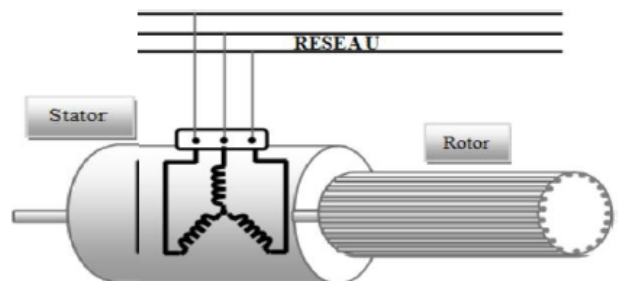


Figure II.10 : Structure de la MADA sans balais

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Nous verrons comment nous pouvons utiliser la "réversibilité" de ce principe afin de faire fonctionner la machine asynchrone à double alimentation en générateur à vitesse variable. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous.

Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur.

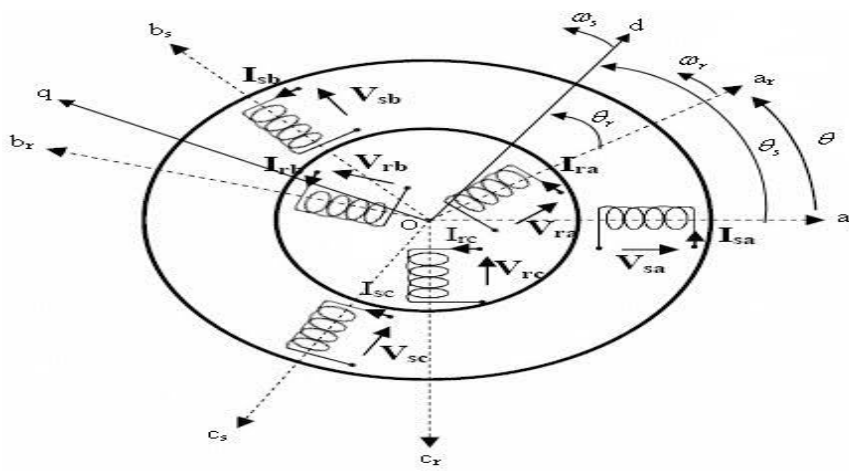


Figure II.11 : Configuration des enroulements et des flux dans une MADA

II.4.1. Principe de fonctionnement de la MADA :

Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. La puissance P_s est fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P_s$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste gP_s sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$.

Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g)P$ [13].

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

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

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

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage [11].

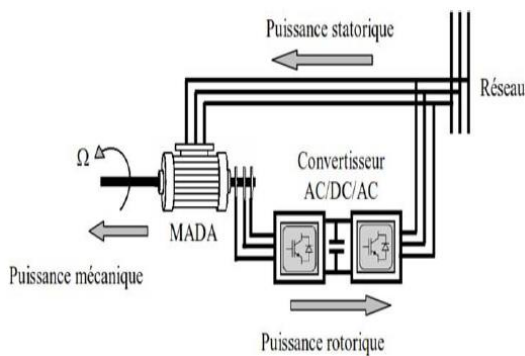


Figure II.12 : Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

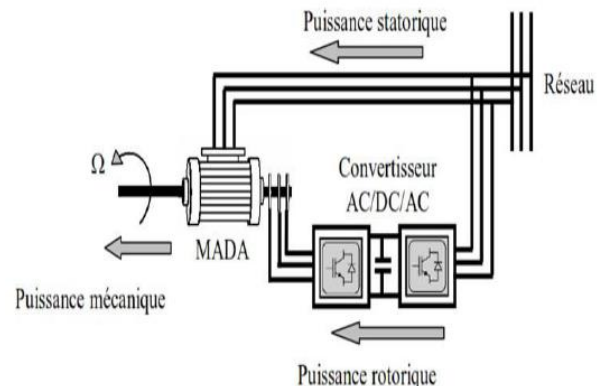


Figure II.13 : Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

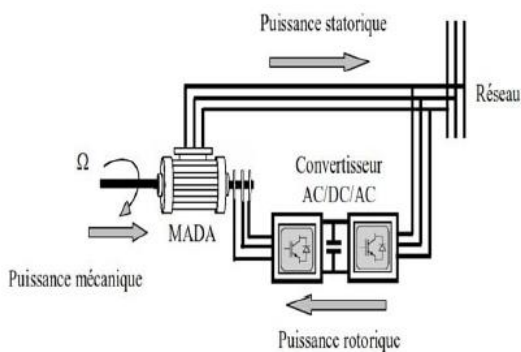


Figure II.14 : Fonctionnement en mode génératrice

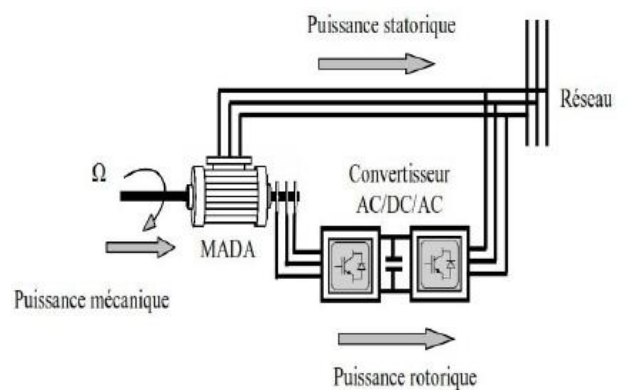


Figure II.15 : Fonctionnement en mode génératrice

II.5. Etude de la puissance pour la MADA :

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

$$P_r = -gP_s$$

$$P_m = -(1 - g)P_s$$

Tableau II.1 Etude de la puissance pour la MADA

Type de fonctionnement	Moteur $P_m < 0$	Génératrice $P_m > 0$
hypo synchrone	$P_s > 0$	$P_s < 0$
$P_s = -(P_m + P_r)$	$P_r < 0$	$P_r > 0$
		$g = \frac{n_s - n_r}{n_s}$
hypo synchrone	$P_s > 0$	$P_s < 0$
$P_m = -(P_s + P_r)$	$P_r > 0$	$P_r < 0$

II.6. Les formes Application des machines asynchrones à double alimentation :

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

II.6.1. Application moteur :

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

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

II.6.2. Application génératrice (Fonctionnement en génératrice à vitesse variable) :

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

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

II. 6.3. Domaine d'applications de la GADA :

La machine à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la Machine asynchrone classique et synchrone. Surtout en ce qui concerne la gamme de la Vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée Par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la Commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La GADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et Navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau [13].

II. 6.4. Application de la MADA dans les systèmes éoliens (GADA):

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

II.7. Modélisation de la machine (génératrice) asynchrone à double alimentation :

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

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

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

II .7. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

II.7.1 Modèle mathématique de la MADA dans le référentiel général :

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques (A_s, B_s, C_s) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$ et aussi trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaires à celles du stator (A_r, B_r, C_r).

La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est $\Omega_s = W_s/p$, où W_s désigne la pulsation de réseau d'alimentation et p le nombre de paires de pôles [15].

Les équations des tensions des phases statiques et rétorques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

II.7.2 Hypothèses simplificatrices :

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme [17.18].

II .7.3. Représentation de la GADA dans un repère triphasé (abc) :

La machine asynchrone à double alimentation est formée d'un stator fixe et d'un rotor cylindrique mobile.

Le stator a trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et sont alimentés par un système de tensions triphasées.

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine (Théorème de Ferrarais).

La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation statorique triphasée et P le nombre de paires de pôles. Le rotor de la machine Sport, de même, un bobinage triphasé avec le même nombre de paires de pôles que celui du stator.

La machine asynchrone à double alimentation est représentée dans le système triphasé par la figure suivante.[19]

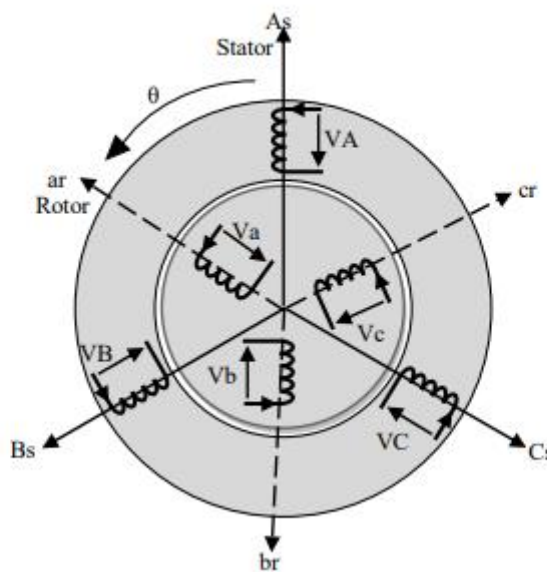


Figure II.16: Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée

II.7.3.1. Équations électriques :

Par application de la loi de Faraday à chaque enroulement, on peut écrire :

- **Pour le stator on Pour le rotor**

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Les matrices des résistances statique et rétorque de la GADA sont données par:

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

II.7.3.2. Equations magnétiques :

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants.

Elles sont exprimées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [M_{sr}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Les quatre matrices d'inductance s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[M]_{sr} = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

II.7.3.

3. Équation mécanique :

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

$$Cem = Cr + fr \cdot \Omega + J \cdot d\Omega / d\theta \quad (\text{II. 26}) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- Cem - le couple électromagnétique de la machine ;
- Cr -le couple résistant ;
- fr - le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- Ω - la vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

• J - l'inertie des parties tournantes. L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s] \cdot t \cdot d \theta \cdot [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II.9})$$

où p - le nombre de paires de pôles de la MADA

II.8. Passage de triphasé au biphasé (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

La matrice de transformation de Park (θ) est définie comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$[P(\theta)]$ 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.

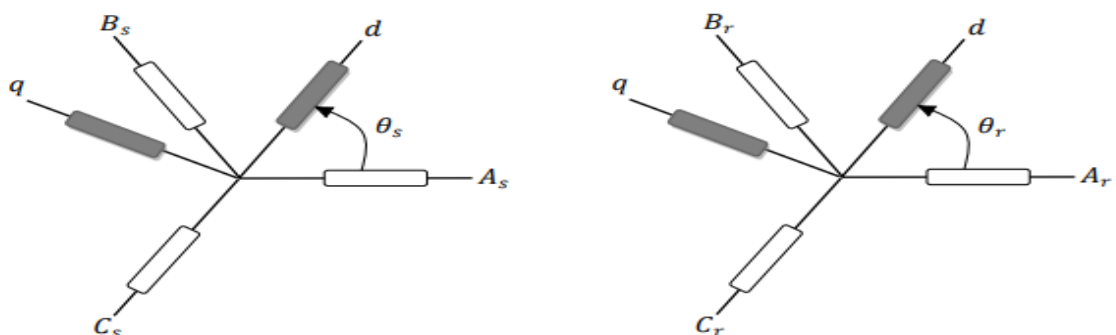


Figure II.17: Transformation des variables statiques et rétorques.

II.8. 1.La transformation de Park appliquée aux équations statiques nous donne :

$$[Vsdq0] = [P(\theta_s)]. [Vsabc] \Rightarrow [Vsabc] = [P(\theta_s)]^{-1} . [Vsdq0] \quad (\text{II.12})$$

$$[Isdq0] = [P(\theta_s)]. [Isabc] \Rightarrow [Isabc] = [P(\theta_s)]^{-1} . [Isdq0] \quad (\text{II.13})$$

$$[\varphi sdq0] = [P(\theta_s)]. [\varphi sabc] \Rightarrow [\varphi sabc] = [P(\theta_s)]^{-1} . [\varphi sdq0] \quad (\text{II.14})$$

II.8.2.La transformation de Park appliquée aux équations rétorque nous donne:

$$[Vrdq0] = [P(\theta_r)]. [Vrabc] \Rightarrow [Vrabc] = [P(\theta_r)]^{-1} . [Vrdq0] \quad (\text{II.15})$$

$$[Irdq0] = [P(\theta_r)]. [Irabc] \Rightarrow [Irabc] = [P(\theta_r)]^{-1} . [Irdq0] \quad (\text{II.16})$$

$$[\varphi rdq0] = [P(\theta_r)]. [\varphi rabc] \Rightarrow [\varphi rabc] = [P(\theta_r)]^{-1} . [\varphi rdq0] \quad (\text{II.17})$$

II.8.3. Equations électriques :

Les équations électriques de la machine asynchrone double alimentation dans le système biphasé, obtenues en appliquant la transformation de Park aux équations (2.2), (2.4) sont données comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} + \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.8.4. Les équations magnétiques :

Nous appliquons la transformation de Park aux relations entre flux et courants (2.6), (2.7), nous trouvons les relations électromagnétiques de la machine généralisée :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.8.5. Equation mécanique :

L'équation mécanique est exprimée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{II.20})$$

II.8.6. Le couple électromagnétique :

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

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) \quad (\text{II.21})$$

II.8.7. Les puissances actives et réactives échangées avec le réseau électrique dépendent aussi des variables électriques du stator et du rotor :

- Au stator

les puissances active et réactive sont respectivement données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

- Au rotor

les puissances active et réactive sont respectivement données par :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

II.9. Modèle d'état de Park de la MADA :

Nous pouvons exprimer le modèle d'état de Park de la MADA sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{d}{dt} I_{sd} + M \frac{d}{dt} I_{rd} - \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + M \frac{d}{dt} I_{rq} + \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \frac{d}{dt} I_{rd} + M \frac{d}{dt} I_{sd} - \omega_s L_r I_{rq} - \omega_s M I_{sq} + \omega L_r I_{rq} + \omega M I_{sq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \frac{d}{dt} I_{rq} + M \frac{d}{dt} I_{sq} + \omega_s L_r I_{rd} + \omega_s M I_{sd} - \omega L_r I_{rd} - \omega M I_{sd} \end{cases}$$

II.10. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA) :

La machine est entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 tr/min.

Le stator est alimenté par une source triphasée de 220V de fréquence 50Hz, alors que le rotor est alimenté par une source triphasée 12V de fréquence égale à la fréquence de rotation.

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

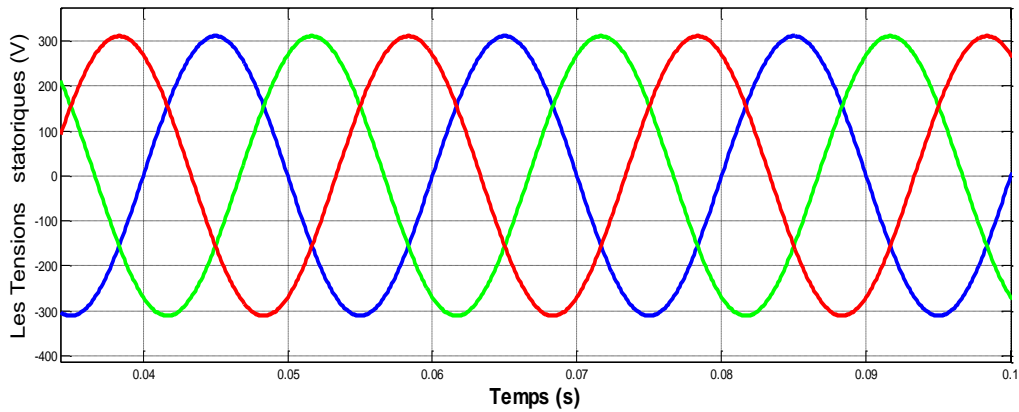


Figure II.18: Transformation des variables statiques et rétorques.

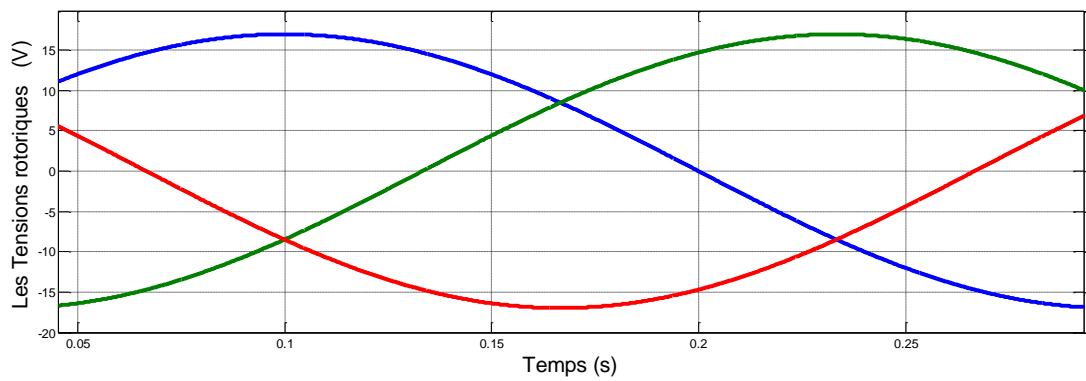


Figure II.19 : Les tensions d'alimentations au rotor

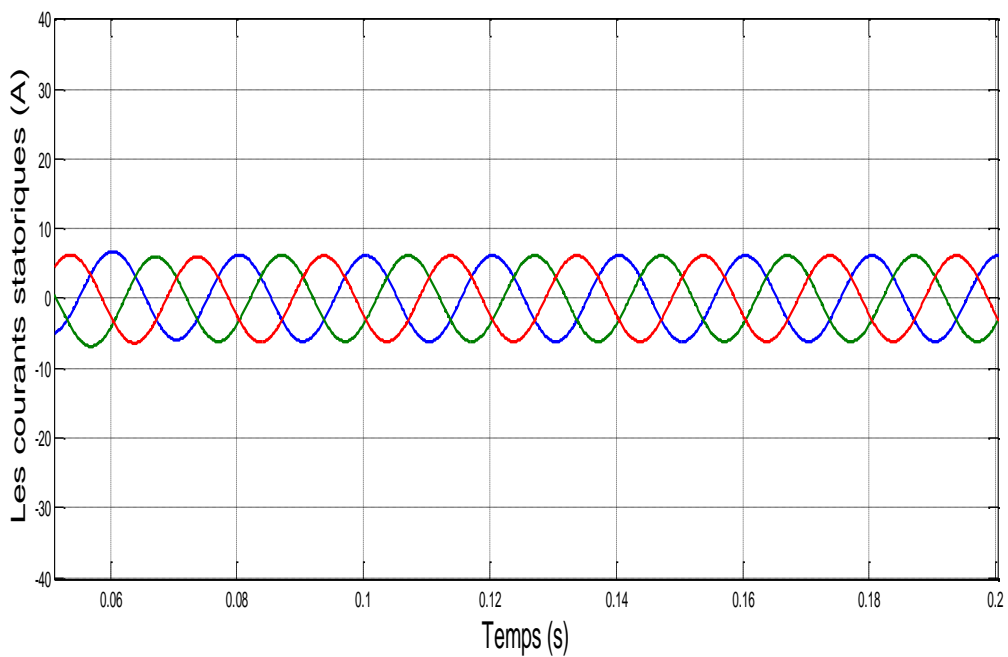


Figure II.20 : Les courants statoriques triphasés avec un zoom

Chapitre II : Etude et Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

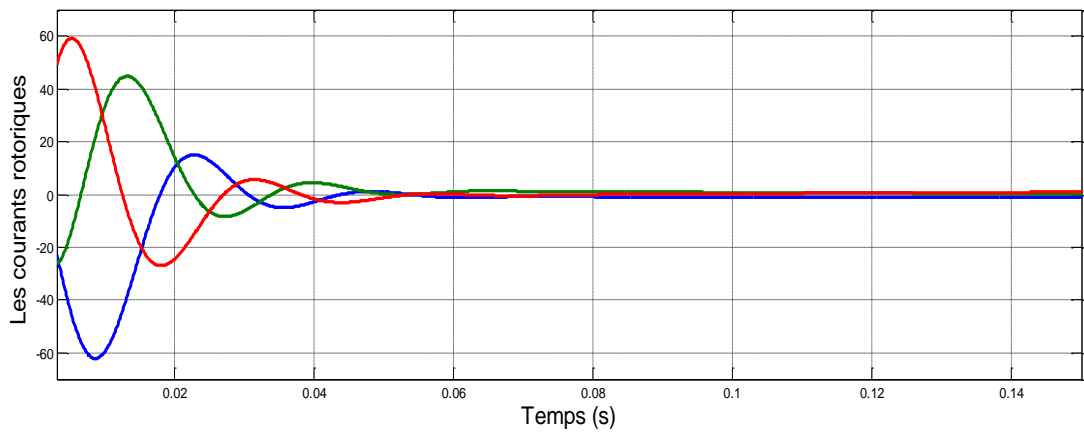


Figure II.21 : Les courants rotoriques triphasés avec un zoom

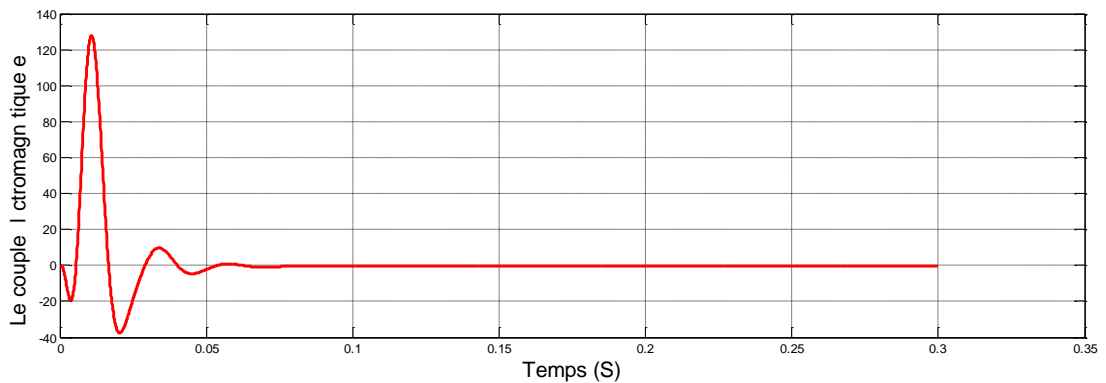


Figure II.22: Le couple électromagnétique

Conclusion :

Sous quelques hypothèses simplificatrices, nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine (génératrice) asynchrone à double alimentation. La complexité du modèle a été réduite par l'application de la transformation de Park qui permettait le passage d'un repère triphasé en biphasé, dans lequel les équations de la machine étaient à coefficients variables dans le temps, à un repère orthogonal dans lequel les équations sont devenues à coefficients constants dans le temps. Cela montre une bonne conformité au comportement dynamique de la machine (génératrice GADA).

Chapitre III

Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

Chapitre III : Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

III.1. Introduction :

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

La technique du contrôle vectoriel repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée. Pour le cas du contrôle vectoriel de la GADA, il sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Dans ce chapitre, nous allons établir les équations qui lient les tensions rotoriques de la GADA, aux puissances active et réactive statoriques en essayant.

De développer un algorithme de contrôle indépendant des puissances qui va nous aider à contrôler au mieux le système de production d'énergie éolienne.

III.2. Principe de la commande vectorielle avec l'orientation du flux magnétique :

Rappelons l'équation du couple électromagnétique de la génératrice :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_s} (I_{rd} \Phi_{sq} - I_{rq} \Phi_{sd}) \quad (III.1)$$

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, mais on s'aperçoit que si on élimine le premier produit ($I_{rd} \Phi_{sq}$), le couple ressemblerait fort à celui d'une machine à courant continu, 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.

Afin d'arriver à commander la GADA d'une manière similaire à la commande d'une machine à courant continu à excitation indépendante, la GADA est commandée dans un cadre de référence d-q tournant à la vitesse de synchronisme, l'axe d étant orienté le long de la position du vecteur spatial de flux du stator comme indiqué dans la figure III.17 et d'avoir :

$\Phi_{sd} = \Phi_s$ et $\Phi_{sq} = 0$. Le couple devient :

$$C_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} (I_{rq} \Phi_{sd}) \quad (III.2)$$

Chapitre III : Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

Pour construire notre commande, dans un premier temps, on va chercher la relation entre les courants du rotor et les puissances du stator. Ensuite, on va former les boucles de contrôle fermées pour les courants.

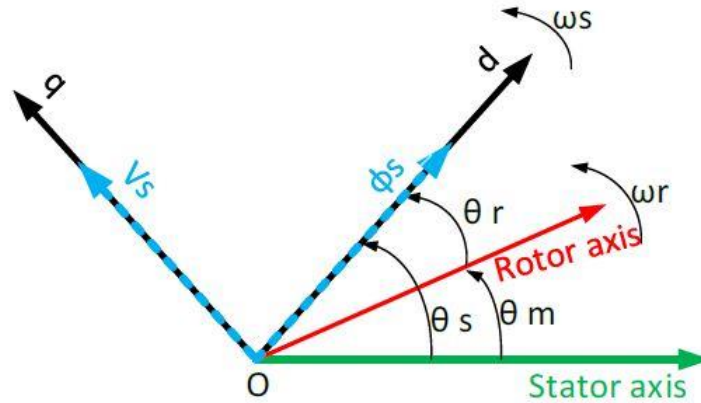


Figure III.1: Principe de control vectoriel sans boucle de puissance.

Les équations différentielles décrivent la GADA dans un repère lié au champ tournant qui sont données par :

III.2.1. Equations électriques :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

III.2.2. Equations magnétiques :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Chapitre III : Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

Sous l'orientation du flux statorique suivant l'axe d (Figure III.20), la relation entre les courants et le flux peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

En utilisant le système d'équations ci-dessus (Eq . III.60), les relations entre les courants rotoriques et les courants satiriques seront :

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

En régime permanent, le flux du stator est proportionnel à la tension du réseau et si on néglige la résistance statorique (pour les grande machines) les tensions satiriques seront :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Ainsi, lors de l'orientation de l'axe direct avec le flux du stator, la tension s'aligne sur l'axe en quadrature, les puissances active et réactive s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Combinant ces dernières équations avec les équations (II.6), on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \left(\frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \right) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Les puissances active et réactive du stator peuvent être contrôlées indépendamment au moyen de la quadrature et du courant direct du rotor respectivement [20].

Chapitre III : Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

D'après l'équation (III.62), on a :

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad \text{(III.10)}$$

Donc les puissances statoriques deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{3}{2} \frac{V_s L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

Les expressions des puissances active et réactive montrent clairement que sous l'orientation du flux statorique selon l'axe d, les puissances active et réactive sont découplées et peuvent être contrôlées via les courants du rotor. Grace au courant I_{rd} , nous pouvons contrôler la puissance réactive tandis que la puissance active peut être contrôlée via le courant d'axe q (I_{rq}).

En utilisant les équations précédentes, les expressions des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir une commande adéquate, peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \sigma \frac{dI_{rd}}{dt} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\varphi_s}{dt} - \omega_r L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \sigma \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r L_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \varphi_s \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

Avec $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$: est le coefficient de fuite de la GADA.

Avec l'application de la transformation de Laplace au système d'équations (III.12) et en supposant que la tension du réseau est stable ($\frac{d\varphi_s}{dt} = 0$), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = (R_r + L_r \sigma p) I_{rd} - \omega_r L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = (R_r + L_r \sigma p) I_{rq} + \omega_r L_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \varphi_s \end{cases} \quad \text{(III.13)}$$

Avec le système d'équations (III.11) et (III.13), on peut établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure ci-dessous

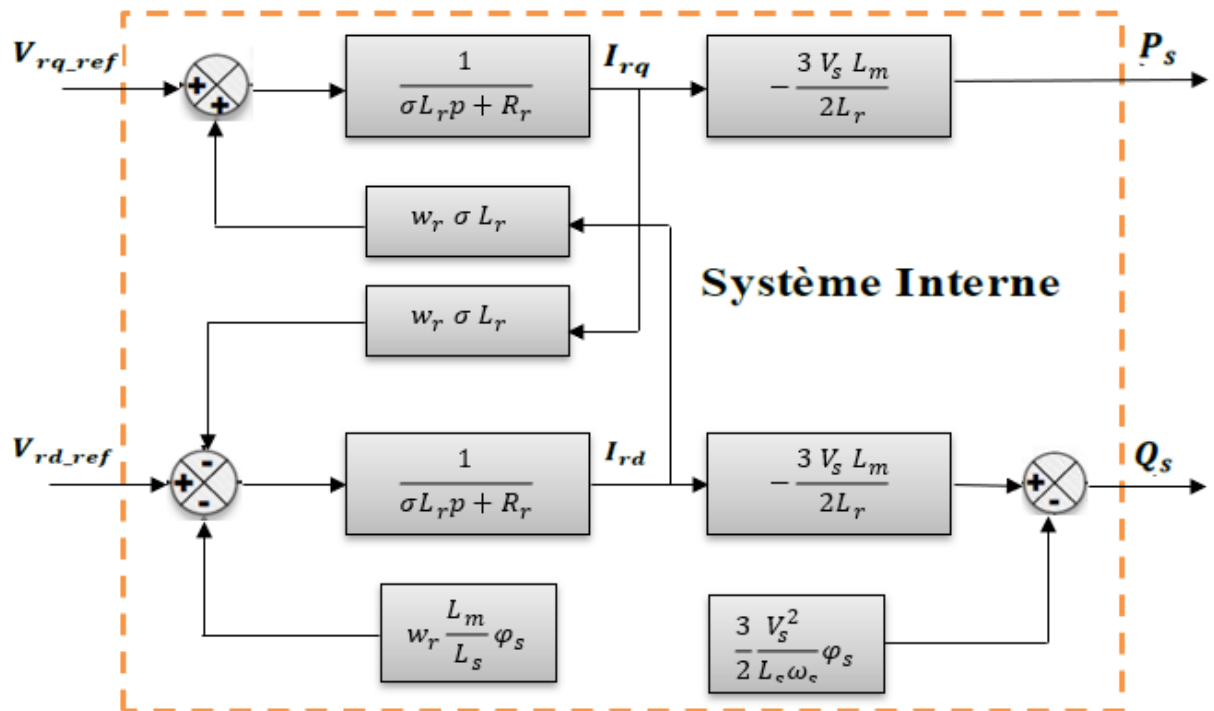


Figure III.2: Schéma bloc du système à réguler.

Nous allons utiliser deux commandes afin de réguler ce dernier système. La commande directe et la commande indirecte. Les deux commandes sont basées sur l'orientation du flux statorique.

III.3. Commande directe basée sur l'orientation du flux statorique :

Cette commande est basée sur la régulation directe et indépendante des puissances active et réactive produites par la GADA, avec l'utilisation d'une boucle de régulation pour la puissance active et l'autre pour la puissance réactive. Avec cette méthode on obtient un découplage total entre les axes de régulation, dont le principe est illustré à la figure III.3

Chapitre III : Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

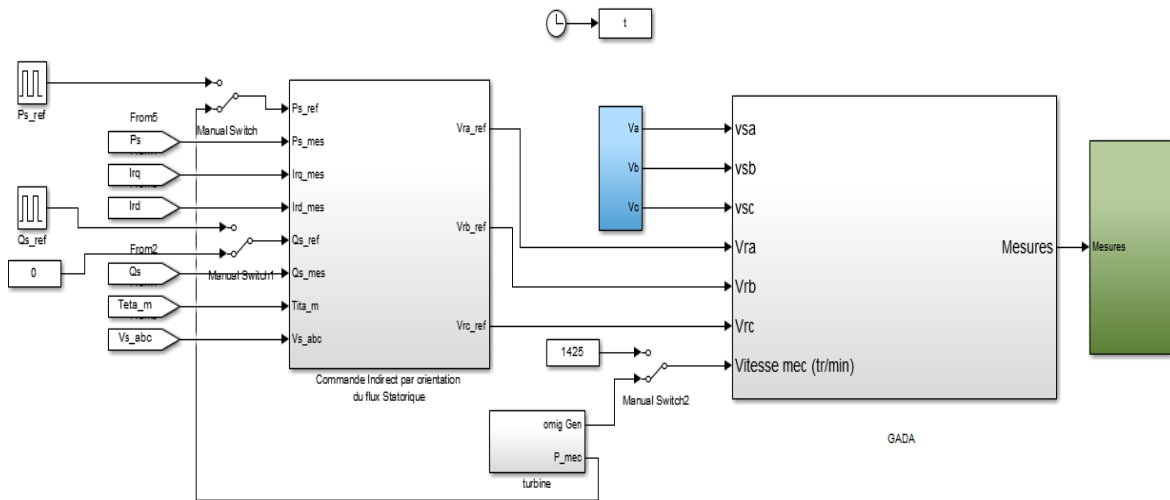


Figure III.3 : Schémas globale de l'ensemble (GADA+ commande Vectorielle+ turbine).

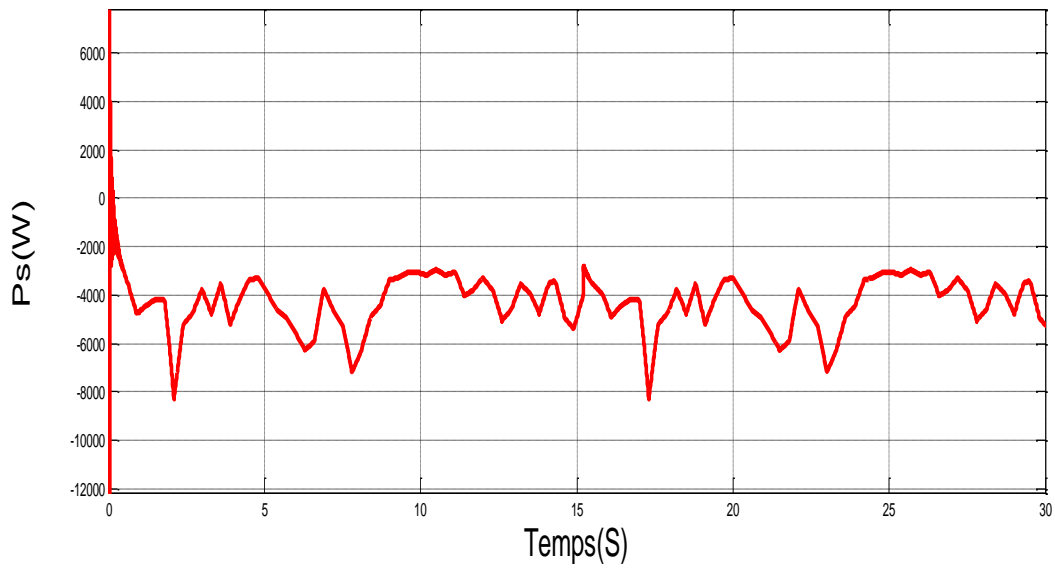


Figure III.4: Puissance active statorique mesure.

Chapitre III : Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

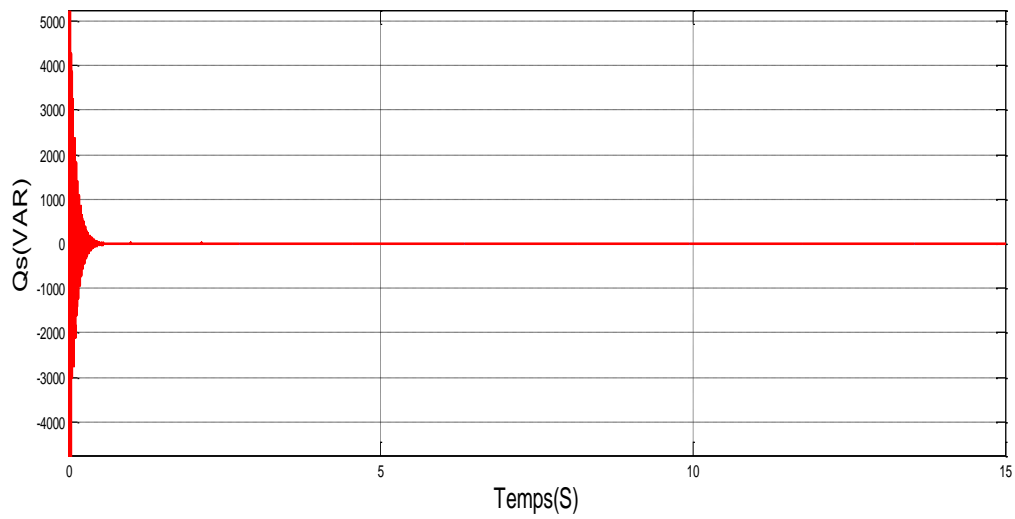


Figure III.5: Puissance réactive statorique mesure.

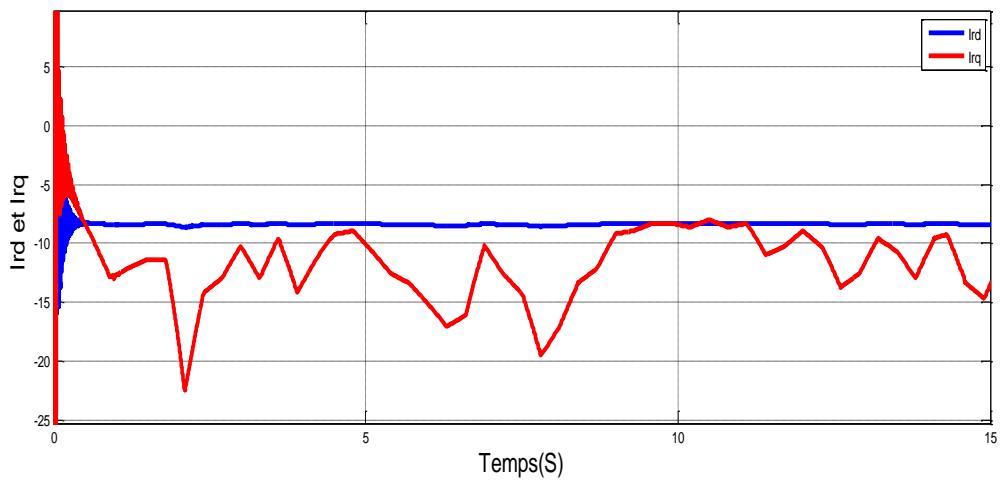


Figure III.6.: le courant et rotorique I_{rd} et I_{rq}

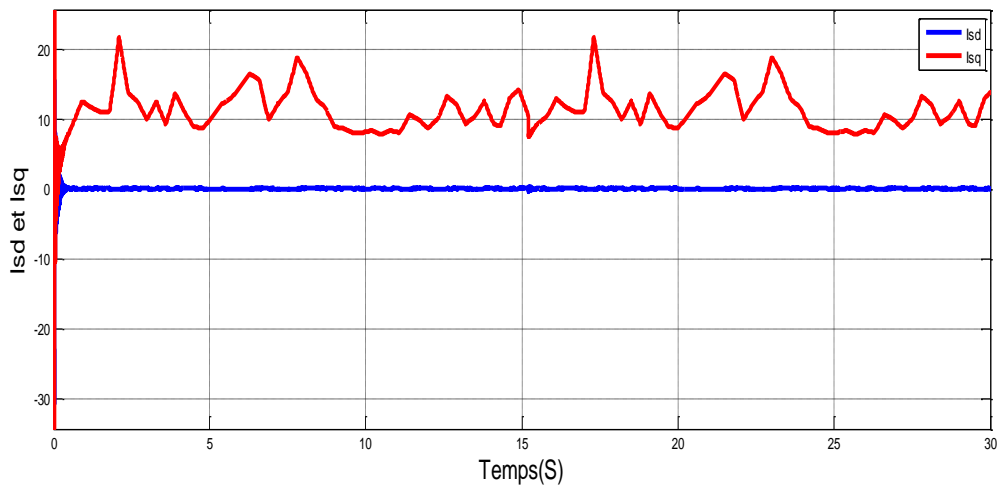


Figure III.7. : le courant et rotorique I_{sd} et I_{sq}

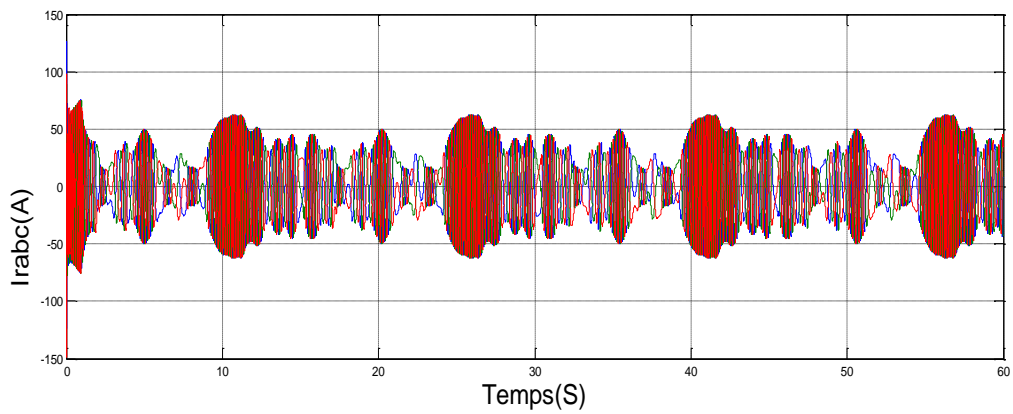


Figure III.8.: le courant et rotorique

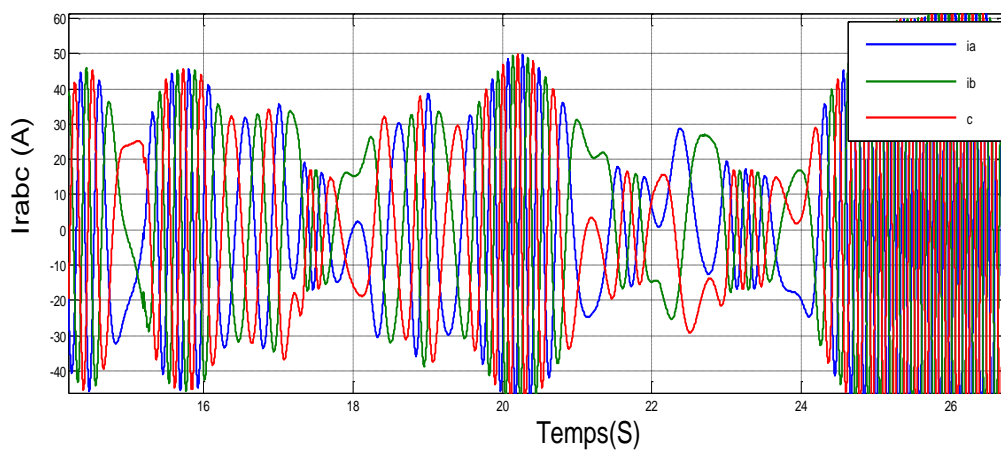


Figure III.9: le courant et rotorique + ZOOM

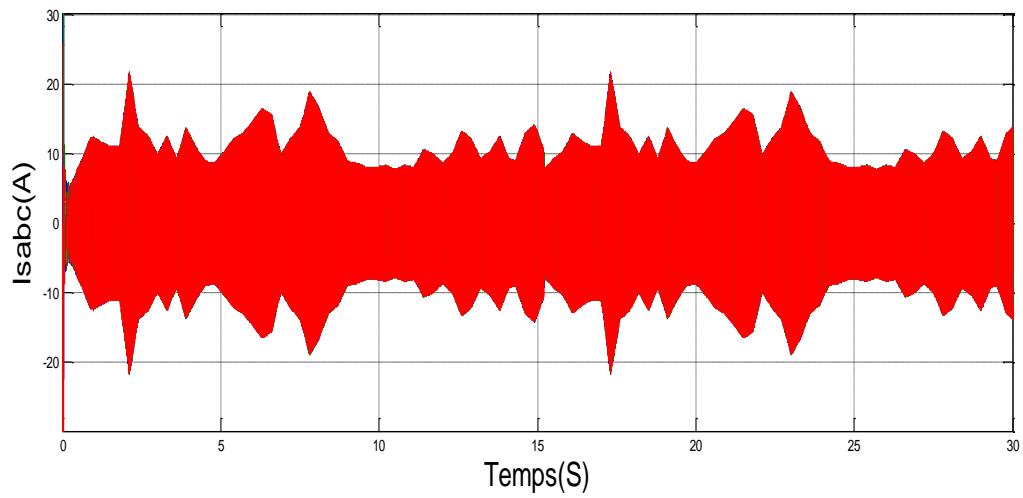


Figure III.10: le courant statorique

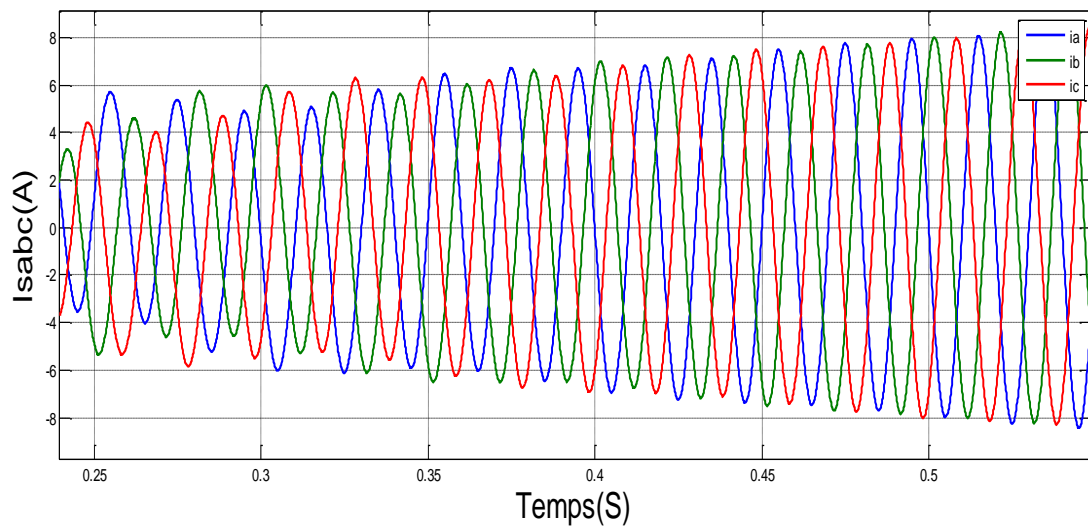


Figure III.11: le courant statorique + ZOOM

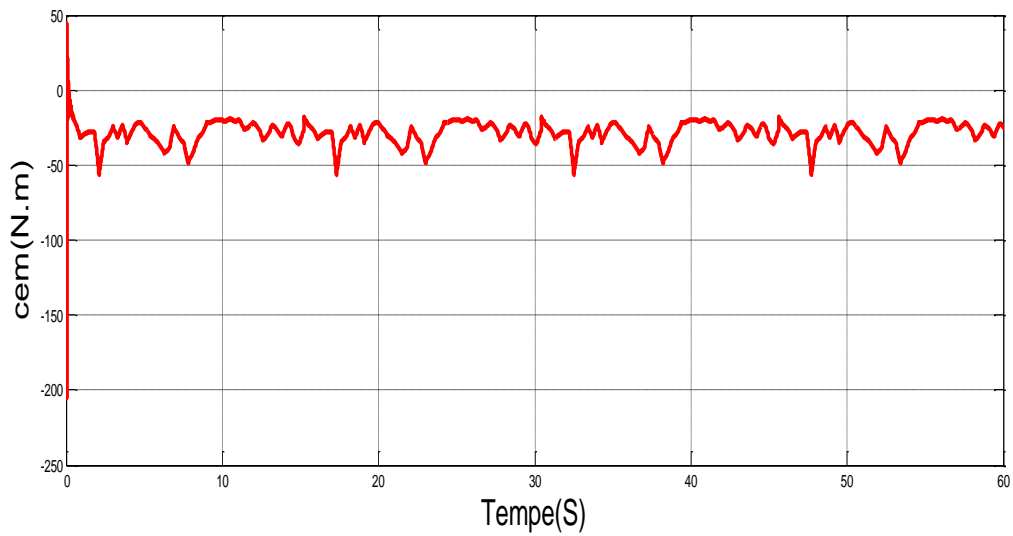


Figure III.12: le couple électromagnétique.

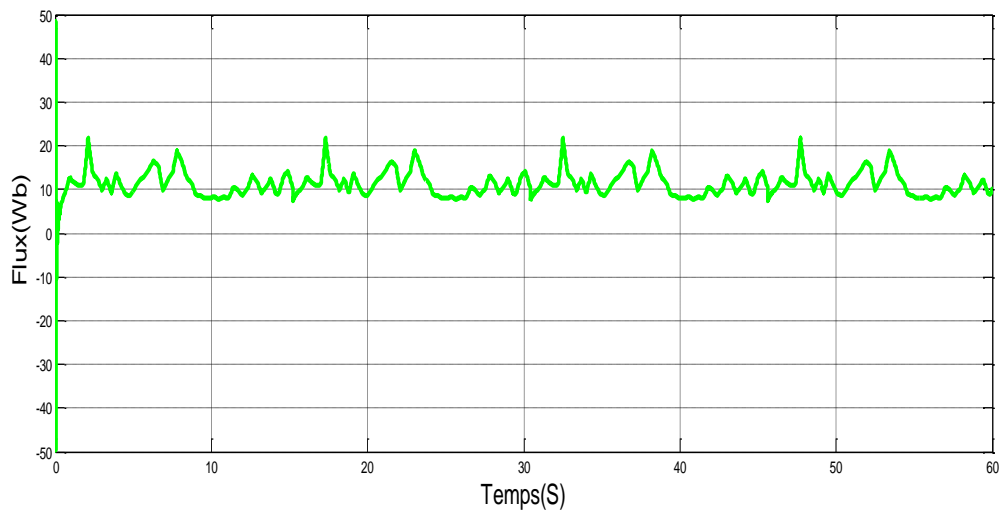


Figure III.13: Flux statorique et rotorique

IV. Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré à tester sur l'environnement MATLAB/Simulink les performances de la commande d'une génératrice asynchrone doublement alimentée afin de bien contrôler la tension continue à la sortie des deux convertisseurs coté machine pour des variations de vitesse et/ou charge. Les résultats de simulation ont montré d'une manière générale, la capacité de notre structure à fonctionner à vitesse et/ou à charge variable. On constate une bonne régulation de la tension redressée pour les variations de vitesse mais une certaine sensibilité aux variations de la charge. Toutefois, la régulation permet à cette tension de retrouver rapidement sa valeur référence.

Une fois que la tension continue est contrôlée à sa valeur de référence pour une plage donnée, on peut alimenter une charge isolée avec des tensions d'amplitude et de fréquence fixe à Travers converti sieur coté charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter une contribution à l'étude de la commande vectorielle en puissance avec un régulateur PI d'une génératrice asynchrone (GADA) alimentée au stator par des tensions sinusoïdales triphasées équilibrées, au rotor par un onduleur contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI)..

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à un rappel des concepts fondamentaux de la chaîne de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique, en dressant un état de l'art sur les différents types d'éoliennes et sur les différentes associations machines électriques convertisseurs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des généralités sur la MADA, ses applications, ses différents modes de fonctionnement et sa modalisation dans le repère de Park ensuite, nous avons simulé le modèle de la machine en mode moteur asynchrone et MADA en génératrice.

Le troisième chapitre présente une étude théorique de la commande vectorielle, où nous avons exprimé les grandeurs statoriques de la MADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la MADA par le rotor

Nous présentons des résultats de simulation de la commande vectorielle directe et indirecte de la MADA alimentée au rotor par un onduleur à MLI. L'intérêt de la commande est d'aboutir à un découplage entre les puissances actives et réactives. Les résultats des simulations démontrent que la commande réalisée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de production de l'énergie éolienne.

En guise de perspective de recherche, nous citons :

- L'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- L'intégration éventuelle d'un système de stockage inertiel.
- L'étude d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. SALLOUM, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation", INP TOULOUSE, 13 Mars 2007
- [2] BENAKCHA Meryem, Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE'. Soutenue le : 15/04/2019
- [3] A. Gaillard, "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [4] H. Jabbari Asl, J. Yoon, "Power capture optimisation of variable-speed wind turbines using an output feedback controller", Renewable Energy, 2016, (86), pp. 517-525.
- [5] Leeconte, M.Rapin, E.Szechenyi « éolienne », Technique de l'ingénieur, BM 4640
- [6] P.Leeconte, M.Rapin, E.Szechenyi « éolienne », Technique de l'ingénieur, BM 4640
- [7] S. Abdeddaim, A. Betka, « Optimal tracking and robust power control of the DFIG wind turbine ». Int J Electr Power Energy Syst 2013 ; 49(01), pp.: 234–242.
- [8] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, M. M. Hand, « Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization ». Journal of Solar Energy Engineering. Vol. 128, pp 516-
- [9] S. Chekkal*, N. Aouzellag Lahaçani, D. Aouzellag, K. Ghedamsi, « Fuzzy logic control strategy of wind generator based on the dual-stator induction generator ». Electrical Power and Energy Systems, Vol. 54, 2014, pp. 166-175
- [10] M. G. Molina, P. E. Mercado, « A new control strategy of variable speed win turbine generator for three-phase grid-connected applications ». Power Systems Conference and Exposition, vol.2, pp 759 – 764, IEEE 2008.
- [11] G. SALLOUM, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation", INP TOULOUSE, 13 Mars 2007.
- [12] F. POITIER, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation d

BIBLIOGRAPHIE

l'énergie éolienne", Université de Nantes, 19 décembre 2003.

[13] I. HAMZAOUI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une Éolienne de petite puissance", Ecole National Polytechniq
20 janvier 2008.

Production d'Energie Electrique par Eolienne -juin 2006.

[14] Y.A. BENCHERIF "Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", à L'ENP, 2008.

[15] M.S. ABDOULAZIZ, I .SOUMANA NOUHOU " Etude du Générateur Asynchrone pour

l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", à L'ENP, 2007

[16] D.Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie, 2013

[17] F. Boumaraf, « Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle ». Thèse doctorat, Université de Batna, Alger, Le 24 Juin 2014.

[18] D.Kairous, « Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation ». Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie 2013

[19] T.Wildi, «Électrotechnique». Les presses de l'université Laval, 2008

[20] R. Riyadh and R. Abdessamad, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée," PhD thésis, Université of Batna, Faculté of Technologie, 2016

[A] Abdoun Fateh, « Amélioration des performances des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à double alimentation », thèse de Doctorat, Université A.MIRA-BEJAIA, 2018.

Les paramètres

Les paramètres

1- Les paramètres de la machine(GADA) :

paramètres	Valeur numérique
<i>Puissance nominale</i>	4KW
<i>Tension nominale</i>	220/380V – 50Hz
<i>Courant nominale</i>	15/8.6
<i>La vitesse nominale</i>	1440 tr/min
<i>Nombre de paires de pôles</i>	2
<i>Résistance du stator</i>	1.2Ω
<i>Résistance du rotor</i>	1.8 Ω
<i>Inductance stator</i>	0.1554H
<i>Inductance du rotor</i>	0.1568H
<i>Inductance Mutuelle</i>	0.15H
<i>Coefficient de frottement</i>	0.001N. m. s/rd

2- Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

paramètres	Valeur numérique
Nombre de pale	3.
Diamètre d'une pale	3m
Gain du multiplicateur	5.4
Coefficient	0.0024 N. m. s/rd.

Résumé

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : ELECTROMECHANIQUE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION :

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de
Master en électromécanique

Option : Maintenance des équipements industriels

Proposé et dirigé par Mr : Dr. Zouggar El Oualid

Présenté par : Souadia Badr Eddine

Zioueche Mohamed

Résumé

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone à rotor bobiné à double alimentation « GADA » dans la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle de la turbine éolienne a été établi, puis de la « GADA » faisant appel à des dispositifs d'électronique de puissance la stratégie commande vectoriel

Cette étude a été conclue par des résultats de simulation, pour une validation des modèles obtenus du système.

Mots clés :

Energie éolienne ; Turbine ; MPPT ; MADA ; Convertisseurs bidirectionnels ; Commande

Vectorielle.