

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Université Larbi Tébessi - TEBESSA

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Génie Électrique



MÉMOIRE DE MASTER EN ÉLECTROTECHNIQUE

Option: Electrotechnique industrielle

Présenté par:

**BRAHMI OUSSAMA
DJAALALI FAOUZI**

Thème

**Commande Vectorielle indirecte pour un
Système de Conversion Éolienne à base
de la MADA**

Soutenu publiquement le 30 juin 2020 devant le jury :

Metatla Samir	MAA	Université de TEBESSA	Président
Bouguerne Abla	MCB	Université de TEBESSA	Examineur
Djebbar Mohamed Salah	MCB	Université de TEBESSA	Encadreur

Université de Tébessa , Route de Constantine, 12002, Tébessa - Algérie

Promotion 2020

ملخص:

هذه المذكرة تعرض دراسة لنظام توليد طاقة الرياح باستخدام مولد حثي ثنائي التغذية مقتراد بواسطة عفة ذات زاوية الشفرة المتغيرة . الفصل الأول يعرض دراسة وصفية لمكونات نظام توليد طاقة الرياح و مبدأ عملها في إنتاج الطاقة الكهربائية انطلاقا من حركة الرياح كما يعرض في آخره نبذة قصيرة عن تاريخ استغلال هذا النوع من الطاقات المتجددة في الجزائر. الفصل الثاني يعرض بعض النظريات و القوانين التي تتعلق بحدود تحويل الطاقة القصوى للرياح كما يعرض نمذجة للمحرك اللاتزامني ثنائي التغذية مع محاكاة منفصلة على نظام الريح ليتم دراسة خصائص هذا المحرك . الفصل الثالث يعرض بعض طرق التحكم في المحرك الأخير الذي سيتم استعماله في هذه المذكرة كمولد في توليد الطاقة في نظام الرياح و يعرض في جزء الأخير نمذجة خاصة بطريقة التحكم التوجيهي الغير مباشر . الفصل الرابع يقوم يعرض نتائج المحاكاة على نظام توليد طاقة رياح كامل تم استعمال فيها طريقة التحكم التوجيهي الغير مباشر في المولد الحثي ثنائي التغذية الذي تم دراسته في الفصول السابقة .

كلمات مفتاحية : نظام الهواء – توليد الطاقة – عفة – نمذجة – مولد حثي ثنائي التغذية – التحكم – طاقة متجددة – الاستطاعة .

Résumé :

Cette mémoire montre une étude du système de production d'énergie éolienne utilisant un générateur asynchrone à doubles alimentations entraîné par une turbine à calage variable des pales. Le chapitre I présente une étude descriptive des composantes du système de production d'énergie éolienne et du principe de son fonctionnement dans la production d'électricité à partir du mouvement éolien, ainsi qu'un bref aperçu de l'histoire de l'exploitation de ce type d'énergie renouvelable en Algérie. Le chapitre II présente quelques théories et lois concernant les limites de la conversion maximale de la puissance éolienne et présente également un modèle du MADA avec une simulation séparée du système de vent pour étudier les caractéristiques de ce moteur. Le chapitre III présente quelques-unes des méthodes de contrôle du dernier moteur à être utilisé dans cette mémoire en tant que générateur dans la production d'énergie éolienne et dans la dernière partie présente un modèle pour la commande vectorielle indirecte. Le chapitre IV présente les résultats de la simulation d'un système de production d'énergie entièrement éolienne dans lequel on utilise la méthode de contrôle vectorielle indirect du la MADA, qui a été étudiée dans les chapitres précédents.

Mots clés : Eolienne – modélisation – turbine – optimisation – MADA – contrôle – énergie renouvelable – puissance.

Abstract

This paper shows a study of the wind energy production system using an asynchronous double-feed generator driven by a variable blade timing turbine. Chapter I presents a descriptive study of the components of the wind energy production system and the principle of its operation in the production of electricity from the wind movement, and a brief overview of the history of the exploitation of this type of renewable energy in Algeria. Chapter II presents some theories and laws concerning the limits of the maximum conversion of wind power and also presents a model of the MADA with a separate simulation of the wind system to study the characteristics of this engine. Chapter III presents some of the control methods of the last engine to be used in this memory as a generator in wind power production and in the last part presents a model for indirect vector control. Chapter IV presents the results of the simulation of an all-wind energy production system using the indirect vector control method of MADA, which has been studied in the previous chapters.

Keywords: Eolienne – modelling – turbine – optimization – MADA – control – renewable energy – power.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à Dieu qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont endurés.

*Nous remercions nos encadreur ***Docteur DJEBBAR MED SALAH*** pour l'effort qu'il a déployé, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger.*

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui ont contribué à notre formation universitaire.

Nous voulons remercier ici tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. Qu'ils trouvent dans ce mémoire une trace de notre reconnaissance.

Dédicace

Je consacre CE TRAVAIL A :

Ma Mère « Gaba.H » et Mon Père « Brahmi.B ».

Mon petit frère « Brahmi Ouail ».

Toute ma grande famille.

Tous Mes amis.

Mon encadreur « Dr. DJEBBAR MED SALAH »

*Tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à être
un ingénieur en ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE
aujourd'hui.*

*Je consacre également ce travail à tous les enseignants qui m'ont
enseigné pendant 19 ans du primaire à l'université.*

BRAHMI OUSSAMA

Dédicace

Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

Toutes nos familles

Tous nos amis

Je consacre CE TRAVAIL A :

Mon partenaire "Brahmi Oussama" pour les grands efforts qu'il a déployés pour réaliser ce mémoire à travers la recherche scientifique, l'édition, la coordination et l'impression.

DJAALALI FAOUZI

Table des matières

LISTE DES FIGURES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I Généralité sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne	
I. 1 Introduction	3
I. 2 Fonctionnement d'une éolienne	3
I. 2.1 constitution d'une éolienne	3
I. 2.2 Principe de fonctionnement.....	5
I. 2.3 Avantages et inconvénients	5
A- Les Avantages.....	5
B- Les inconvénients	6
I. 3 Les différents types d'éoliennes	6
I. 3.1 Les éoliennes à axe horizontal.....	7
I. 3.2 Les éoliennes à axe vertical.....	7
I.4 Les éoliennes connectées au réseau.....	8
I. 4.1 Les éoliennes à vitesse fixe	8
▪ Avantages du fonctionnement à vitesse fixe.....	9
▪ Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe	9
I.4.2. Les éoliennes à vitesse variable	9
❖ Intérêt de la vitesse variable	10
I.5 Aérogénérateurs à base d'une MADA	11
I.6 Un bref aperçu sur l'énergie éolienne en Algérie.....	11
I.7 CONCLUSION	14
Chapitre II Modélisation d'une chaîne de production d'énergie éolienne	
II.1 Introduction.....	15
II.2 Modélisation de l'éolienne	15
II.2.1 Présentation du système utilise	15
II.2.2 Loi de Betz.....	17
II.2.3 Le Multiplicateur.....	19

II.2.4 Equation Dynamique de l'arbre	19
II.3 Modélisation de la machine à double alimentation MADA	20
II.3.1 Hypothèses.....	21
II.3.2 Modèle mathématique de la MADA.....	22
II.3.2.1 Equations électriques de la machine	22
II.4.2 Equations mécanique de la machine	23
II.3.2.2 Modèle de la machine asynchrone a double alimentation (MADA) dans le plan (d-q)	24
A) Modèle Biphase (Transformation de Park).....	24
B) Application de la transformation de Park à la MADA.....	24
II.3.2.3 Equation du couple électromagnétique	26
II.3.2.4 Choix du référentiel	26
a) Référentiel lié au stator.....	26
b) Référentiel lié au rotor	27
c) Référentiel lié au champ tournant	27
II.4 Simulation et interprétation de la MADA à vide et en charge.....	28
a) Fonctionnement à vide et en charge de la MADA en mode moteur	28
b) Fonctionnement de la MADA en mode générateur.....	31
II.5 Conclusion.....	32

Chapitre III Control vectoriel indirect des puissances de la MADA

III.1 Introduction.....	33
III.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux	33
III.3 Technique de commande MLI (SPWM).....	35
III.3.1 Caractéristiques de la modulation MLI (SPWM).....	36
III.3.2 Simulation d'un onduleur à deux niveaux à vide et en charge	36
III.4.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	39
III.4.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	40
III.4.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques	41
III.5 Commande vectorielle indirecte (CVID).....	43
III.6 Conclusion	43

Chapitre IV Conversion d'énergie éolienne à base de la MADA contrôlée en CVID

IV.1 Introduction.....	44
IV.2 Simulation de la commande vectorielle indirecte de la MADA en puissance entraînée.....	44

par une éolienne en vue d'une production de l'énergie électrique 44

IV.2.1 Paramètres de la chaîne de conversion 44

IV.2.2 schéma global du système de conversion éolien à base de la commande CVID 44

IV.2.3 Simulations et interprétations 44

 Coté turbine 45

 Coté MADA mode génératrice 47

 La MADA fonctionne en mode moteur (perturbation) 50

IV. 3 Conclusion 52

CONCLUSION GENERALE 53

Références bibliographiques 55

ANNEXES 58

Liste des Figures

Fig. I. 1 Constitution d'une éolienne	4
Fig. I. 2 Constitution d'une nacelle	5
Fig. I. 3 Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne	5
Fig. I. 4 Eolienne en amont et en aval	7
Fig. I. 5 Différents types d'éoliennes	8
Fig. I. 6 Eolienne directement connectée au réseau	8
Fig. I. 7 Eoliennes à vitesse variable	10
Fig. I. 8 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique	10
Fig. I. 9 Machine asynchrone à double alimentation (à rotor bobiné)	11
Fig. I. 10 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	11
Fig. I. 11 Eolienne de 100 kW de Grand Vent	12
Fig. I. 12 Eolienne d'Adrar	12
Fig. I. 13 Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur (moyennes annuelles)	13
Fig. II. 1 Modes de fonctionnement de la MADA	16
Fig. II. 2 Structure de la chaîne éolienne utilisée	16
Fig. II. 3 Eolienne simplifiée	17
Fig. II. 4 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β	18
Fig. II. 5 Multiplicateur	19
Fig. II. 6 Schéma bloc du modèle de la turbine	20
Fig. II. 7 Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation	21
Fig. II. 8 Transformation des variables statoriques	25
Fig. II. 9 Transformation des variables rotoriques	25
Fig. II. 10 Schéma global sous Simulink de la MADA	28
Fig. II. 11 Tension rotorique délivrée par l'onduleur à deux niveaux	29
Fig. II. 12 Couple et vitesse mécanique lors d'un fonctionnement à vide et en charge en mode moteur	29
Fig. II. 13 Flux et courants statoriques et rotorique de la MADA suivant le repère (d-q)	30
Fig. II. 14 Couple et vitesse mécanique lors d'un fonctionnement à vide et en charge en mode générateur	31
Fig. II. 15 Flux et courants statoriques et rotorique de la MADA suivant le repère (d-q en mode générateur)	32
Fig. III. 1 Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux	33
Fig. III. 2 Algorithme de commande de la technique MLI pour le premier bras de l'onduleur	35
Fig. III. 3 Schéma global de l'onduleur triphasé à deux niveaux sur Simulink en mode Subsystem	36
Fig. III. 4 Schéma de puissance de l'onduleur triphasé à deux niveaux sur Simulink	37
Fig. III. 5 Bloc de commande de la technique MLI (SPWM) à deux niveaux	37
Fig. III. 6 Allures des trois tensions simples aux bornes de la charge RL	38
Fig. III. 7 Les trois courants à travers la charge triphasé RL	38
Fig. III. 8 Orientation du flux statorique sur l'axe d	39
Fig. III. 9 Schéma bloc du système à réguler de la MADA	42
Fig. III. 10 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée	43
Fig. IV. 1 Schéma global du système de conversion éolien à base de la commande CVID	45
Fig. IV. 2 Allure du vent en fonction du temps (m/s)	45
Fig. IV. 3 Vitesse mécanique de la turbine	46
Fig. IV. 4 Coefficient de puissance C_p et angle de calage β	46
Fig. IV. 5 Rapport de vitesse λ	46

<i>Fig. IV. 6 Vitesse mécanique de la MADA</i>	47
<i>Fig. IV. 7 Couple mécanique de la turbine mode génératrice (0-10sec)</i>	47
<i>Fig. IV. 8 Puissance active mesuré et de référence au stator</i>	48
<i>Fig. IV. 9 Puissance réactive au stator</i>	48
<i>Fig. IV. 10 Courants statorique (A)</i>	48
<i>Fig. IV. 11 Courants statorique de la première phase(Zoom)</i>	49
<i>Fig. IV. 12 Tension simple rotorique de la première phase Vra</i>	49
<i>Fig. IV. 13 Courants rotorique de la première phase</i>	49
<i>Fig. IV. 14 Courants rotorique dans le repère (d-q)</i>	50
<i>Fig. IV. 15 Couple mécanique de la MADA en mode générateur-moteur</i>	51
<i>Fig. IV. 16 Puissance active de la MADA en mode générateur-moteur</i>	51
<i>Fig. IV. 17 Courants rotorique dans le repère (d-q)</i>	51
<i>Fig. IV. 18 Courant du rotor de la première phase(Zoom)</i>	52
<i>Fig. IV. 19 Courant du stator de la première phase(Zoom)</i>	52

Liste des Tableaux

<i>Tableau II. 1 Coefficients définissant l'évolution de Cp</i>	18
---	----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines Capables de produire de l'électricité en grande quantité.

La production de l'énergie était basée sur les trois principaux modes de production

- Les centrales hydrauliques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique.
- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques.
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier des thermiques.

Mais le plus grand inconvénient de ces sources est qu'elles sont polluantes et non renouvelables.

Il existe d'autres manières efficaces de produire de l'électricité avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques comme les panneaux solaires transforment la lumière du soleil en électricité et les éoliennes utilisent la force du vent. C'est dans cette optique que vient s'insérer notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement à ce moment qui est l'énergie éolienne.

Afin de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent, cette étude s'intéresse à la machine asynchrone à double alimentation qui équipe une grande partie des éoliennes actuelles grâce à ses avantages relativement aux autres actionneurs électromagnétiques.

Le travail qui sera effectuée dans ce mémoire a comme objectif la modélisation des différents composants du processus de production de l'énergie électrique grâce à un aérogénérateur basé sur une génératrice à double alimentation.

Le premier chapitre est dédié à la présentation de l'énergie éolienne, les composants de système éolienne et le principe de conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie Electrique.

Le deuxième chapitre, fera l'objet de la modélisation de l'éolienne et de la machine asynchrone triphasé à double alimentation(MADA).

Le troisième chapitre, aborde la partie commande de la chaîne de conversion d'éoliennes. On a utilisé la technique de commande MLI pour piloter l'onduleur à deux niveaux. Ce dernier à fait l'objet d'une modélisation et simulation. On a étudié dans ce chapitre la méthode de commande

indirecte des puissances active et réactive statorique de la MADA, dont le but de commander la chaîne de conversion éolienne.

Le dernier chapitre est consacré aux différentes simulations accompagnées de l'analyse des résultats obtenus en vue d'évaluer les performances de la commande étudiée.

On termine ce modeste travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralité sur les systèmes de conversion de l'énergie éolienne

I. 1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. L'énergie éolienne est véhiculée par le vent, celle-ci est due indirectement à l'énergie solaire qui, en créant des différences de température entre les régions chaudes et les régions froides, provoque des vents. Un aérogénérateur (couramment appelé "éolienne") est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire de l'énergie électrique. Le vent est une ressource propre et inépuisable qui peut produire d'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluants [1]. Dans ce chapitre, on présente les éoliennes d'une manière générale, l'aérogénérateur utilisé pour la conversion de l'énergie éolien. Puis à la fin un aperçu sur les éoliennes en Algérie est exposé.

I. 2 Fonctionnement d'une éolienne

I. 2.1 constitution d'une éolienne

Il y a plusieurs types d'éoliennes, plus ou moins grandes, avec des pales de différentes tailles et donc des rendements différents. Cependant toutes les éoliennes sont composées des mêmes éléments : [2]

- **Les fondations** : elles permettent la fixation du mat ; c'est sur elles que repose le poids de l'éolienne.
- **L'armoire de couplage au réseau électrique** : elle est généralement située au pied de l'éolienne et on trouve à l'intérieur les armoires électriques qui contrôlent le fonctionnement de l'éolienne et son rattachement au réseau électrique.
- **Le mât** : il permet d'accéder à la nacelle et sert au passage de câbles électriques, reliés à l'armoire de couplage au réseau électrique. Plus le mat est grand plus l'éolienne dispose d'une vitesse élevée et constante.

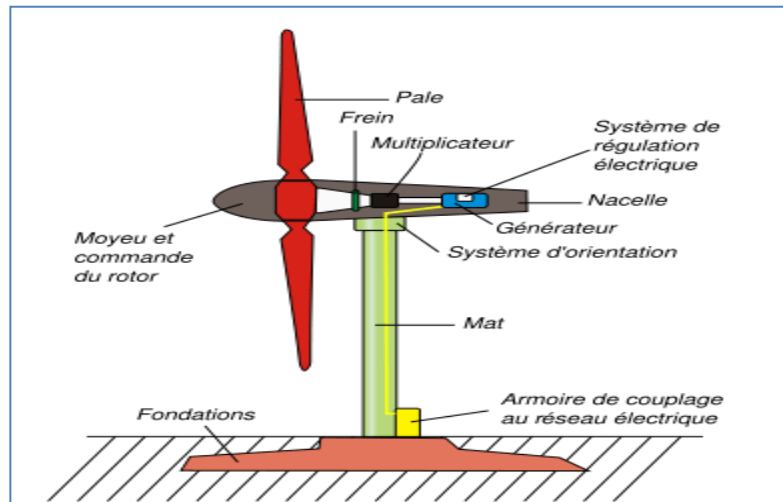


Fig. I. 1 Constitution d'une éolienne Constitution d'une éolienne

- **Le système d'orientation :** il supporte la nacelle et permet de l'orienter afin que les pales soit dans le sens du vent.
- **Les pales :** éléments moteur de l'éolienne qui convertissent la force du vent en énergie mécanique. Le nombre de pales est le plus souvent de trois pour une question de stabilité mais il existe des éoliennes bipales, c'est-à-dire qui ne possèdent que deux pales. Elles sont réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes car c'est d'elles que dépend le rendement du rotor.
- **Le moyeu et commande du rotor :** il permet de faire pivoter les pales pour un meilleur rendement en fonction de la force du vent.
- **La nacelle composée elle même de plusieurs parties :**
 - le rotor possède un système de torsion qui permet d'orienter les pales pour moduler la prise de vent et ainsi permettre à l'éolienne de tourner toujours à peu près à la même vitesse, c'est-à-dire entre 19 et 30 tours par minute.
 - le multiplicateur de vitesse permet d'augmenter la vitesse de rotation. On passe de 19 à 30 tours par minute à environ 1500 tours par minute.
 - le frein à disque limite la vitesse et bloque la rotation en cas de vent trop fort ou pour la maintenance.
 - le générateur produit le courant électrique.
 - les girouettes et anémomètres permettent de mesurer la vitesse du vent et transmettent ces données à l'informatique de commande. Ainsi l'éolienne peut se régler automatiquement.

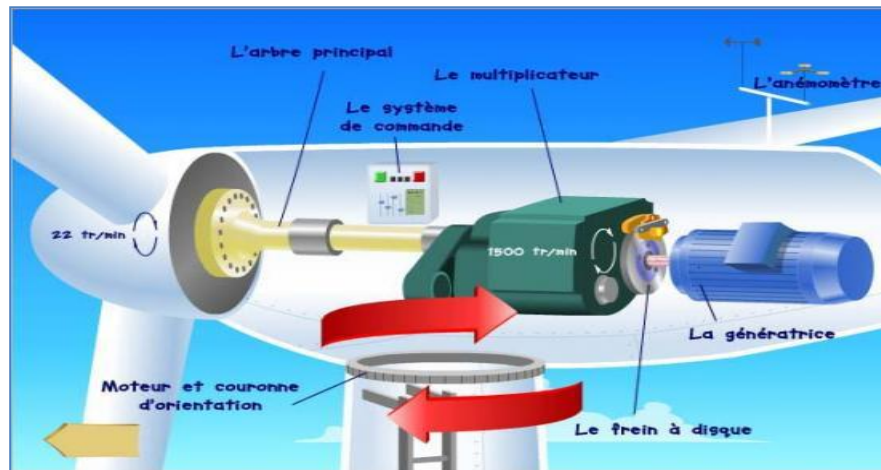


Fig. I. 2 Constitution d'une nacelle

I. 2.2 Principe de fonctionnement

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette dernière est ensuite transformée en énergie électrique par une génératrice.

Le fonctionnement général est illustré par la figure (I.3). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques.

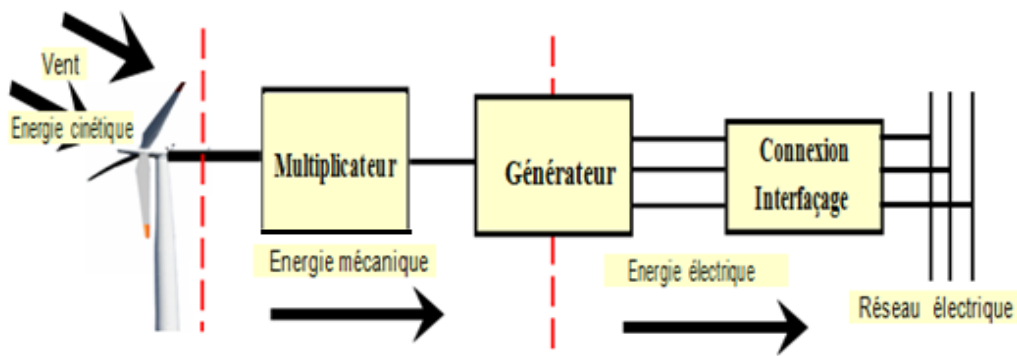


Fig. I. 3 Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne

I. 2.3 Avantages et inconvénients

A- Les Avantages

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

- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la ténacité de la durée de vie.
- ✓ Du point de vue écologique: moins de rejet de gaz carbonique.
- ✓ Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement environ 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- ✓ Une éolienne est en grande partie recyclable car construite en acier. Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans), elle est entièrement démontable.
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [3].
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [4,5].
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ✓ Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

B- Les inconvénients

- ✓ Dégradation de l'aspect visuel.
- ✓ Bruit et champs électromagnétiques des moteurs.
- ✓ L'impact sur les oiseaux: certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [6].
- ✓ D'autres études démontrent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas piéger par les aéroturbines [3].
- ✓ La réception des ondes hertziennes peut être perturbée, ce qui provoque une image bruitée sur les récepteurs de télévision.
- ✓ Les parcs éoliens produisent des interférences avec les radars et en particulier avec les radars météorologiques.

I. 3 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles: celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I. 3.1 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien .

Ce type d'éoliennes comporte certains désavantages, entre autres, le générateur est situé au sommet de la tour, ce qui en rend difficiles l'entretien et les réparations.

✓ On peut distinguer les éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent, "hélice au vent" , et celles dont l'hélice est en aval par rapport au vent, "hélice sous le vent"

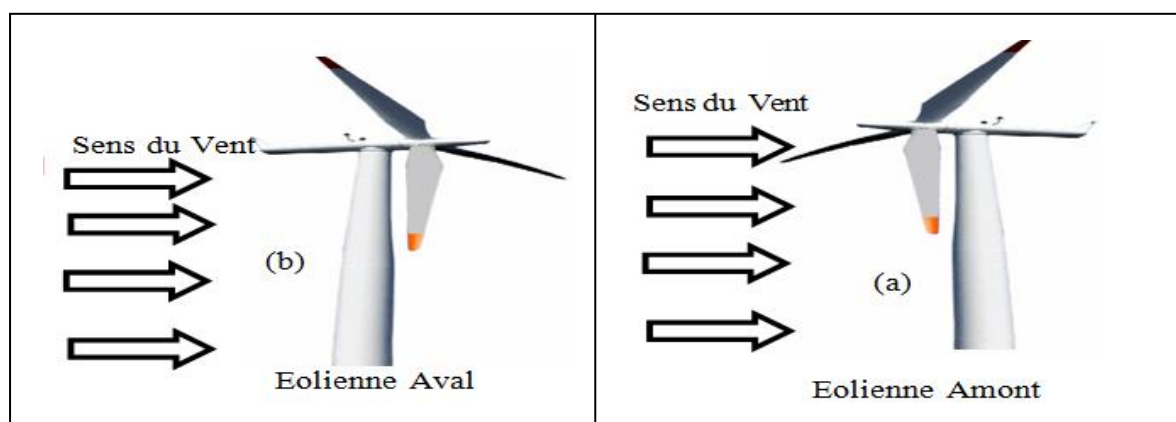


Fig. I. 4 Eolienne en amont et en aval

-Eoliennes Lentes

Les éoliennes lentes sont munies d'un grand nombre de pales entre (20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse.

-Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids et de leur rendement élevé. Par contre, elles présentent l'inconvénient de démarrer difficilement.

I. 3.2 Les éoliennes à axe vertical

Les turbines à axe vertical sont très peu répandues. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Dans ce type d'éolienne on distingue:

-Le rotor de Savonius

Ce rotor a été inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924. Il est constitué de deux sections semi-circulaires cylindriques formant approximativement un S [7].

Il est basé sur le principe de "la 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.

-Le rotor de Darrieus

Le rotor Darrieus se caractérise par la forme en C de ses pales. Ce type de rotor repose sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif; Effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion.



Eolienne lente



Eolienne rapide



Le Rotor de savonius



Le Rotor de Darrieus

Fig. I. 5 Différents types d'éoliennes

I.4 Les éoliennes connectées au réseau

I. 4.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice **figure (I.9)**

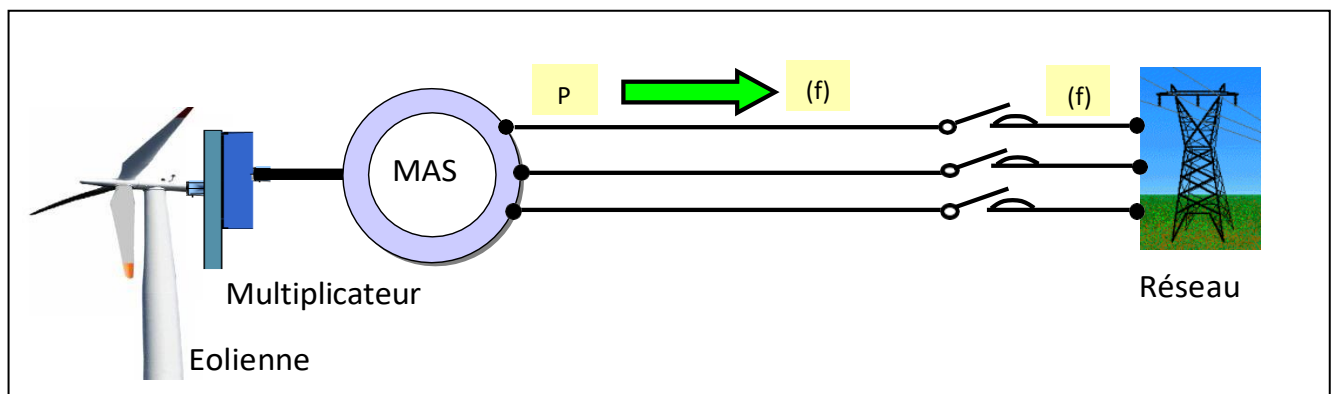


Fig. I. 6 Eolienne directement connectée au réseau

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (Ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s=1500tr/min$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne figure (I.6) [8].

▪ Avantages du fonctionnement à vitesse fixe

Le fonctionnement à vitesse fixe présente les avantages suivants:

- Un système électrique plus simple.
- Une plus grande fiabilité.
- Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- L'absence de système électronique de commande.
- Un coût moins onéreux.

▪ Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

Néanmoins il possède les inconvénients suivants :

- La puissance extraite n'est pas optimisée.
- La maintenance de la boîte à vitesse à assurer.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur.
- La magnétisation de la machine non gérée.

I.4.2. Les éoliennes à vitesse variable

La configuration de la figure (I.7-a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure (I.7-b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobine. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

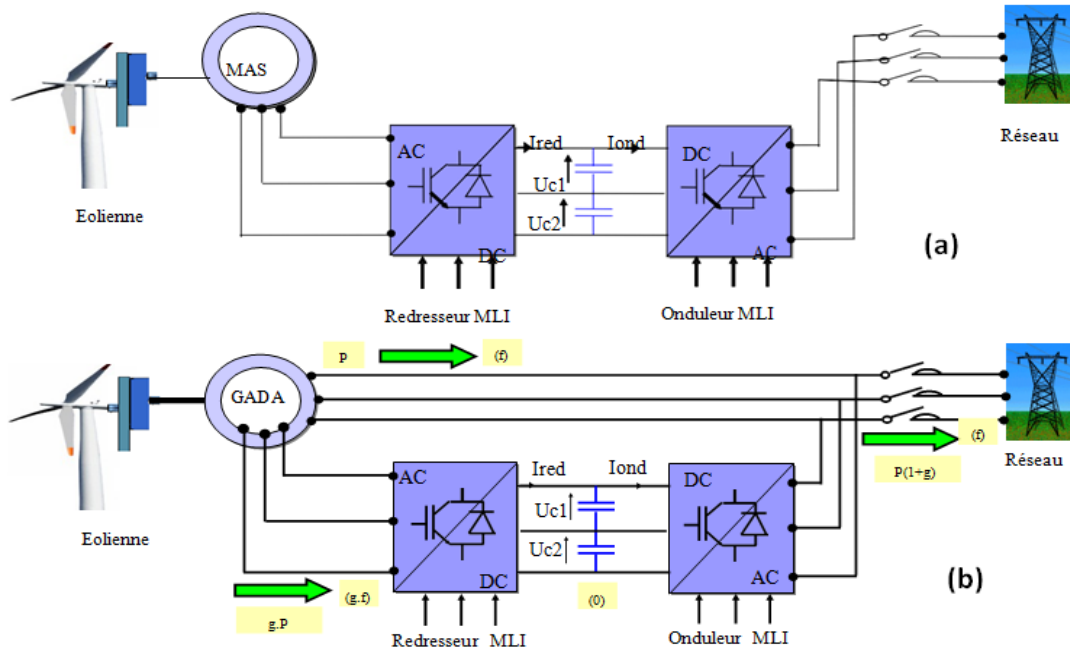


Fig. I. 7 Eoliennes à vitesse variable

❖ Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (I.8).

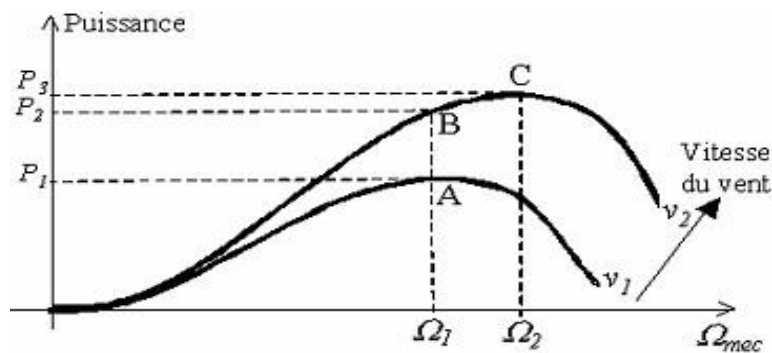


Fig. I. 8 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique

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

Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (Ω_{ref}) calculée pour maximiser la puissance extraite.

I.5 Aérogénérateurs à base d'une MADA

Il existe plusieurs types d'aérogénérateur à base de la machine asynchrone à cage ou à double alimentation MADA. Dans notre cas, on donne la structure de l'aérogénérateur fondé essentiellement sur une machine à double alimentation (voir fig. I.9 et fig. I.10)

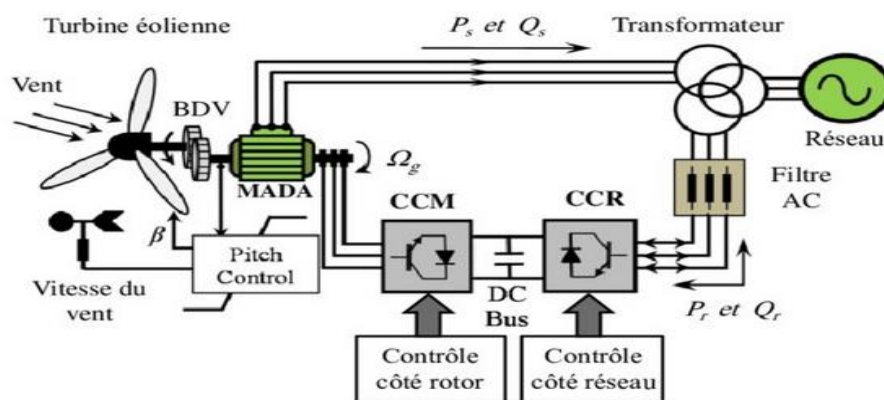


Fig. I. 9 Machine asynchrone à double alimentation (à rotor bobiné)

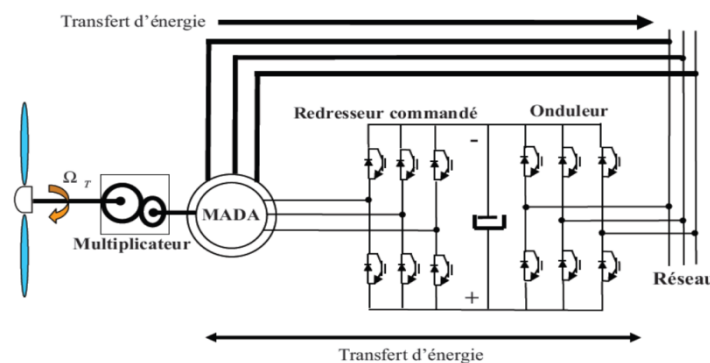


Fig. I. 10 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

I.6 Un bref aperçu sur l'énergie éolienne en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site de Grand Vent (Alger). Conçue par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-ALBAN en Angleterre. Cette bipale de type pneumatique, à pas variable, de 30 m de haut et avec un

diamètre de 25 m (figure I.11) fut rachetée par Electricité et Gaz d' Algérie puis démontée et installée en Algérie [9].



Fig. I. 11 Eolienne de 100 kW de Grand Vent

En Algérie, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014. L'énergie électrique fournie par cette ferme est injectée au réseau local et le taux de pénétration de l'énergie éolienne représenterait 5% environ. La puissance éolienne totale installée en Algérie est donc actuellement insignifiante. Cependant, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son nouveau programme des Energies Renouvelables, d'installer d'autres parcs éoliens d'une puissance totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020) pour atteindre 5010 MW à l'horizon 2030. A noter que ce nouveau programme vise aussi bien les installations connectées au réseau électrique que les petites éoliennes, destinées au pompage de l'eau ou à l'alimentation en électricité des localités isolées [10].



Fig. I. 12 Eolienne d'Adrar

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [11]. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre (figure I.12) a fonctionné pendant près de 10 ans. Par ailleurs, selon des archives du Ministère de l'hydraulique, deux autres éoliennes ont été installées à Mecheria, pour l'alimentation en eau potable de la ville et à Naama, pour le pompage de l'eau. Les deux machines étaient couplées à une génératrice à courant continu et entraînaient une pompe électrique à courant continu. Une autre éolienne du même type a été installée pour la protection cathodique des tubages du Chott Chergui.

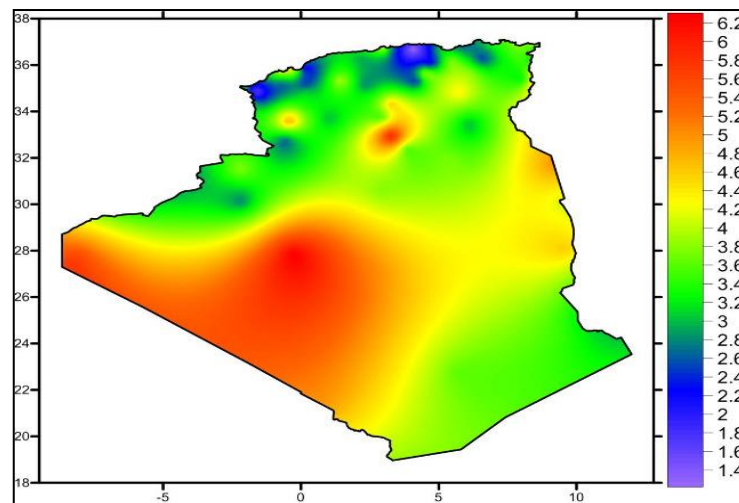


Fig. I. 13 Carte des vitesses de vent à 10 m de hauteur (moyennes annuelles)

Selon le premier Atlas Vent de l'Algérie établi par l'ONM en 1990 [12], les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats, qui avaient été obtenus à partir d'un traitement statistique des données vent couvrant jusqu'à 10 années de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER (fig. I.13).

Mais récemment, dans le nouvel Atlas éolien établi par l'ONM l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud a été mise en évidence. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable [13]. A noter que lors de l'élaboration du premier Atlas, seules 36 stations météorologiques existaient alors que pour le dernier Atlas, le nombre de points de mesures est passé à 74. Cependant, étant donnée la superficie du territoire algérien, ce dernier chiffre reste faible. Des stations de mesures éoliennes complémentaires sont en cours d'installation. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation.

I.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a évoqué la description de l'ensemble des composants d'un système éolien. Le principe de fonctionnement d'une éolienne, avantages et inconvénients, types des éoliennes, aérogénérateurs utilisés dans les conversions de l'énergie éolienne, ont fait l'objet de ce chapitre.

On va s'intéresser dans ce mémoire à l'aérogénérateur à structure MADA.

Le chapitre se termine par un bref aperçu sur l'énergie éolienne en Algérie.

Chapitre II

Modélisation d'une chaîne de production d'énergie éolienne

II.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La multiplication des éoliennes a 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.

A fin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la simulation du système de conversion est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée.

On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale (Turbine-MADA).

II.2 Modélisation de l'éolienne

II.2.1 Présentation du système utilise

Le principe de fonctionnement général de la chaîne éolienne est relativement simple : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, c'est la différence de pression entre les deux faces de la pale qui crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [14].

Cette dernière est transmise vers la génératrice à travers un arbre. Seulement, et parce que la turbine tourne avec une vitesse relativement lente, le système global inclut un multiplicateur permettant l'amplification du mouvement de rotation de l'arbre auquel est connecté le rotor de la machine, ainsi, la vitesse de la machine est adaptée à celle de la turbine de manière à faire fonctionner la première dans des conditions nominales (1500 tr/min à 3000 tr/min).

La conversion électromécanique se fait au niveau de la génératrice, une MADA dans notre cas. Cette machine est spéciale de par sa caractéristique de débiter la puissance à traves et son stator et son rotor. Les modes de son fonctionnement en génératrice sont décrits suivant la fig. II.1 [15] :

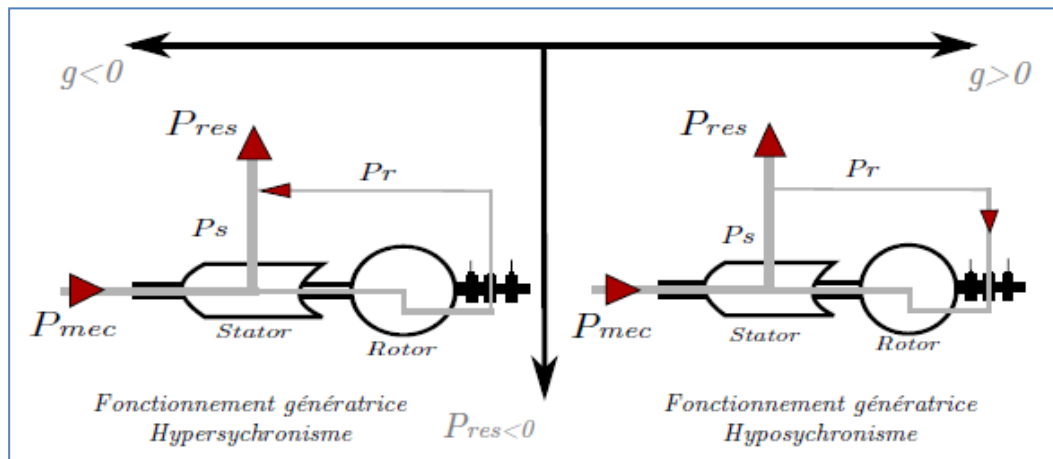


Fig. II. 1 Modes de fonctionnement de la MADA

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance, correspondant à g fois la puissance mécanique, est transmise au réseau par l'intermédiaire du rotor, c'est la cascade hyper-synchrone. Dans le cas où le fonctionnement est hypo-synchrone, cette fraction de puissance est réinjectée à la machine, mais au niveau du rotor[16].

C'est en exploitant cette caractéristique de la MADA que la commande intervient au niveau du rotor de la machine. En effet, l'implémentation des commandes sera établie en utilisant un double convertisseur (Onduleur -redresseur) et ce, dans le but de piloter la machine (régler son glissement) et ainsi gérer le transfert de puissance vers le réseau. La figure (II.2) illustre le système global utilisé.

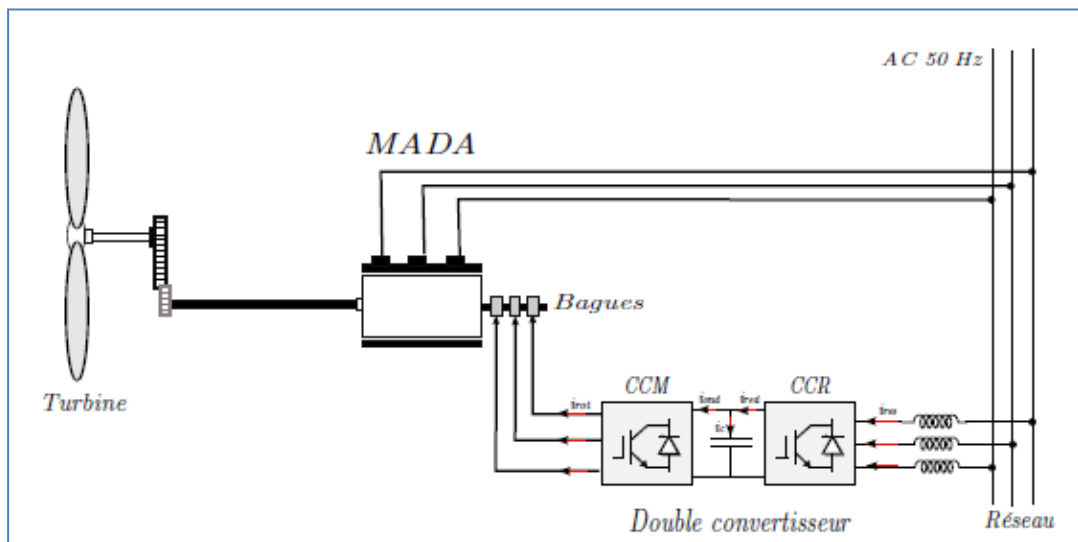


Fig. II. 2 Structure de la chaîne éolienne utilisée

II.2.2 Loi de Betz

Étudions l'éolienne présentée (figure II.3). D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3 \quad \text{II.1}$$

Avec $S_{éolienne}$ la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air (1.25 kg/m^3) et v la vitesse du vent [17].

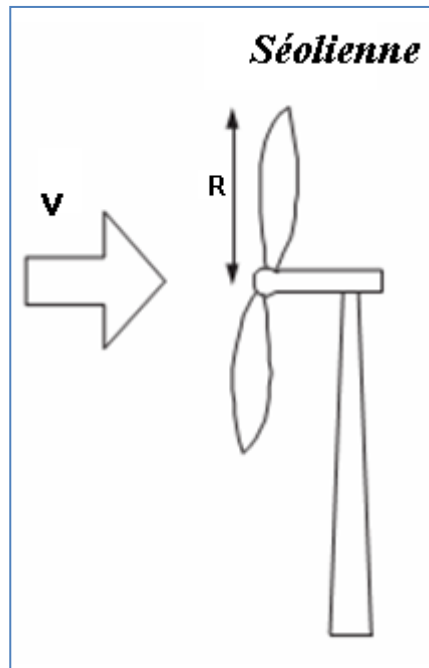


Fig. II. 3 Eolienne simplifiée

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_{vent}).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p \times P_{vent} \quad \text{II.2}$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à $16/27$.

Le coefficient C_p , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales β_i et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad \text{II.3}$$

Avec R le rayon des pales de l'éolienne, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne et v la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques.

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule (II.4) empirique suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \cdot \frac{1}{\lambda} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda}} + C_6 \cdot \lambda \quad \text{II.4}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Avec β exprimé en degrés.

Les coefficients C_1 à C_6 dépendent de la turbine considérée. L'exemple donné ci-dessous correspond à une turbine de puissance nominale de 300kW.

Coefficient	Valeur
C_1	0.5176
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

Tableau II. 1 Coefficients définissant l'évolution de C_p .

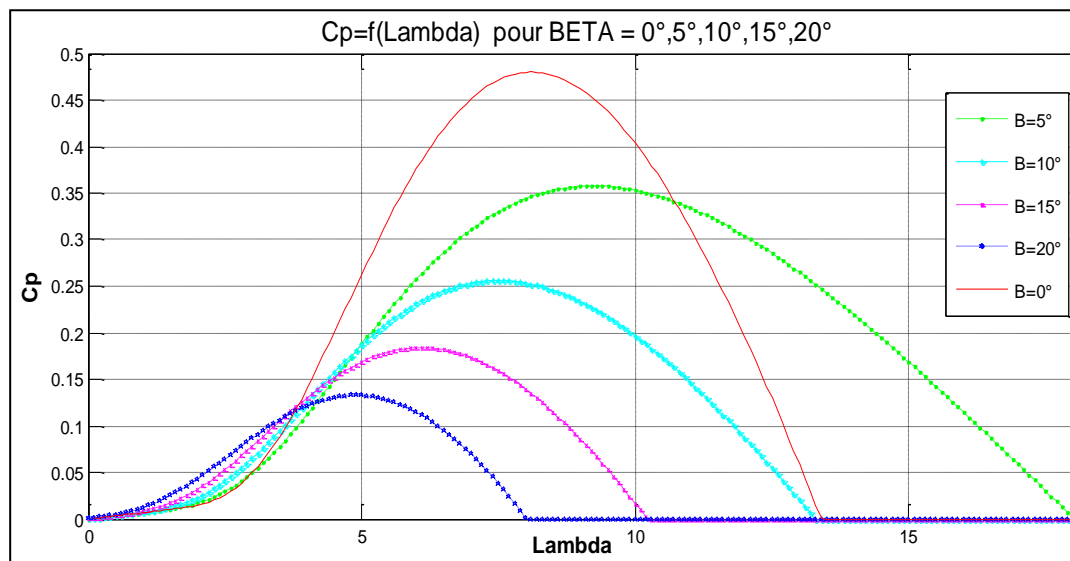


Fig. II. 4 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

La figure II.4 représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation $C_p(\lambda, \beta)$) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à $\lambda_{optimal}$ à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale.

Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable [18]. En effet, afin de Maintenir $\lambda = \lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent (équation II.3).

II.2.3 Le Multiplicateur

Également appelé boîte de vitesse ou encore boîte d'engrenages. Le multiplicateur de vitesse existe dans la plupart des éoliennes commercialisées. En effet, quand le diamètre du rotor est grand, les vitesses de rotation sont trop faibles. Il est alors indispensable d'intercaler un multiplicateur entre la turbine et la génératrice afin d'adapter les deux vitesses de rotation au même ordre de grandeur.

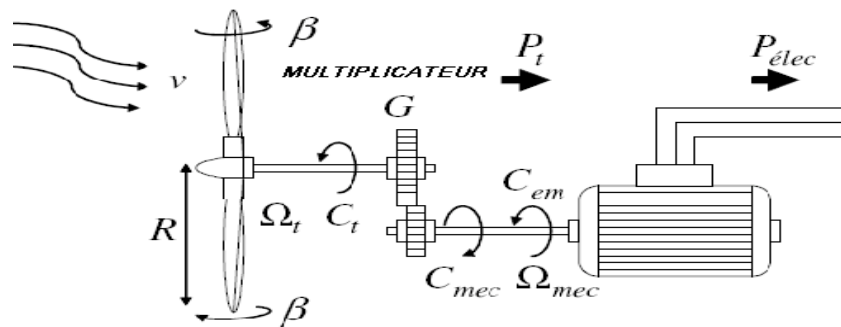


Fig. II. 5 Multiplicateur

Il s'agit d'un dispositif caractérisé par un gain entre le couple aérodynamique C_{aero} et le couple électromagnétique C_{em} :

$$C_{em} = \frac{C_{aero}}{G_g} \quad \text{II.5}$$

G_g : Étant le gain du multiplicateur.

On en déduit la relation suivante entre la vitesse de rotation de la turbine Ω_T et celle de la génératrice G_g

$$\Omega_T = \frac{\Omega_g}{G_g} \quad \text{II.6}$$

II.2.4 Equation Dynamique de l'arbre

La masse de l'éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{turb} et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie totale de l'arbre J qui apparaît sur le rotor de la génératrice peut être donnée comme suit: [18].

$$J = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_g \quad \text{II.7}$$

Où : G^2 est le gain du multiplicateur et J_g l'inertie de la génératrice électrique.

Il est à noter que le moment d'inertie de la génératrice peut être négligé devant l'inertie de la turbine et cela dans le cas des grosses éoliennes. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.8}$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{vis} - C_{em} \tag{II.9}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \tag{II.10}$$

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit par un schéma bloc de la turbine [19]:

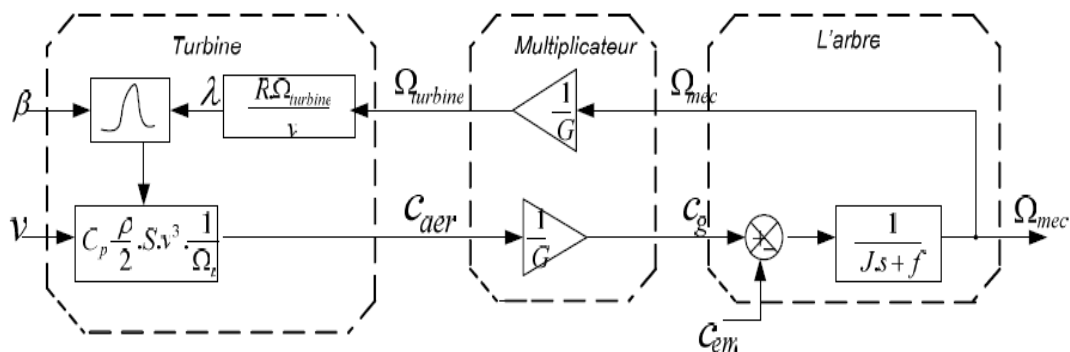


Fig. II. 6 Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3 Modélisation de la machine à double alimentation MADA

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Comme la machine asynchrone, elle se compose d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile.

Le stator est alimenté par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \tag{II.11}$$

Ω_s : La pulsation du réseau d'alimentation triphasé.

p : Le nombre de pair de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, tourne à la vitesse $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$ par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure (II.7).

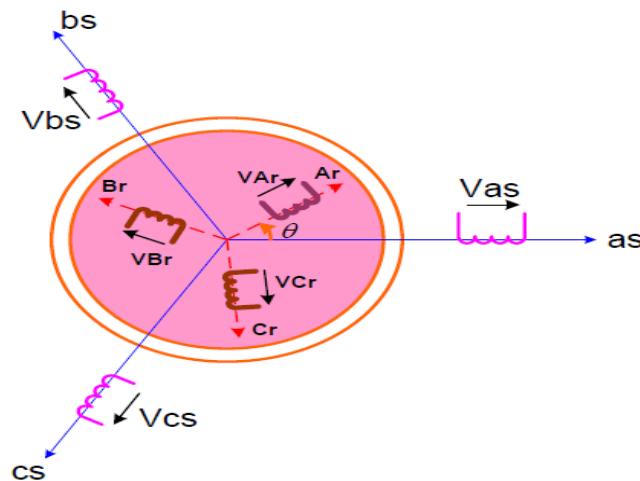


Fig. II. 7 Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation

as, bs, cs : phase du stator.

Ar, Br, Cr: phase du rotor.

II.3.1 Hypothèses

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [20].

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Les relations entre les flux et les Courants sont d'ordre linéaire.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoidalement le long de la périphérie des deux armatures.

- Les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes.

II.3.2 Modèle mathématique de la MADA

II.3.2.1 Equations électriques de la machine

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad \text{II.12}$$

Avec : $[V_r] \neq [0]$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad \text{II.13}$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} v_{As} \\ v_{Bs} \\ v_{Cs} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{As} \\ I_{Bs} \\ I_{Cs} \end{bmatrix}$$

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

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

Les flux sont donnés par:

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

l_s, l_r : Inductances de fuites des statoriques et rotoriques.

M_s, M_r : inductances mutuelles.

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{II.14}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

En remplaçant (II.13) dans (II.12), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad \text{II.15}$$

II.4.2 Equations mécanique de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante:

$$[C_{em}] = \frac{1}{2} P \cdot [i]^t \cdot \frac{d[L]}{d\theta} [i] \quad \text{II.16}$$

Avec :

- $[i]$: Matrice de courant total ;
- $[L]$: Matrice inductance totale ;
- p : est le nombre de paire de pôle.

$$[i] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} ; [L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$$

Compte tenu que tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont à coefficients constants, on aura :

$$[C_{em}] = P \cdot [I_s]^t \cdot \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad \text{II.17}$$

Et l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad \text{II.18}$$

- Avec :
- J : Moment d'inertie.
 - C_r : Couple résistant.
 - f_r : Coefficient de frottement.

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.3.2.2 Modèle de la machine asynchrone a double alimentation (MADA) dans le plan (d-q)

A) Modèle Biphase (Transformation de Park)

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d-q) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [21].

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q).

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)][x_{abc}]$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T$$

B) Application de la transformation de Park à la MADA

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park θ par θ_s pour les équations du stator et θ par θ_r pour celles du rotor, on obtient :

Pour le stator :

$$[i_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][i_s] \quad ; \quad [i_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{dqo}]_s \quad \text{II.20}$$

$$[v_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][v_s] \quad ; \quad [v_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[v_{dqo}]_s \quad \text{II.21}$$

$$[\Phi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][\Phi_s] \quad ; \quad [\Phi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{dqo}]_s \quad \text{II.22}$$

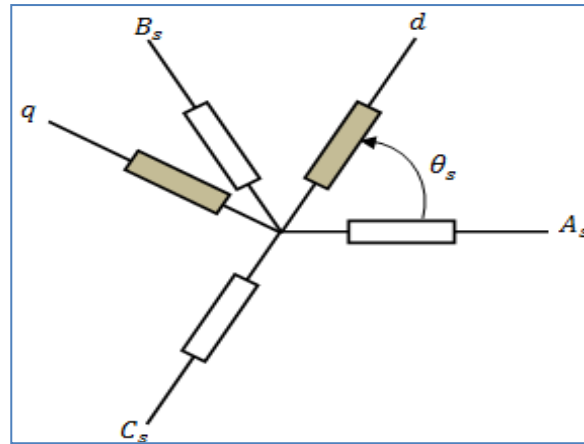


Fig. II. 8 Transformation des variables statoriques

$[P(\theta_s)]$ est la matrice de la transformation de Park appliquée au stator de la machine. θ_s étant l'abscisse angulaire du référentiel (d,q) tournant à la vitesse ω_s par rapport à l'axe de la phase statorique (A). θ_s est donnée par la relation suivante [22,23].

$$\theta_s(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt + \theta_s(0) \quad \text{II.23}$$

$\theta_s(0)$ Est l'abscisse initiale du référentiel arbitraire par rapport à la phase (a) du stator.

Pour le rotor :

$$[i_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][i_r] \quad ; \quad [i_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[i_{dqo}]_r \quad \text{II.24}$$

$$[v_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][v_r] \quad ; \quad [v_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[v_{dqo}]_r \quad \text{II.25}$$

$$[\Phi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][\Phi_r] \quad ; \quad [\Phi_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[\Phi_{dqo}]_r \quad \text{II.26}$$

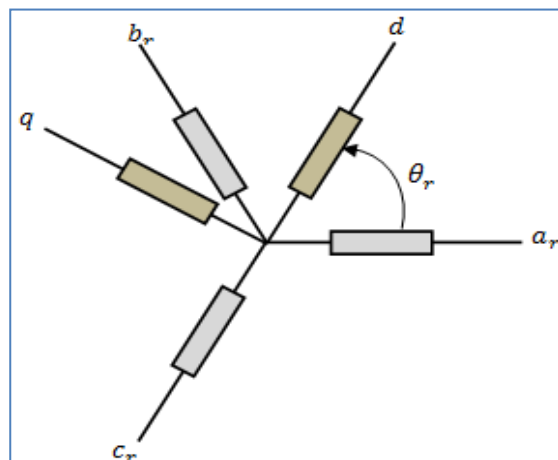


Fig. II. 9 Transformation des variables rotoriques

$[P(\theta_r)]$ Est la matrice de la transformation de Park appliquée au rotor de la machine. θ_r Est l'abscisse du référentiel orthogonal par rapport à la phase rotorique (ar) tel que [22,23] :

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad \text{II.27}$$

$\theta_r(0)$ Est la position initiale du référentiel par rapport à la phase rotorique (a).

Après développement le système d'équations statorique et rotorique des tensions est comme suit :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ [v_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad \text{II.28}$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivantes:

$$\begin{cases} [v_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ [v_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.29}$$

Les deux systèmes d'équation (II.28) et (II.29) s'écrivent sous la forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s \omega_s & PM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + PL_s & \omega_s M & PM \\ PM & -\omega_r M & R_r + PL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & PM & \omega_r L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{II.30}$$

II.3.2.3 Equation du couple électromagnétique

Après qu'on a effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes, on trouve celle-ci [24] :

$$C_e = P(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad \text{II.31}$$

II.3.2.4 Choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels, le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié :

a) Référentiel lié au stator

Il se traduit par les relations suivantes : $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega$; $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & 0 & PM & 0 \\ 0 & R_s + PL_s & 0 & PM \\ PM & -\omega M & R_r + PL_r & -\omega L_r \\ \omega L_r & PM & \omega L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{II.32}$$

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation.

C'est ce référentiel, qu'on doit utiliser pour notre cas au chapitre trois et quatre, pour commander vectoriellement et indirectement les puissances actives et réactives de la MADA en tant que génératrice (GADA).

b) Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, on aura : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$; $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$

Avec : $\theta_s = \theta + \theta_r$; $\omega_s = \omega$

Le système d'équation devient :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s \omega & PM & -\omega M \\ \omega L_s & R_s + PL_s & \omega M & PM \\ PM & 0 & R_r + PL_r & 0 \\ 0 & PM & 0 & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{II.33}$$

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

c) Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par les relations suivantes : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$; $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s = \omega_r$

On aura le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s \omega_s & PM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + PL_s & \omega_s M & PM \\ PM & -\omega_r M & R_r + PL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & PM & \omega_r L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{II.34}$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation.

II.4 Simulation et interprétation de la MADA à vide et en charge

La MADA est soumise à des essais à vide et charge, suivant le modèle illustré sur la figure (II.10), en mode moteur et générateur. Le stator est alimenté par un réseau de 230 V, 50 Hz, alors le rotor est alimenté par un onduleur à deux niveaux piloté par la technique MLI (fp= 1kHz, r = 0.8 et Vdc=7 V). La tension délivrée par l'onduleur dans le circuit du rotor est caractérisée par Vr=5V, fr= 5Hz (Fig.II.11).

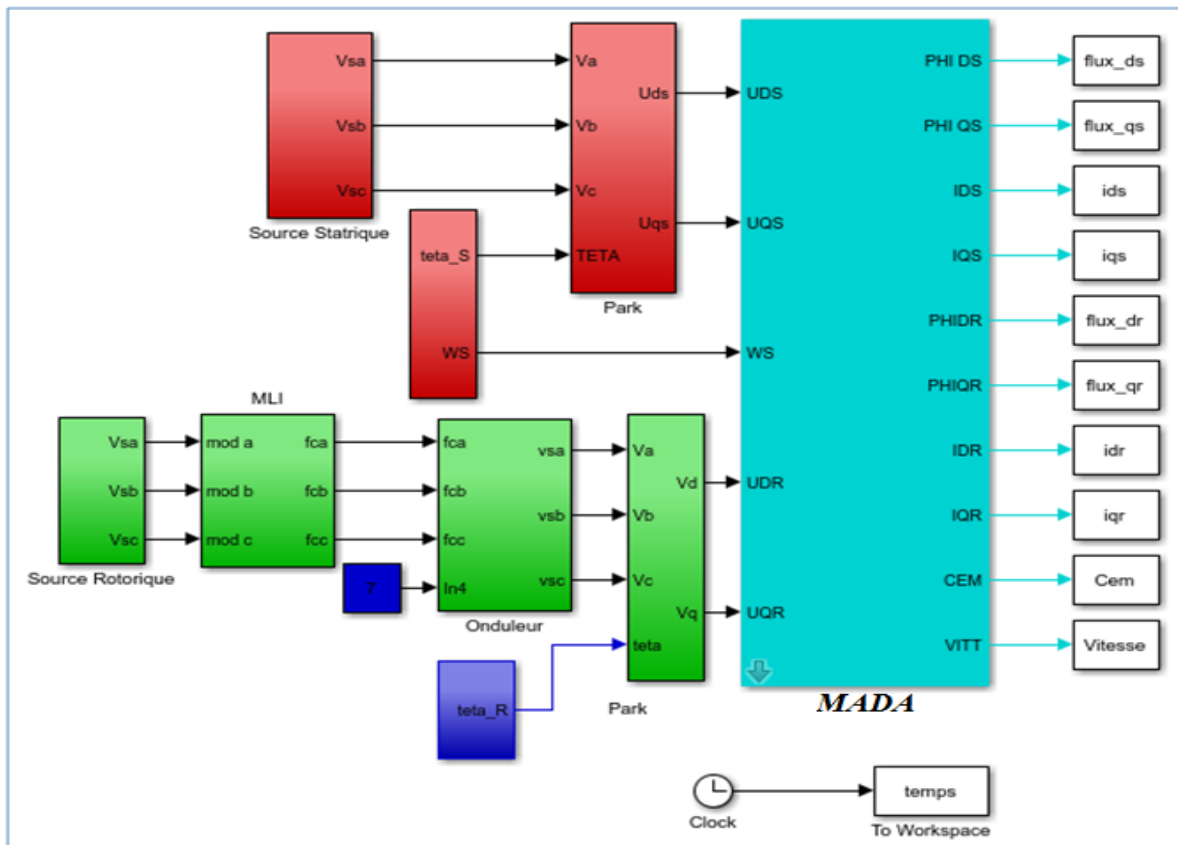


Fig. II. 10 Schéma global sous Simulink de la MADA

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures ci-dessous.

a) Fonctionnement à vide et en charge de la MADA en mode moteur

La machine à vide, s'approche de sa vitesse de synchronisme au bout d'un temps de réponse de 0,5s, et elle paraît stable même après application du couple de charge à l'instant $t= 2$ secondes, qui a fait diminuer la vitesse sans que la machine perde sa stabilité.

Au moment où on applique un couple de charge de +40N.m, la vitesse diminue, automatiquement le glissement augmente et la machine est en mode moteur, hypo synchrone.

Le couple électromagnétique, suit correctement son couple de charge. Sa valeur est nulle à vide et la vitesse est égale à la vitesse du champ tournant (synchronisme - Fig. II.12).

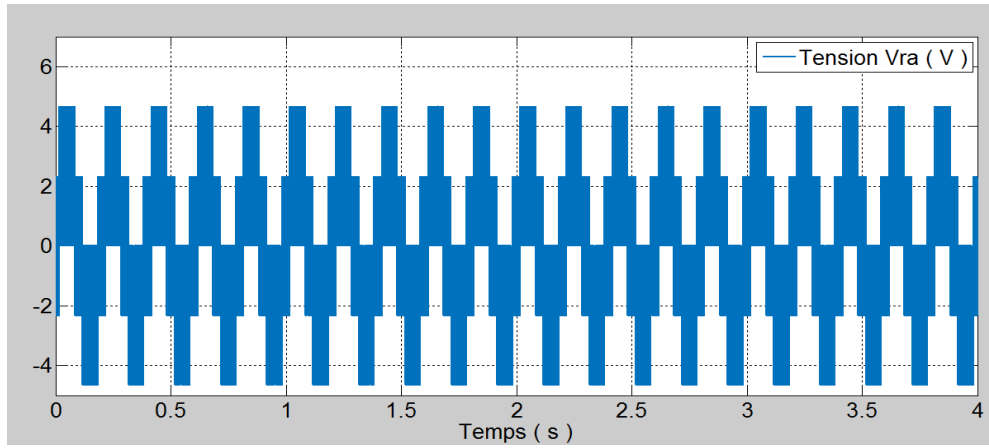


Fig .II. 11 Tension rotorique délivré par l'onduleur à deux niveaux

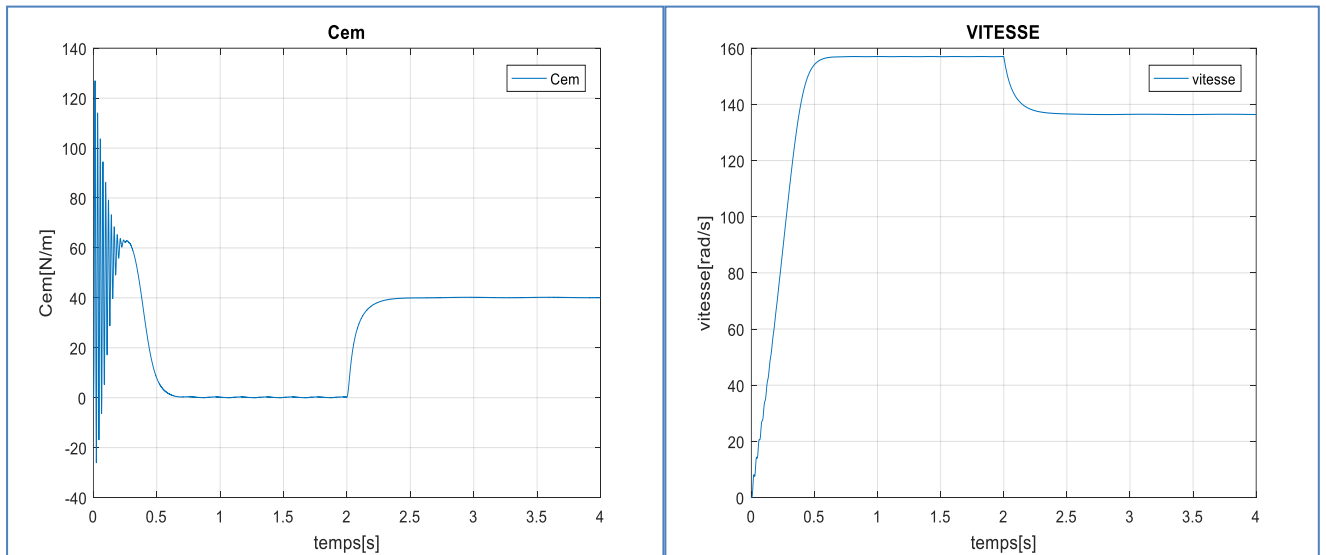


Fig. II. 12 Couple et vitesse mécanique lors d'un fonctionnement à vide et en charge en mode moteur

Les flux et courants statoriques et rotorique de la MADA suivant le repère (d-q), sont illustrés sur la figure(II.13)

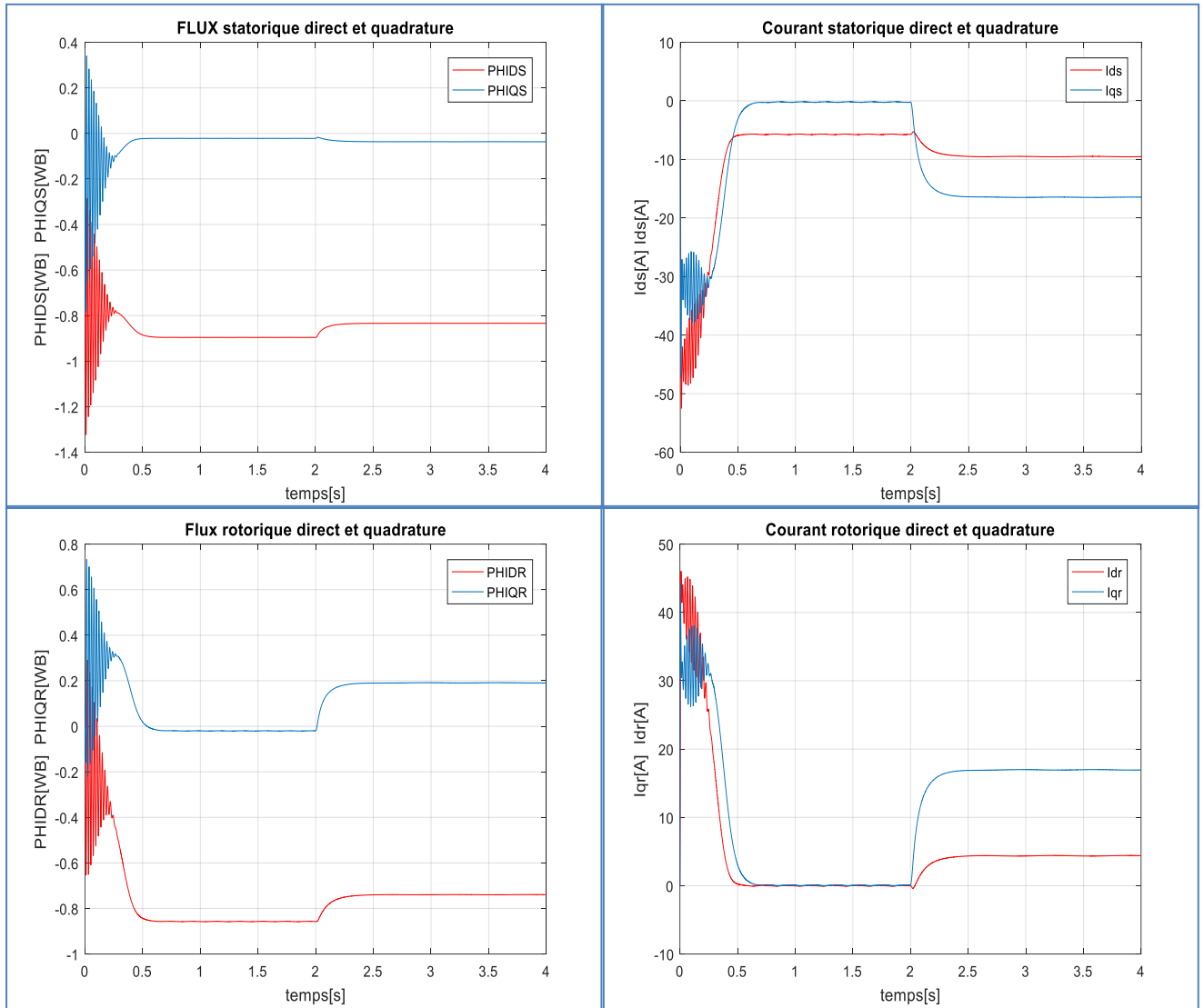


Fig. II. 13 Flux et courants statoriques et rotorique de la MADA suivant le repère (d-q)

b) Fonctionnement de la MADA en mode générateur

Lorsque on applique un couple de charge négatif -40N.m (c'est-à-dire la MADA est entraînée par la charge), la vitesse augmente, le glissement diminue et son valeur est négatif, la machine est en mode générateur (Fig. II.14).

Le couple électromagnétique suit correctement le couple de charge imposé, la vitesse mécanique du rotor à partir de l'instant $t=2$ seconde est supérieure à la vitesse du synchronisme. La machine est en hyper synchrone, mode générateur.

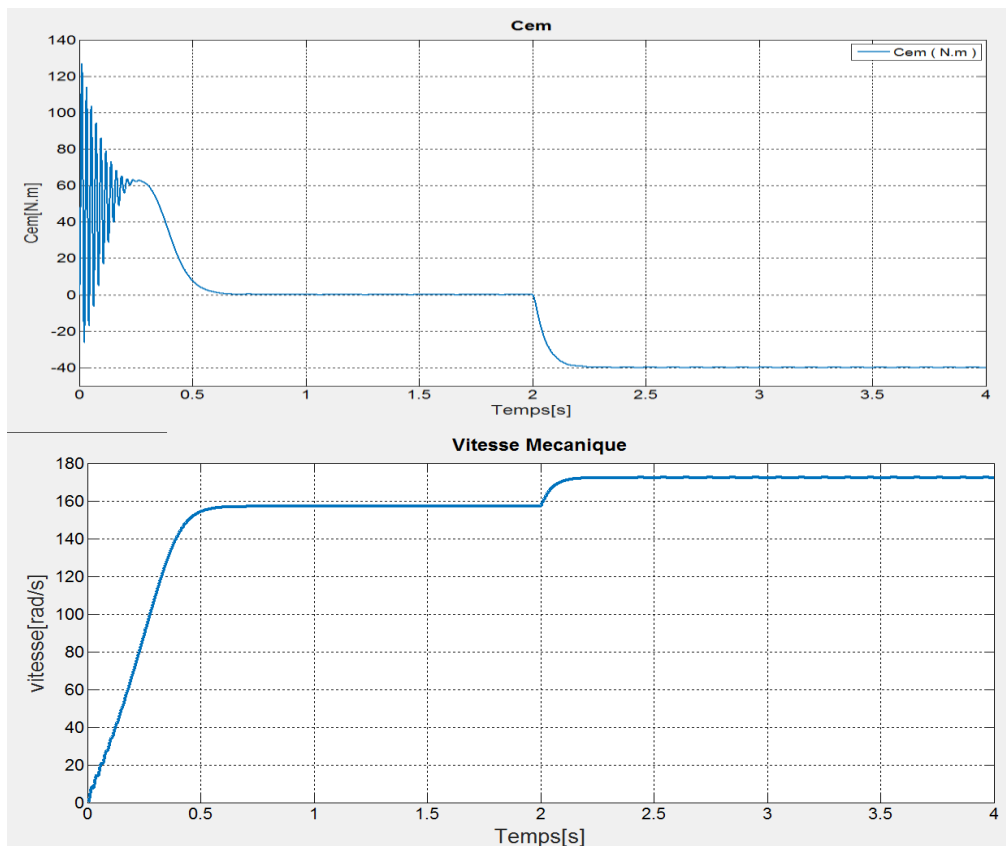


Fig. II. 14 Couple et vitesse mécanique lors d'un fonctionnement à vide et en charge en mode générateur

Les allures des courant rotorique, les flux rotoriques et statorique, suivent correctement le mode de fonctionnement imposé (Fig.II.13 et Fig.II.15).

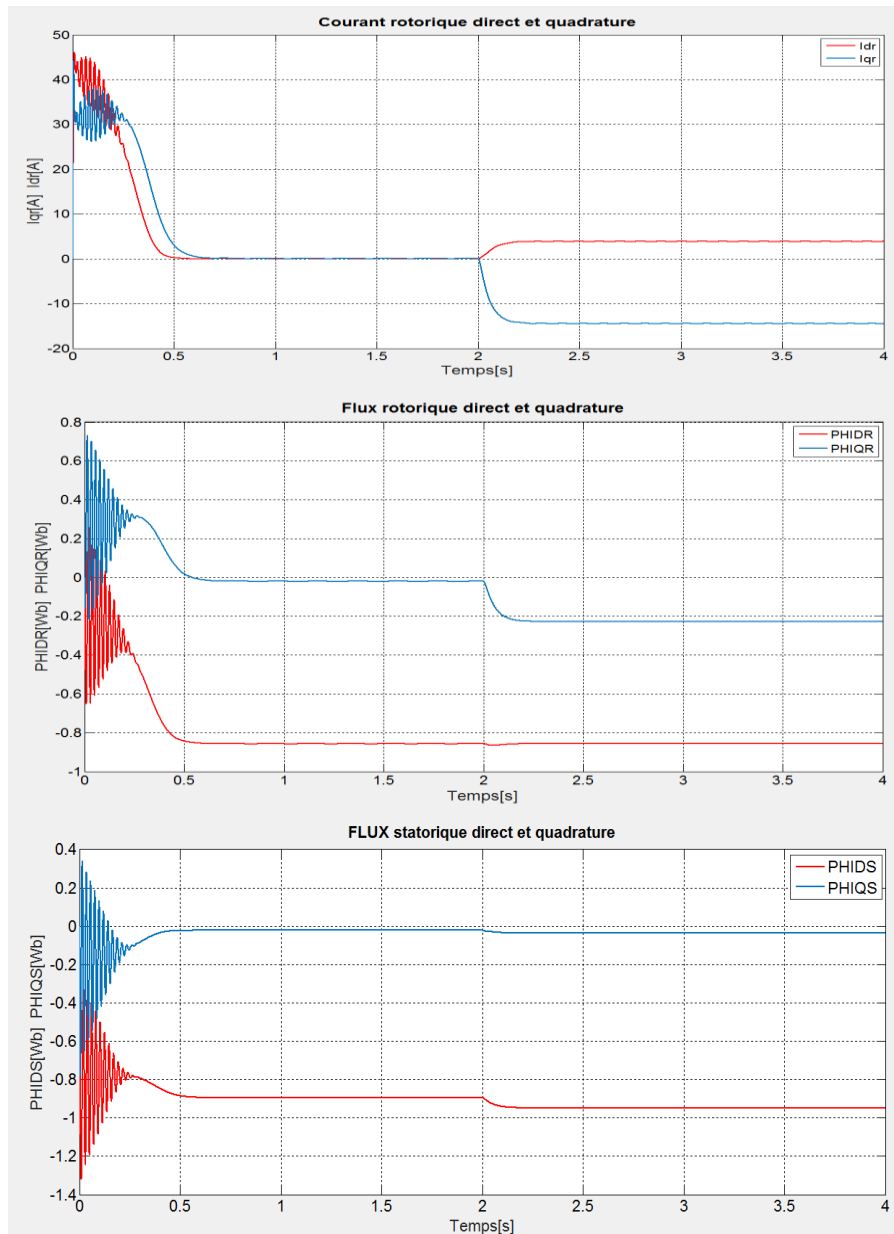


Fig .II. 15 Flux et courants statoriques et rotorique de la MADA suivant le repère (d-q en mode générateur)

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique à été établi.

On a constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, à mieux réagit aux essais imposé à la machine, en mode moteur et générateur, à vide et en charge.

La modélisation de la turbine, son bloc model, ont fait l'objet de la première partie de ce chapitre.

Chapitre III

Control vectoriel indirect des puissances de la MADA

III.1 Introduction

Avant d'entamer la commande vectorielle indirecte des puissances statorique de la MADA, qui sera évoquer dans la deuxième partie de ce chapitre, en va commencer, tout d'abord dans la première partie à mettre l'accent sur la modélisation de l'onduleur à deux niveaux de tension.

Ce dernier, représente la source alternative au circuit rotorique de la MADA.

III.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Le réglage de la vitesse du rotor d'une machine asynchrone se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et la tension statorique. Par conséquent, pour se donner les moyens de cette action, il faut disposer d'une source d'alimentation capable de délivrer une tension d'amplitude et fréquence réglable en valeur instantanée. L'onduleur est composé de trois bras chacun comportant deux interrupteurs bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles [25][26], misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant. La source de tension continue à l'entrée de l'onduleur peut être obtenue à la sortie d'un redresseur lié à un réseau alternatif, en passant par un filtre capacitif. La charge de l'onduleur est une machine asynchrone. Pour simplifier l'étude on va créer un point milieu 'O' (ou M) par deux condensateurs fictives chacune prend la moitié de la tension continue V_{dc} .

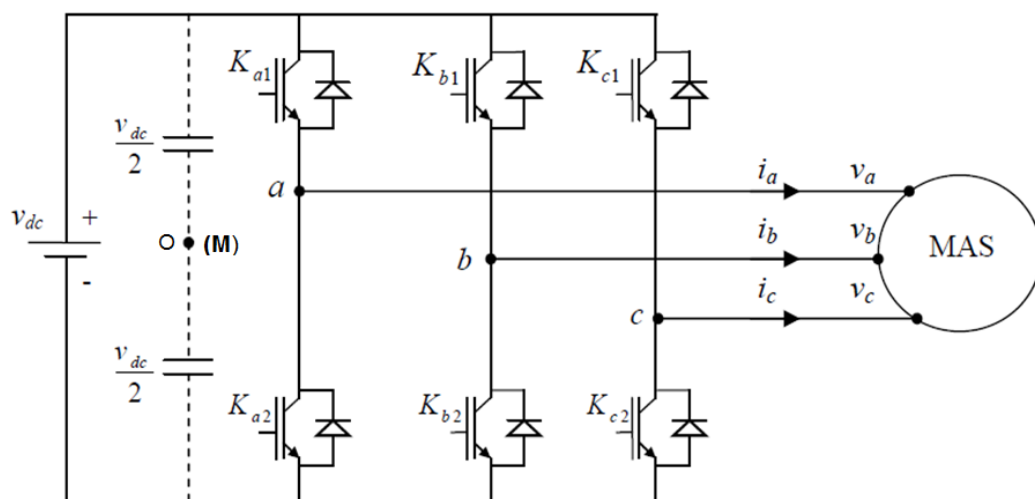


Fig. III. 1 Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé. Chaque interrupteur K_{xi} est associé à une fonction de connexion S_{xi} , tel que :

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \text{ est fermé} \\ S_{xi} = 0 \text{ est ouvert} \end{cases} \quad \text{III.1}$$

Avec $x=a,b,c$: indicateur de phase ; $i=1,2$: Numéro de l'interrupteur du bras x .

❖ Commande complémentaire des interrupteurs

Sachant que la fermeture ou l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par surintensité soit par surtension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs K_{x1} et K_{x2} [27],[28]. Ce qui conduit à la relation logique suivante :

$$S_{x1} = \bar{S}_{x1} = 1 - S_{x1} \quad \text{III.2}$$

❖ Tension de sortie

L'onduleur de tension a deux niveaux délivre deux niveaux de tensions $\frac{v_{dc}}{2}$ ou $-\frac{v_{dc}}{2}$ suivant la fonction de connexion S_{x1} comme illustre dans l'équation (II.9).

$$v_{x0} = \begin{cases} \frac{v_{dc}}{2} \text{ si } S_{x1} = 1 \text{ (} S_{x2} = 0 \text{)} \\ -\frac{v_{dc}}{2} \text{ si } S_{x1} = 0 \text{ (} S_{x2} = 1 \text{)} \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Avec : v_{x0} c'est la tension simple entre la phase x et le point milieu 0. L'équation (III.3) peut être écrite sous la forme suivante :

$$v_{x0} = \frac{v_{dc}}{2} (2S_{x1} - 1) \quad \text{III.4}$$

Les trois tensions phases-point milieu v_{a0} , v_{b0} et v_{c0} sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} S_{a1} - 1 \\ S_{b1} - 1 \\ S_{c1} - 1 \end{bmatrix} \quad \text{III.5}$$

Les tensions composées entre phases v_{ab} , v_{bc} et v_{ca} deviennent donc :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a0} - v_{b0} \\ v_{b0} - v_{c0} \\ v_{c0} - v_{a0} \end{bmatrix} = v_{dc} \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

Les grandeurs que l'on souhaite contrôler grâce à l'onduleur sont les tensions simples côté charge (v_a , v_b et v_c). Pour une charge triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad \text{III.7}$$

Les tensions phases-neutre sont données, en fonction des tensions composées et des tensions phases-point milieu, par:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} & -v_{ca} \\ v_{bc} & -v_{ab} \\ v_{ca} & -v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad \text{III.8}$$

Et en fonction des fonctions de connexions par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad \text{III.9}$$

Pour la génération des signaux logiques S_{a1} , S_{b1} , S_{c1} , il existe plusieurs techniques de commande telles que la stratégie MLI. [29]

III.3 Technique de commande MLI (SPWM)

Cette technique est très connue pour les onduleurs a deux niveaux. Son principe général est basé sur la comparaison d'une tension de référence à une porteuse triangulaire ou en dent de scie. Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres l'indice de modulation m et le coefficient de réglage r . pour cela on doit élaborer et concrétiser l'algorithme de commande de la technique MLI (fig. III.2) qui permet de générer les impulsions de control des interrupteurs en respectant toujours la complémentarité de fonctionnement de ces derniers pour chaque bras de l'onduleur.

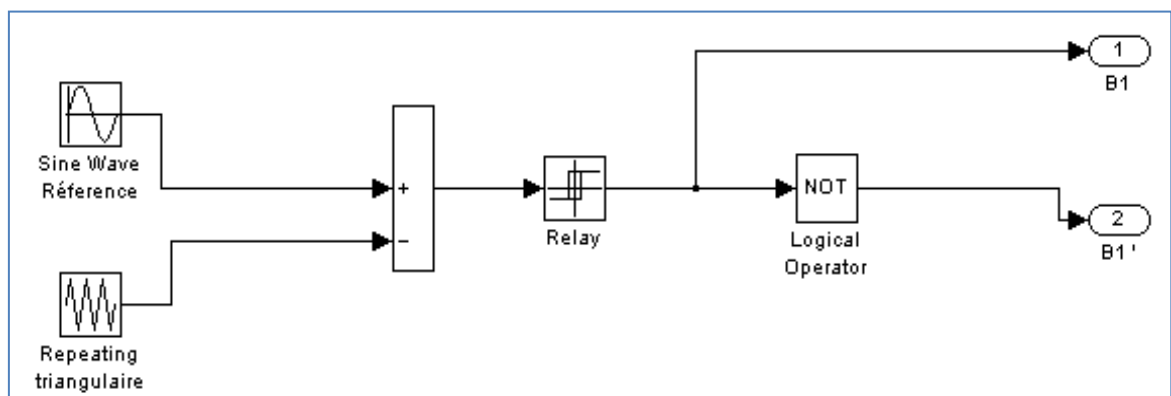


Fig. III. 2 Algorithme de commande de la technique MLI pour le premier bras de l'onduleur

III.3.1 Caractéristiques de la modulation MLI (SPWM)

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

❖ **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$r = \frac{V_m}{V_p} \quad \text{III.10}$$

❖ **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad \text{III.11}$$

III.3.2 Simulation d'un onduleur à deux niveaux à vide et en charge

Le montage ci-dessous (Fig. III.4) d'un onduleur triphasé à deux niveaux à base d'interrupteurs IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture

La simulation, consiste à visualiser l'obtention des grandeurs courants et tensions alternatives, délivrées par l'onduleur à deux niveaux aux bornes de la charge RL, à partir d'une source de tension constante E, lorsque celui-ci, est piloté par la stratégie de commande MLI (SPWM).

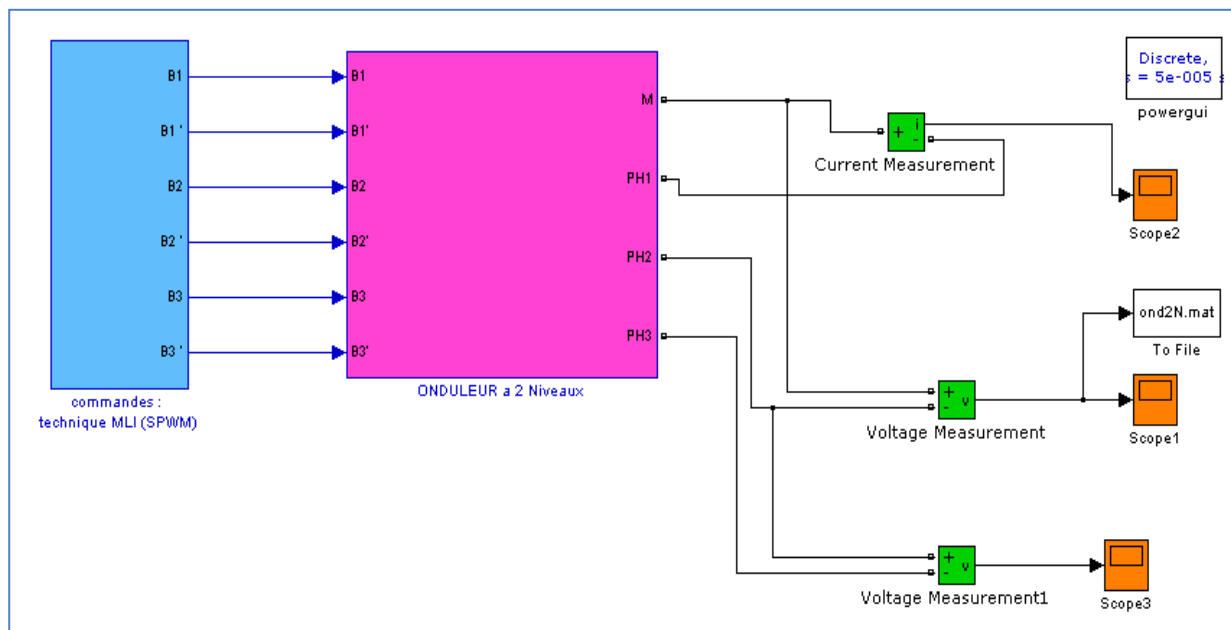


Fig. III. 3 Schéma global de l'onduleur triphasé à deux niveaux sur Simulink en mode Subsystem

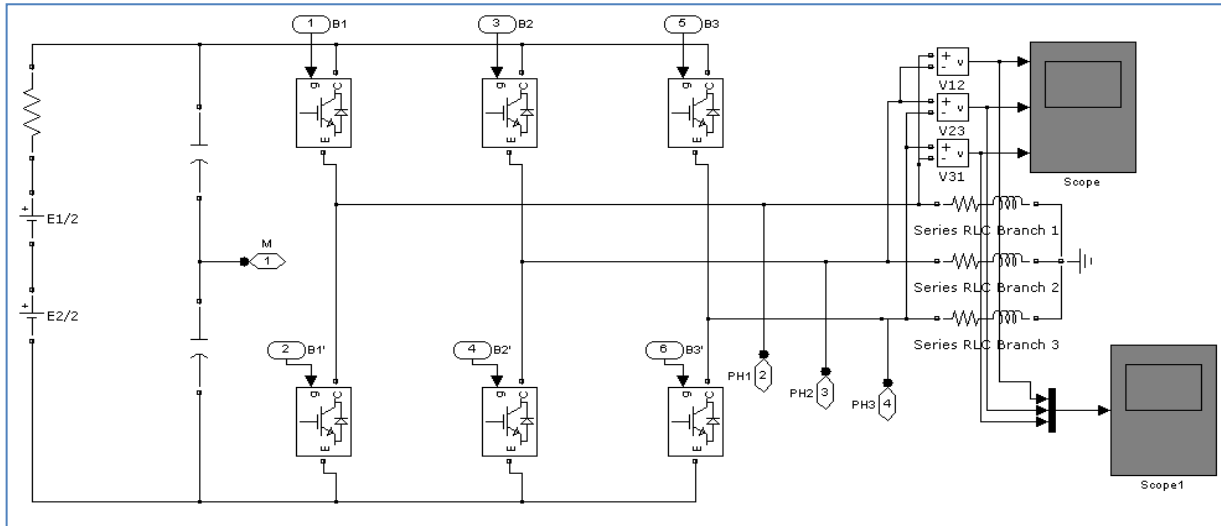


Fig. III. 4 Schéma de puissance de l'onduleur triphasé à deux niveaux sur Simulink

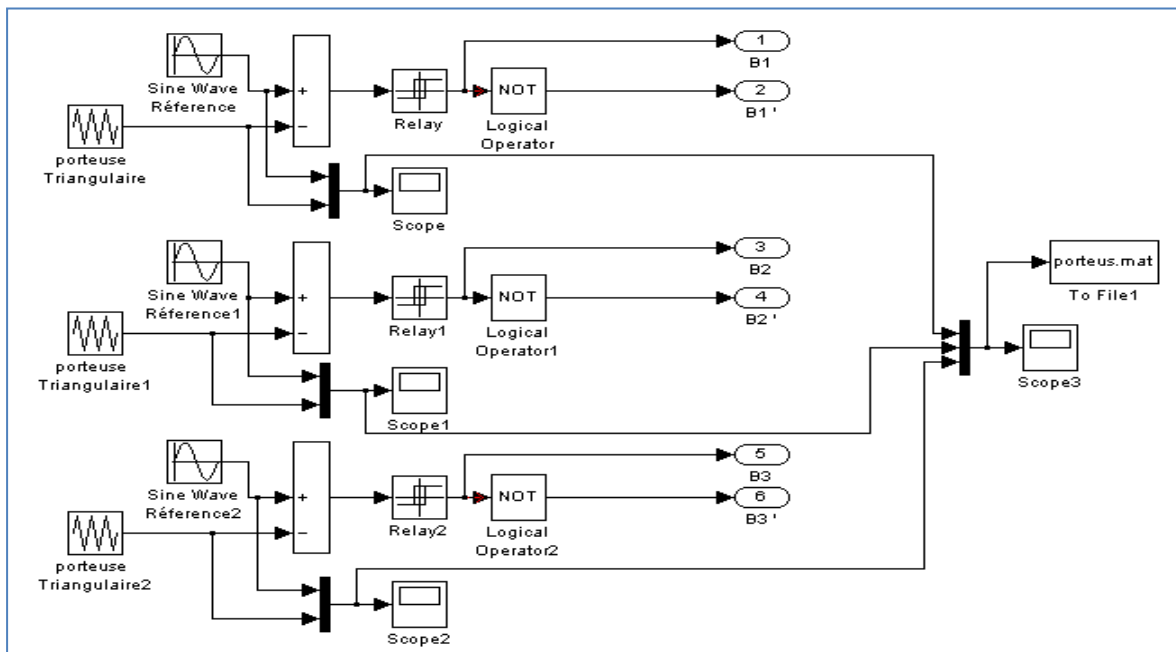


Fig. III. 5 Bloc de commande de la technique MLI (SPWM) à deux niveaux

❖ Paramètres de simulation

- Source de la tension continue $E= 600V$ ($E/2= E1/2=E2/2=300 V$)
- La charge : $R= 20\Omega$, $L= 20 mH$
- Fréquence de la modulante $f=50Hz$, la valeur crête de la modulante $V_m=400V$.
- Fréquences de la porteuse : $f_p=300Hz$, $m=6$.
- La valeur crête de la porteuse : $V_p=500V$.

Puisque la modulante (référence) représente l'image du signal souhaité à la sortie de l'onduleur, et pour avoir une source triphasée équilibré au niveau de la charge, les trois références $V_{réf1}$, $V_{réf2}$, $V_{réf3}$ doivent être comme suit :

$$\begin{cases} V_{réf1} = V_{max} \sin \omega t \\ V_{réf2} = V_{max} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{réf3} = V_{max} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad \text{III.12}$$

❖ Résultats de simulation

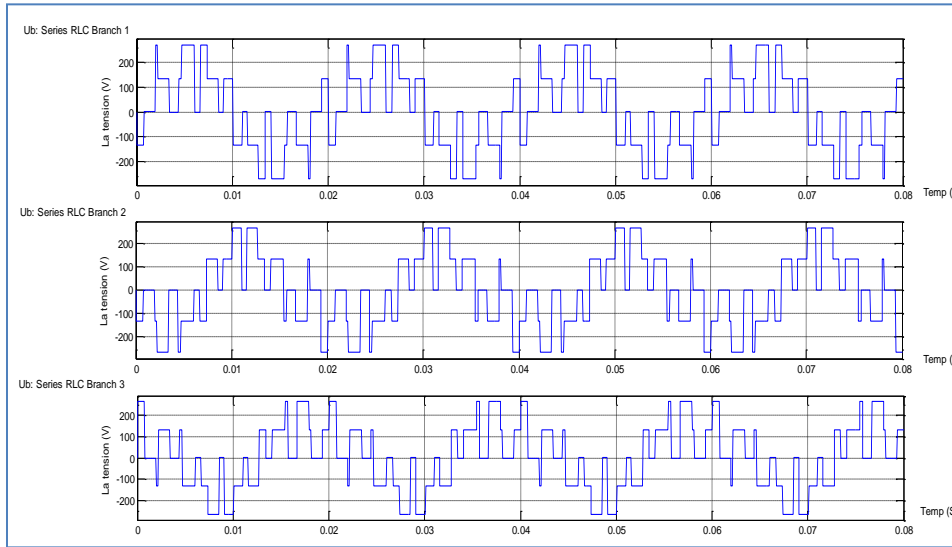


Fig. III. 6 Allures des trois tensions simples aux bornes de la charge RL

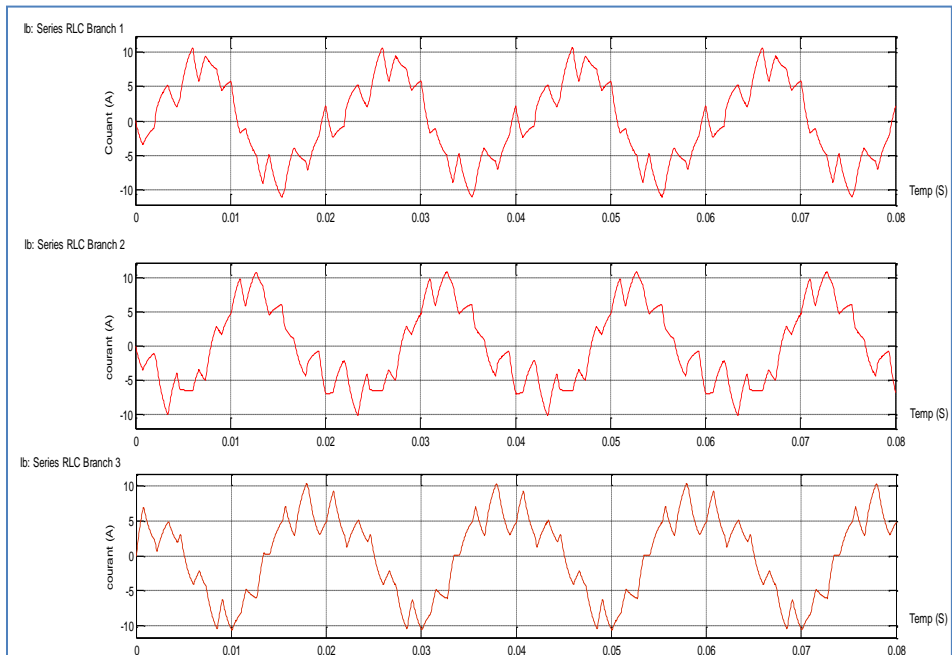


Fig. III. 7 Les trois courants à travers la charge triphasé RL

On constate, d'après les résultats obtenus, l'onduleur fournit correctement trois tensions et courants alternatif. Donc on peut le considérer comme une source de tension fiable, pour alimenter le circuit du rotor de la MADA.

III.4. Commande vectorielle indirect des puissances statorique de la MADA

III.4.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour faire l'orientation du flux statorique, on fait appel au modèle de la machine dans le repère de Park selon les équations (III.13) : [30]

- Equations des tensions:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad \text{III.13}$$

On oriente le flux statorique selon l'axe **d** pour que la composante suivant l'axe **q** soit constamment nulle $\Phi_{sd} = \Phi_s$ et $\Phi_{sq} = 0$, aussi $V_s = V_{sq}$ et $V_{sd} = 0$ III.14

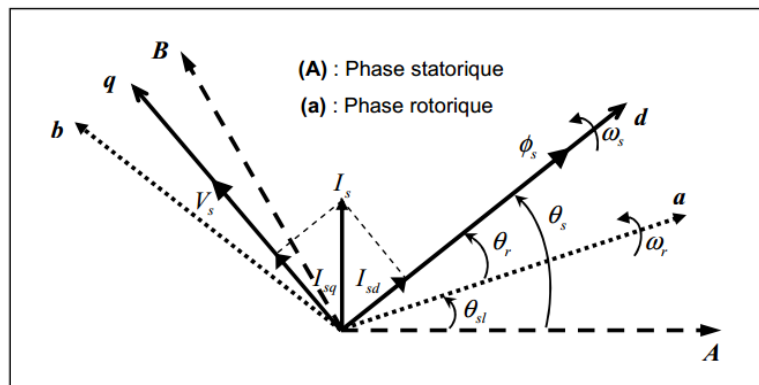


Fig. III. 8 Orientation du flux statorique sur l'axe d .

Et le modèle de la machine sera plus simple comme il est présenté ci dessous :

- Equations des flux :

$$\begin{cases} \Phi_{sdq} = L_s I_{sdq} + L_m I_{rdq} \\ \Phi_{rdq} = L_r I_{rdq} + L_m I_{sdq} \end{cases} \quad \text{III.15}$$

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned} C_{méc} &= -\frac{3}{2} \cdot P \cdot (\Phi_{sd} \cdot I_{sq} - \Phi_{sq} \cdot I_{sd}) = -\frac{3}{2} \cdot P \cdot (\Phi_{rq} \cdot I_{rd} - \Phi_{rd} \cdot I_{rq}) \\ &= C_r + J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \end{aligned} \quad \text{III.16}$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques on vérifie que :

$$C_{méc} = C_e = -\frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s} (\Phi_{rd} \cdot I_{sq} - \Phi_{rq} \cdot I_{sd}) = -\frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{sd} \cdot I_{rq} - \Phi_{sq} \cdot I_{rd}) \quad \text{III.17}$$

On appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine l'équation du couple devient:

$$C_e = -\frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s} (\Phi_{sd} \cdot I_{rq}) \quad \text{III.18}$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_{sd} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad \text{III.19}$$

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad \text{III.20}$$

A partir de l'équation (III.20), on peut alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques : [30]

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\Phi_s}{L_s} - L_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad \text{III.21}$$

III.4.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

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

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

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad \text{III.23}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.21) dans l'équation (III.23), on obtient les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{III.24}$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.19), l'expression de la puissance réactive devient:

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{rd} \quad \text{III.25}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante L_m comme 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 $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ près imposée par le réseau[31].

III.4.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, après développement, le résultat ainsi obtenu est représenté par le système (III.26) à deux équations suivant:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \omega_s \frac{L_m V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{III.26}$$

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en

$\left\{ L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right\}$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser [32].

En revanche le terme $g \frac{L_m V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage.

Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [32].

Les équations (III.24), (III.25) et (III.26) permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (Fig.III.9).

Les termes de couplage sont désignés par V_2 , V_3 et les f.e.m's par V_1 et V_4 .

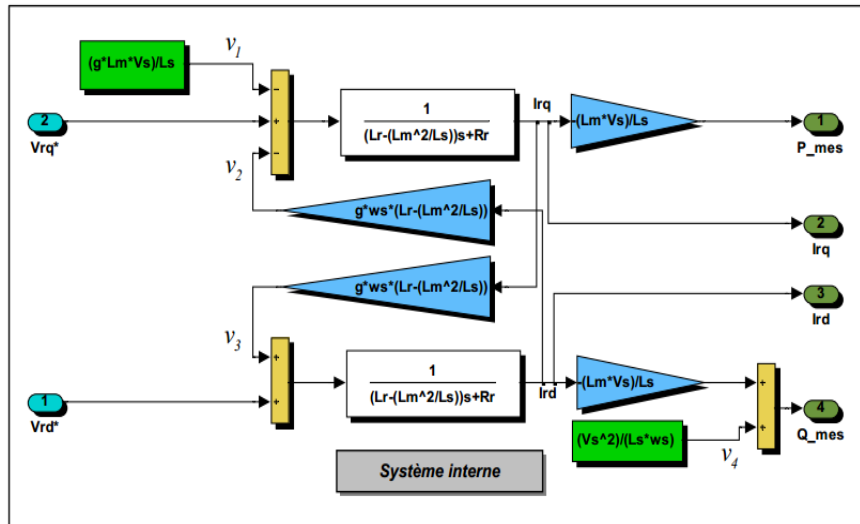


Fig. III. 9 Schéma bloc du système à réguler de la MADA

Dans ce schéma, on a fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Etant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur.

NOTA: les régulateurs utilisés dans notre cas sont des régulateurs PI classiques, leurs paramètres sont mentionnés dans l'annexe A.

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe " q " rotorique et la puissance réactive pour l'axe " d " rotorique.

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau.

La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal. Ainsi, il est apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [33]:

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives.

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

- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants

rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte** découle directement des équations (III.24 et III.25).

L'intérêt que présente la méthode directe, est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques, ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique[33].

Dans la suite de ce travail, on va étudier et simuler la méthode indirecte dans une chaîne de conversion éolienne, au dernier chapitre.

III.5 Commande vectorielle indirecte (CVID)

Le principe de cette commande se résume à travers le schéma bloc de la figure (III.10).

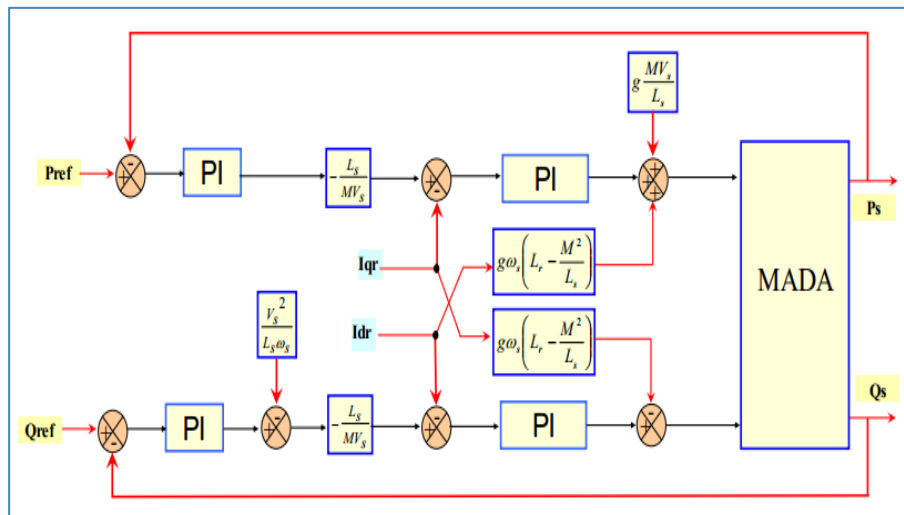


Fig. III. 10 Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée

III.6 Conclusion

On a traité dans ce chapitre en premier temps, la modélisation et simulation d'un onduleur triphasé à deux niveaux, les résultats obtenus par l'onduleur sont très satisfaisantes pour une éventuelle utilisation dans la chaîne de conversion éolienne.

En deuxième temps, la commande vectorielle directe et indirecte des puissances statorique de la MADA, à fait l'objet d'une analyse théorique, on optant à la fin pour une commande indirecte, comme un outil de control de la conversion éolien.

Chapitre IV

***Conversion d'énergie éolienne à
base de la MADA contrôlée en
CVID***

IV.1 Introduction

Ce chapitre est consacré essentiellement à la mise en œuvre d'un système de conversion d'énergie éolien. Ce système comprend d'une part, la turbine productrice de l'énergie cinétique et d'autre part, la machine asynchrone à double alimentation(MADA) fonctionnant en tant que génératrice de l'énergie vers le réseau électrique.

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux, piloté par la technique MLI, celui-ci procure son alimentation d'un bus de tension continue stable. Tandis que le stator de la MADA est connecté au réseau, considéré comme une source de tension triphasé parfait.

Lors de son fonctionnement générateur, la MADA subit un test de fonctionnement en mode moteur. Les résultats obtenus sont visualisés et discutés.

IV.2 Simulation de la commande vectorielle indirecte de la MADA en puissance entraînée par une éolienne en vue d'une production de l'énergie électrique

IV.2.1 Paramètres de la chaîne de conversion

Paramètres de la turbine, de la MADA, des régulateurs PI utilisés dans la régulation des puissances active et réactive, feront l'objet de l'annexe A et l'annexe B.

IV.2.2 schéma global du système de conversion éolien à base de la commande CVID

Le schéma global de la chaîne de conversion éolien, sous Simulink est représenté sur la figure (IV.1). Les résultats de simulation présentent les différentes grandeurs obtenus par la commande vectorielle indirecte des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA vers le réseau électrique, lorsque celle-ci est entraînée par une turbine éolienne, sous une vitesse du vent de 10 m/s.

IV.2.3 Simulations et interprétations

Les figures (IV.2 –IV.5), présente le profile du vent, d'une valeur moyenne de (10m/s) qui sera appliqué sur la surface des pales de la turbine éolienne, associé aux différents paramètres de la turbine (coefficient de puissance C_p , l'angle de calage des pales β et le rapport relative de la vitesse λ). Le coefficient C_p , se stabilise à la valeur de 0.56 en régime permanent. Idem pour le rapport de vitesse λ qui prend en régime statique la valeur de 6.8. L'angle de calage β est imposé nul, afin d'extraire le maximum de puissance du vent.

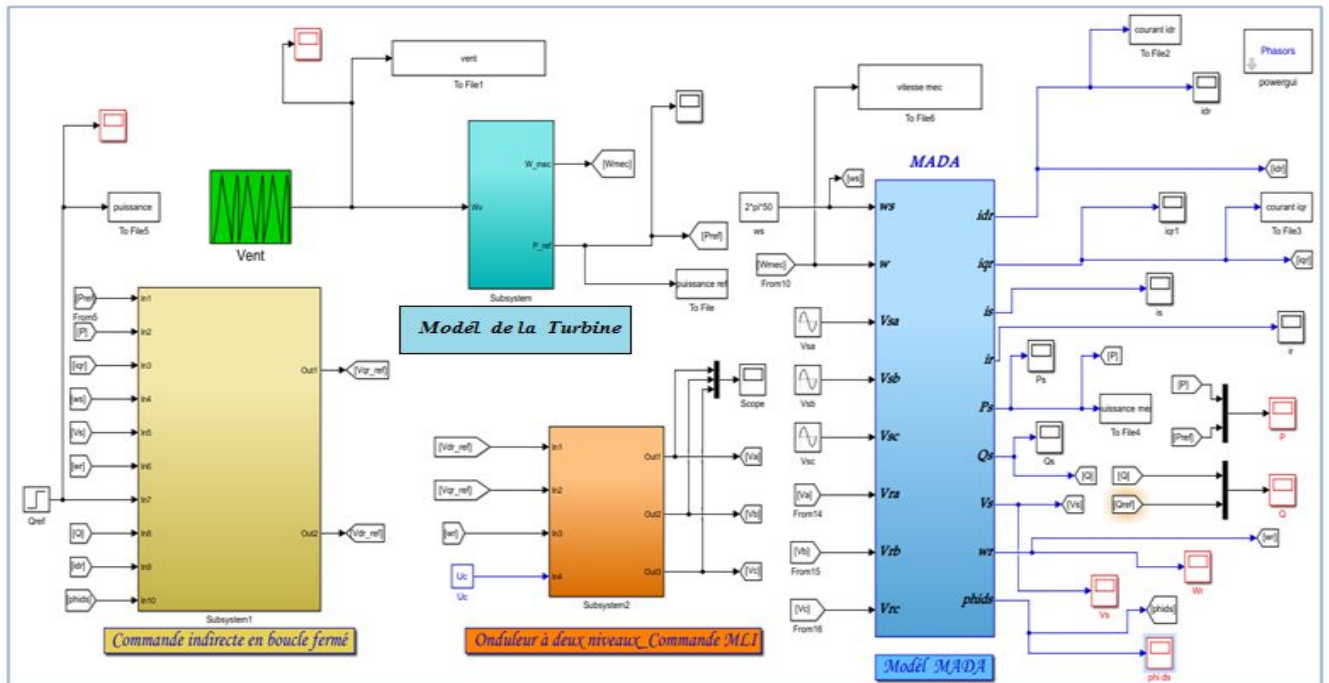


Fig. IV. 1 Schéma global du système de conversion éolien à base de la commande CVID

❖ Coté turbine :

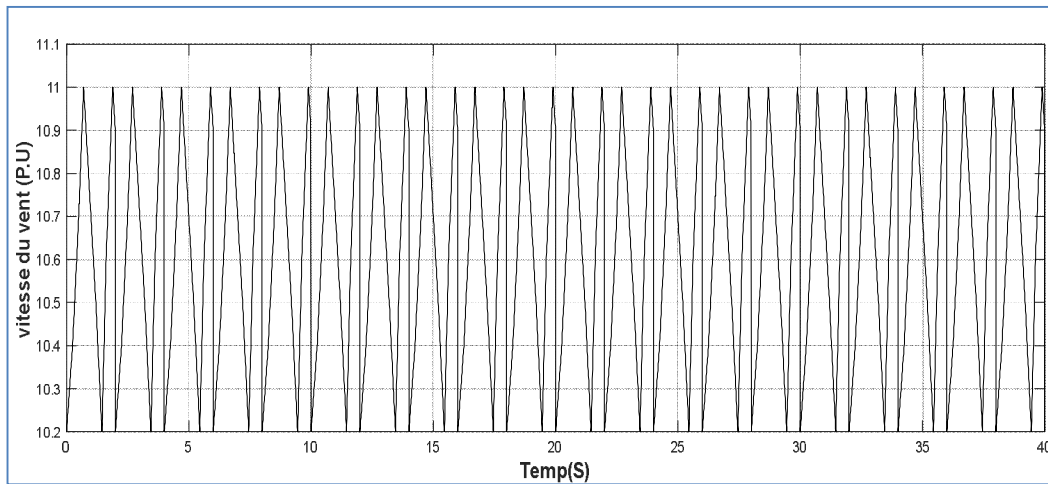


Fig. IV. 2 Allure du vent en fonction du temps (m/s)

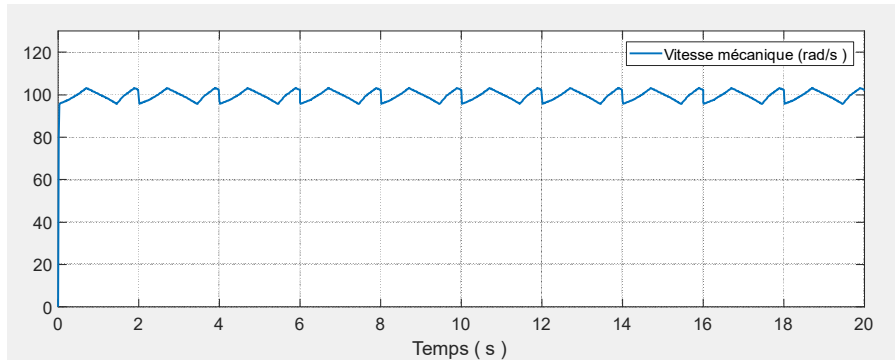


Fig. IV. 3 Vitesse mécanique de la turbine

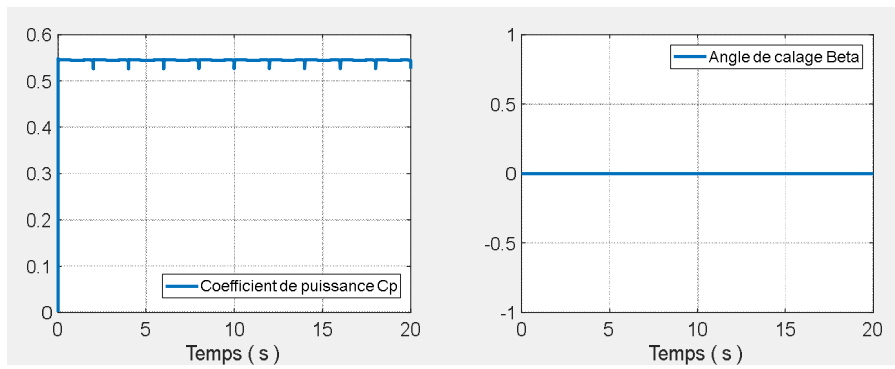


Fig. IV. 4 Coefficient de puissance C_p et angle de calage β

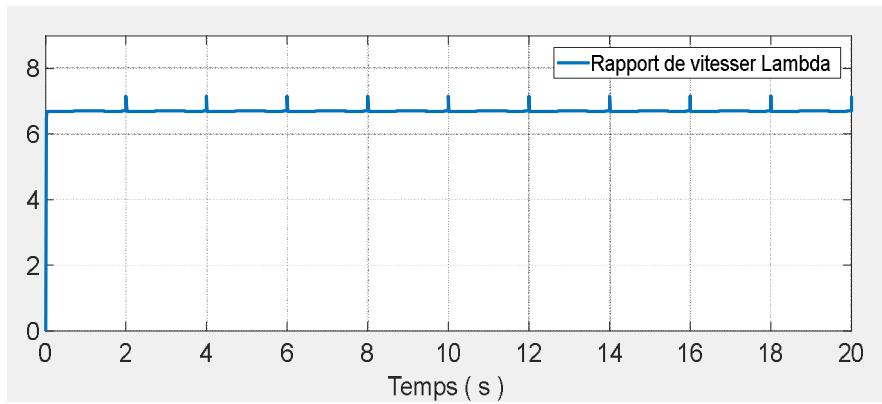


Fig. IV. 5 Rapport de vitesse λ

Les résultats obtenus figures (IV.6 - IV.8) montrent que la variation de la puissance active est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance active produite dans le stator.

❖ **Coté MADA mode génératrice :**

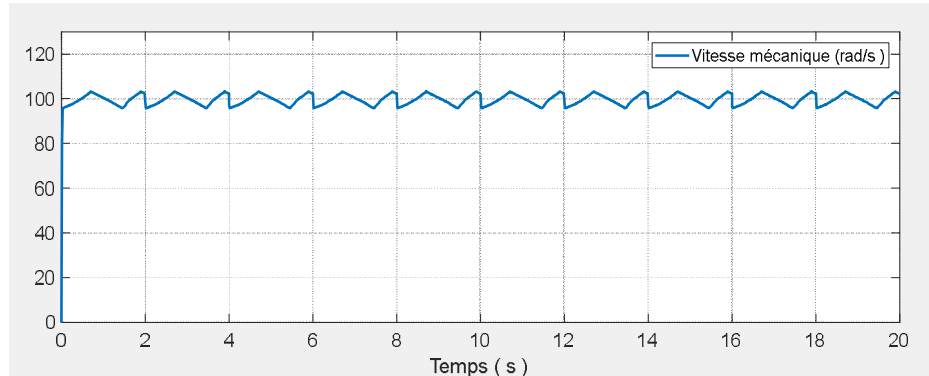


Fig. IV. 6 Vitesse mécanique de la MADA

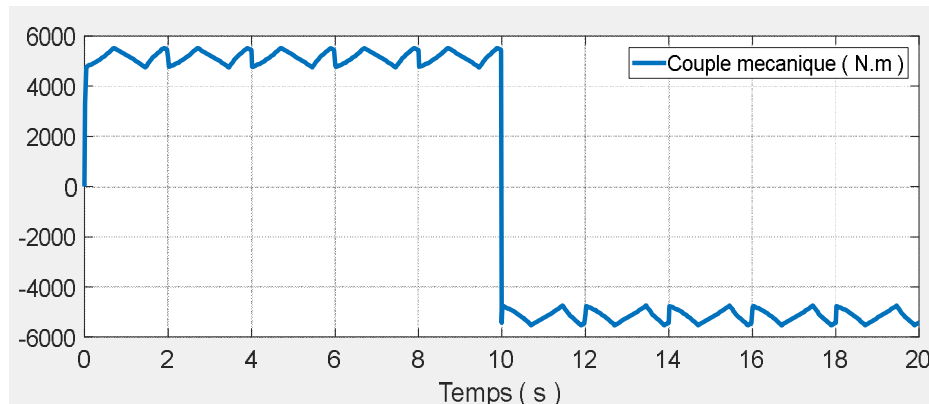


Fig. IV. 7 Couple mécanique de la turbine mode génératrice (0-10sec)

On constate aussi une bonne poursuite de consigne pour la puissance active ainsi que la puissance réactive statorique (fig.IV.8 et fig.IV.9), maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator, de manière à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau électrique.

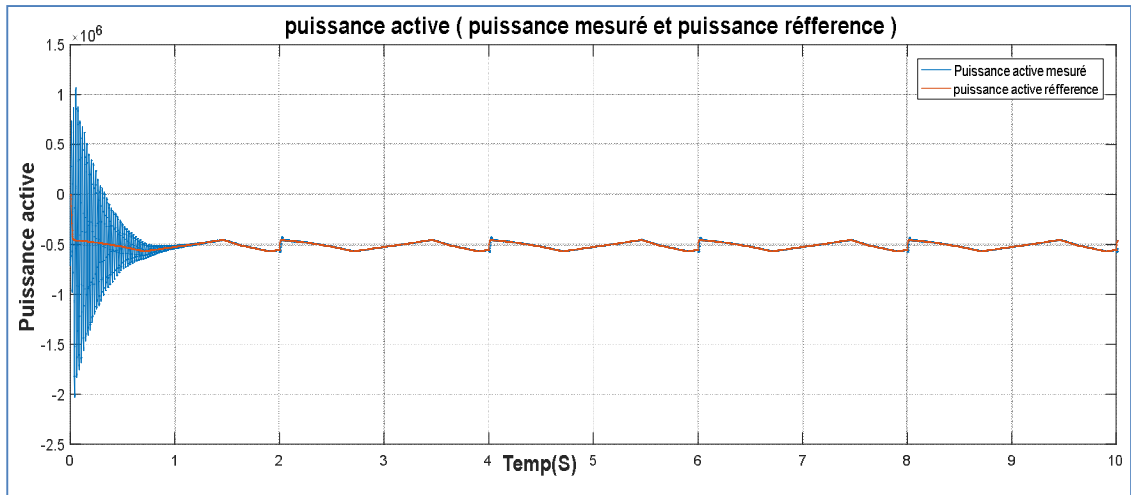


Fig. IV. 8 Puissance active mesuré et de référence au stator

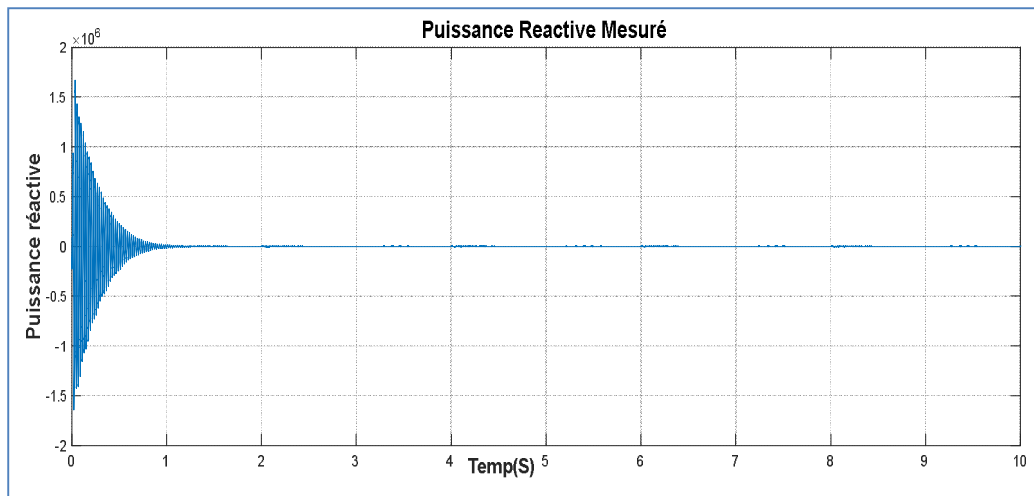


Fig. IV. 9 Puissance réactive au stator

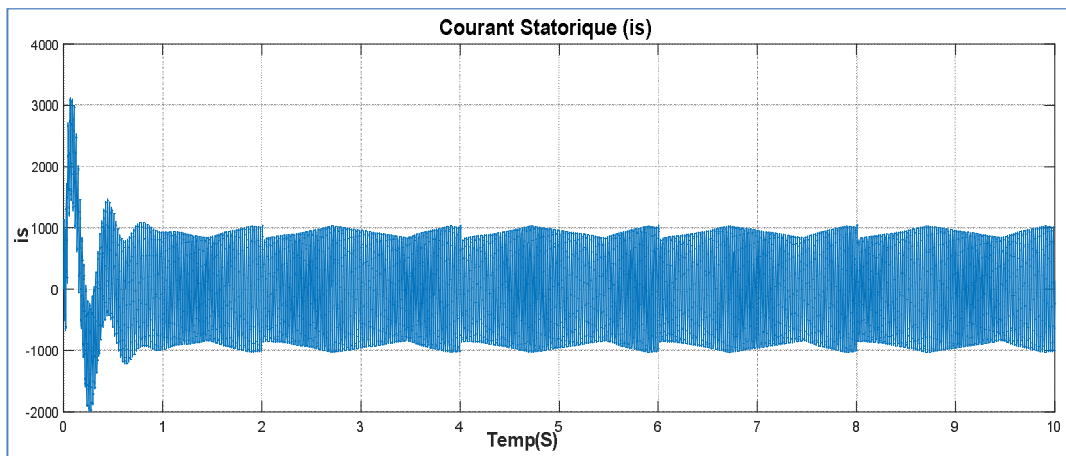


Fig. IV. 10 Courants statorique (A)

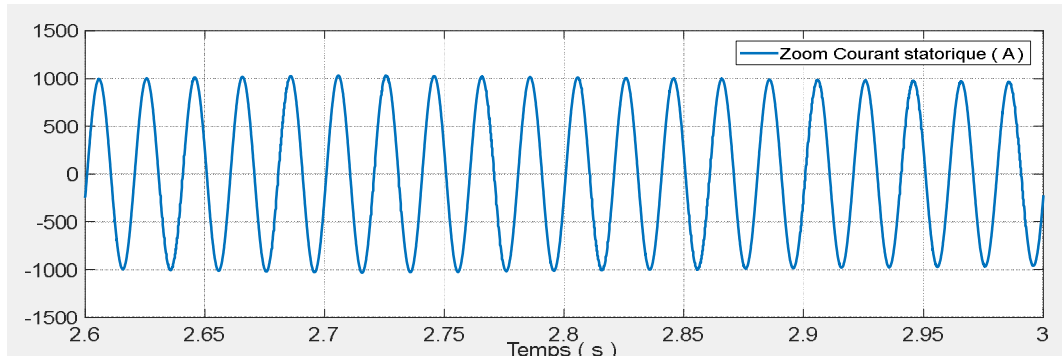


Fig. IV. 11 Courants statorique de la première phase(Zoom)

La figure (IV.11) montre, le courant statorique de la première phase, où on constate la bonne allure alternative sinusoïdale du courant, générée par la MADA. La figure (IV.12), montre la tension rotorique produite par l'onduleur à deux niveaux alimenté par un bus de tension continu de $V_{dc}=1600$ V, dont $f_p=5$ kHz et $r=0.8$, $\omega_r=10.47$ rad/s, donc une fréquence rotorique de 1.67 Hz.

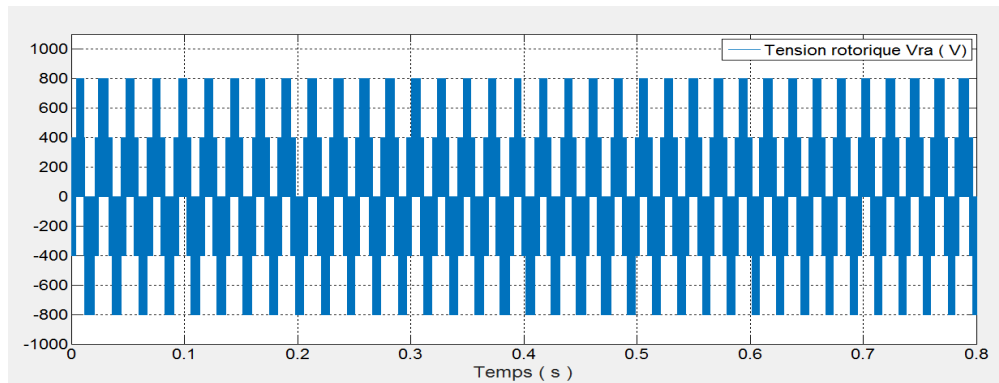


Fig. IV. 12 Tension simple rotorique de la première phase Vra

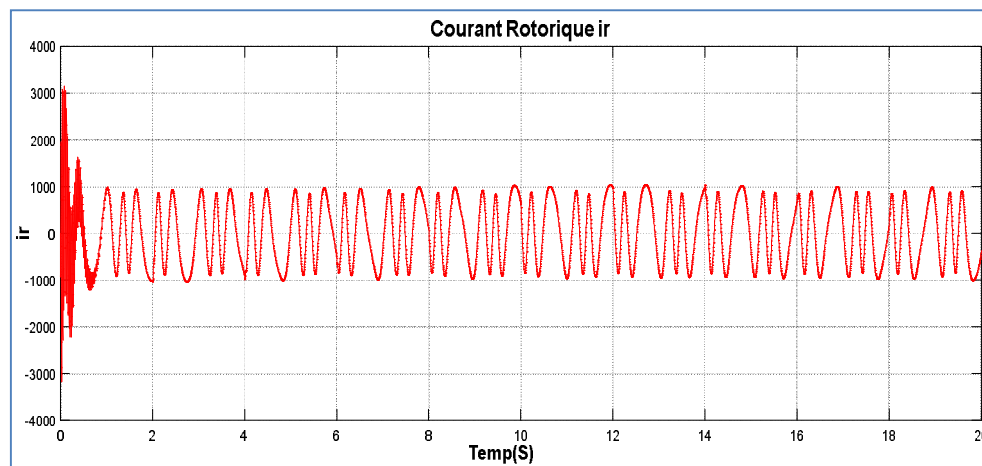


Fig. IV. 13 Courants rotorique de la première phase

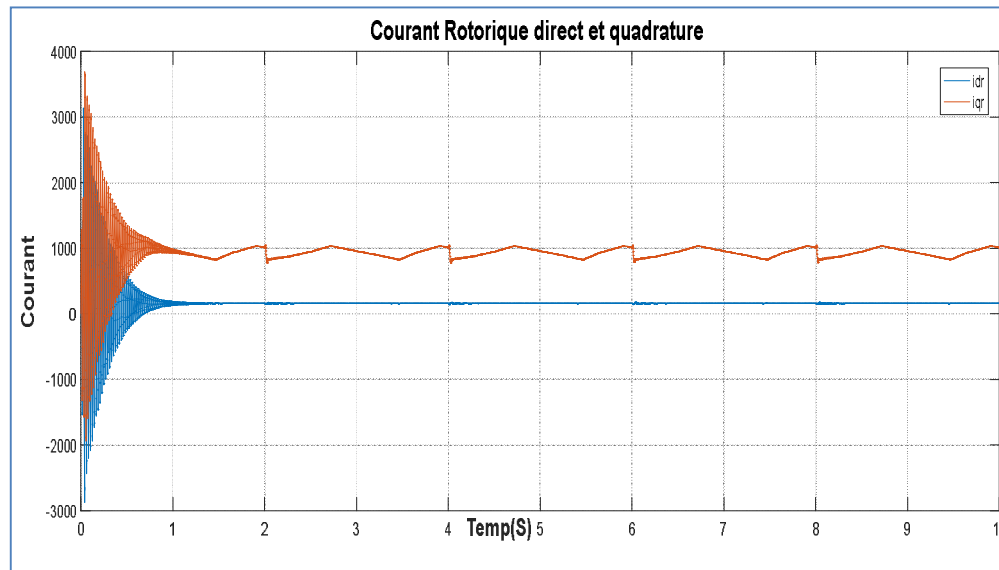


Fig. IV. 14 Courants rotorique dans le repère (d-q)

On remarque, que le courant rotorique direct et quadrature (I_{dr} et I_{qr}), suit correctement la loi de la commande des puissances active et réactive de la MADA. Puisque on observe clairement, que le courant I_{dr} dépend de la puissance réactive en prenant la même allure de $Q_{réf}$, tandis que le courant I_{qr} , dépend de la puissance active en prenant l'allure de $P_{réf}$ (voir fig. IV.14).

❖ La MADA fonctionne en mode moteur (perturbation):

On impose à la turbine un couple négative (fig. IV.15, à l'instant 10 secondes), cela signifie que la turbine sera entraînée par la MADA. C'est-à-dire, cette dernière passe du mode générateur (puissance négatif) au mode moteur (puissance positif).

La valeur positive signifiée que le stator consomme de la puissance active (fig. IV.16). La puissance réactive demeure toujours nulle, ce qui justifier la fiabilité de la loi de commande utilisé.

On constate pendant ce passage, que le courant I_{dr} prend l'allure de la puissance réactive, tandis que le courant I_{qr} prend l'allure de la puissance active (fig. IV.17). Cela confirme une autre fois, la faisabilité de la commande indirecte des puissances de la MADA.

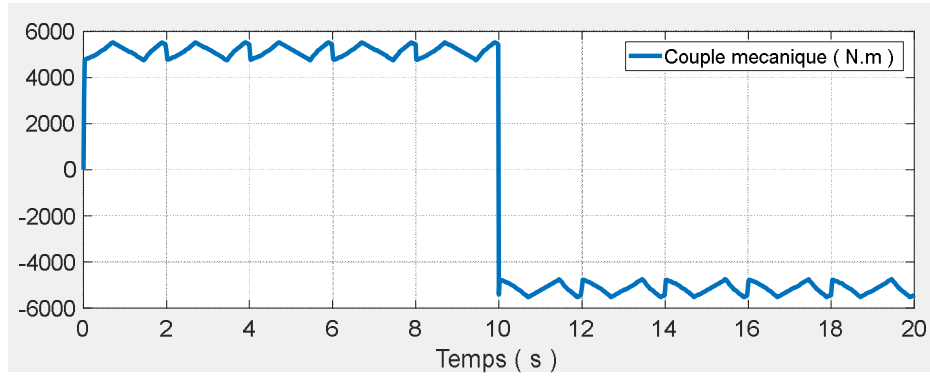


Fig. IV. 15 Couple mécanique de la MADA en mode générateur-moteur

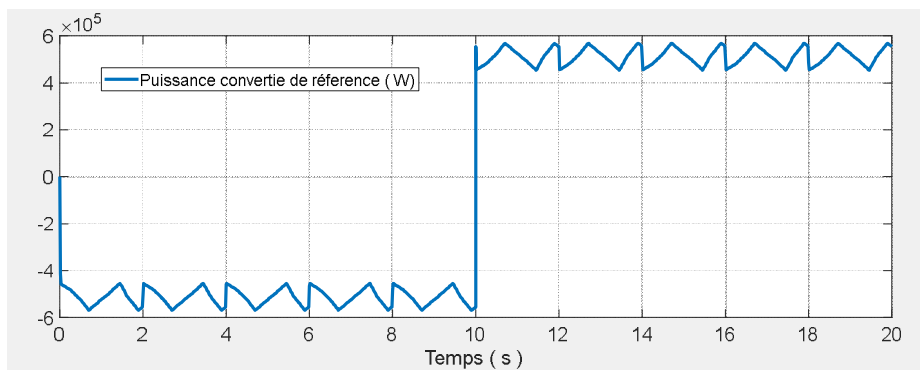


Fig. IV. 16 Puissance active de la MADA en mode générateur-moteur

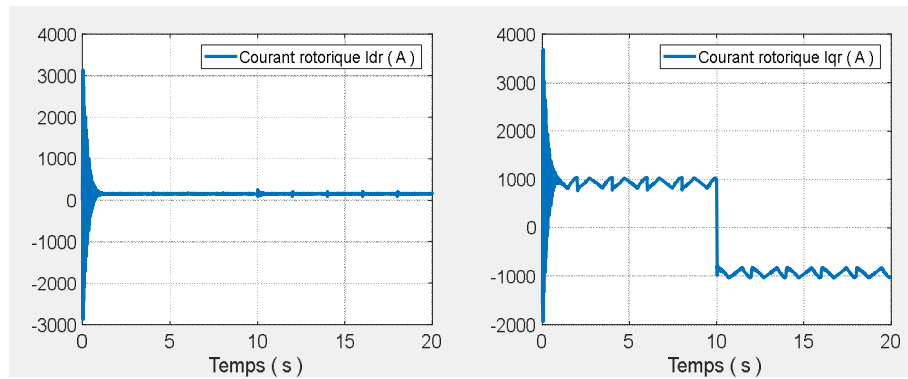


Fig. IV. 17 Courants rotorique dans le repère (d-q)

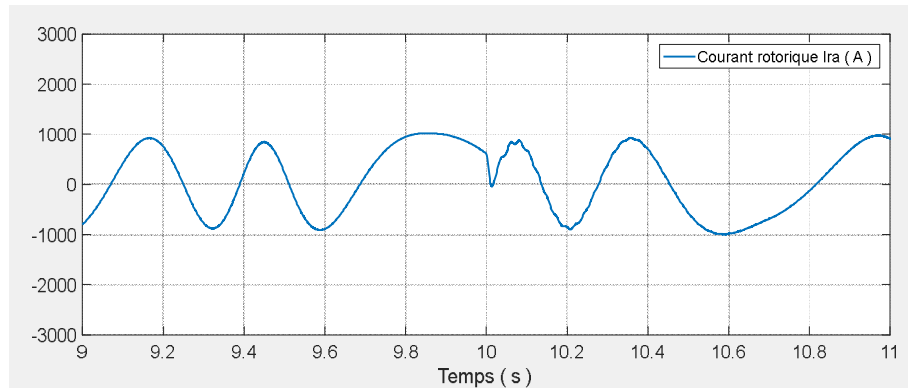


Fig. IV. 18 Courant du rotor de la première phase(Zoom)

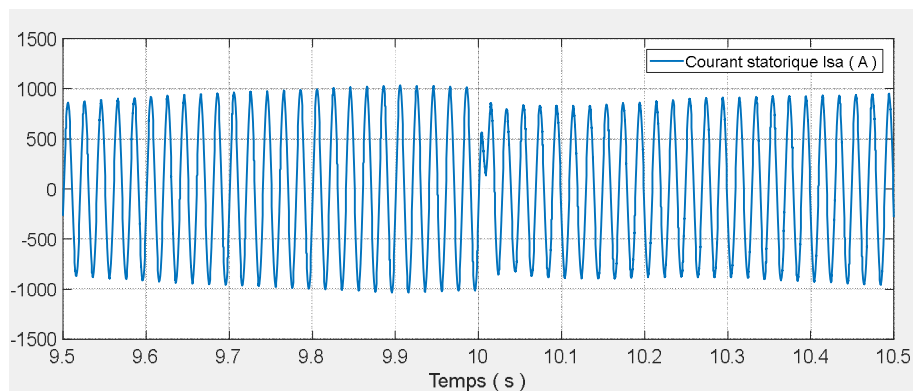


Fig. IV. 19 Courant du stator de la première phase(Zoom)

A l'instant $t=10$ secondes, on constate que les courants statoriques et rotoriques réagissent, où on constate l'inversion du sens du courant, du mode générateur au mode moteur (fig.IV.18 et fig. IV.19).

IV. 3 Conclusion

On a procédé à la mise en marche de la chaîne de conversion éolienne. La turbine et la MADA, ont bien réagi à leurs principes de fonctionnement. Les résultats de simulation montrent que la commande vectorielle indirecte élaborée pour la commande des puissances, réalise un bon découplage de réglage des puissances statoriques à partir du rotor et une bonne poursuite des valeurs de références imposées. Le convertisseur statique utilisé dans le circuit du rotor de la MADA (onduleur à deux), commandé par la technique MLI a donné satisfaction pour sa contribution au bon fonctionnement de la MADA en tant que générateur ou moteur.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. L'objectif de notre travail était de faire une modélisation des différents composants du système éolien, pour ensuite utiliser ces modèles pour élaborer un système de commande qui devait atteindre les objectifs suivants :

- Assurer un fonctionnement optimal de la chaîne éolienne.
- commander le système de conversion éolienne par la méthode de contrôle vectorielle indirecte (IFOC).

Afin d'atteindre ces objectifs et vu la complexité du système, on a étudié chaque partie du système dans un chapitre séparé.

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Il a permis de comprendre le principe de la conversion aérodynamique de l'énergie éolienne ainsi que les différentes possibilités de réglage et de limitation de la puissance. La comparaison des différentes structures possibles, a permis de choisir la structure retenue pour notre étude à savoir la structure à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié la partie mécanique du système de conversion. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle simplifié de la turbine a été élaboré. On a modélisé et simulé la MADA à vide et en charge, sans turbine et en boucle ouverte. Les résultats de simulation de ce modèle sous Matlab/Simulink confirment la validité du modèle linéaire pour l'application envisagée de la machine à la conversion de l'énergie éolienne.

Pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADA. Pour cela, le troisième chapitre était réservé à l'étude de la technique de contrôle, dite commande indirecte des puissances statoriques de la MADA. Ensuite la modélisation et la simulation de l'onduleur triphasé à deux niveaux, ont fait l'objet de la première partie de ce chapitre.

Pour atteindre nos objectifs ci-dessus, on a étudié le système complet de conversion éolienne, Pour cela, le quatrième chapitre était réservé au développement d'un modèle global du système pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle indirecte (IFOC) de la MADA, en passant à la simulation du modèle qu'on a développé sur

Matlab/Simulink. Malgré les bons résultats obtenus, sa n'empêche pas de donner quelques remarques.

Cette méthode par rapport aux autres, est la plus utilisée.

Pour améliorer le rendement de la chaîne turbine-MADA-réseau. On peut envisager les points suivants :

- Le développement d'autres algorithmes permettant la maximisation de la puissance captée sans recours au coefficient de puissance, qui s'avère très difficile à obtenir, tel que la logique flux, les réseaux de neurones.
- L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.

**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- [1] **S.EL-Aimani**. Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [2] **H.Ben Ahmed O.Gergaud, B.Multon**. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne, Electrotechnique du Futur 2001, pp.17-22. Nancy, november, 2001.
- [3] **Etxaide M, Kortabarria B., Dosierra** : Energia Eolikoa, Elhuyar, 1998, Vol. 133-134.
- [4] **Bourillon C.** ,Wind Energy – Clean Power for Generations. Renewable Energy 1999, Vol. 16, pp. 948-953 .
- [5] **Avia F, Cruz I.**, The Development of the Wind Energy market in Spain, European Wind Energy Conference Proceedings, Nice, 1999, pp. 477-480.
- [6] **EWEA Publications**, Wind Energy and the Environment, in the web site: <http://www.ewea.org/src/environment.htm>
- [7] **J. Martin**, « Energies éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, Article B1360 .
- [8] **J.Lesenne,F.Notelet,G.Séguier**, «Introduction a l'électrotechnique approfondie» , Technique et documentation, Paris, 1981, ISBN 2-85206-089-2
- [9] **E. Hau**, Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Applicaton, Economics, 2nd ed. Springer, 2005.
- [10] Programme des Energies Renouvelables, CREG, Adrar, mars 2015 .
- [11] **A. Samil**, Buletin des Energies Renouvelables, N°4, Décembre 2003 .
- [12] **R. Hamouche**, Atlas Vent de l'Algérie, Ofce Natonal de la Mé- téorologie, Alger, 1990 .
- [13] Potentel éolien en Algérie, CREG, Adrar, mars 2015.
- [14] **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 Henri Poincaré, Nancy 1, France, Avril 2010.

- [15] **A. Djoudi**, Commandes non linéaires d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée par un convertisseur matriciel, thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 2010.
- [16] **B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed** Aérogénérateurs électriques, Techniques de l'Ingénieur, Traités Energétique, pp. D 3 960 2 - D 3 960 16.
- [17] **C. Haritza**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Doctorat, E.N.S.A.M Paris, décembre 2003.
- [18] **Radia, Redjem**. "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne." (2009).
- [19] **Ouchbel, T.**, et al. "Régulation de la puissance d'une éolienne asynchrone à vitesse variable à l'aide d'un compensateur statique d'énergie réactive (SVC)." Revue des Energies Renouvelables 15.3 (2012): 439-450.
- [20] **I.HAMZAOUI**, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», thèse de magistère, ENP, 2008.
- [21] **M.Pinard**. Commande Electronique des Moteurs Electriques. DUNOD, Série EEA, 2004.
- [22] **O. Chee-Mun**. « Dynamic simulation of electric machinery using matlab/Simulink ». Printice hall, 1998 .
- [23] **A. NESBA**. « Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat d'état, ENP, 2007.
- [24] **S.EL-Aimani**. Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [25] **Hind Djeghloud**, « Filtrage Actif de Puissance », Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine , Décembre2007.
- [26] **A. M. Trzynadlowski**, « Introduction to Modern Power Electronics », Ed. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [27] **O.Bouakaz**, « Contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux, fonctionnement symétrique et asymétrique », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.

- [28] **Ouahiba Fadli**, « Modélisation et Commande non Linéaire de l'Association Machine Synchrones à Aimants Permanents-Onduleur de Tension à Trois Niveaux », Mémoire de Magister, Université de Batna, Juin 2006.
- [29] **BOUMEDDIENE, Iliès Rabah**. Commande d'un onduleur triphasé «Etude Expérimentale. Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2014.
- [30] **El Arabi, Rahma, Latifa Dahdi, and Ibrahim Yaichi**. Commande par mode glissant de MADA utilisé pour la production de l'énergie électrique. Diss. 2018, جامعة أحمد دراية-ادرار.
- [31] **Boualouch, Abdellah**, et al. "Control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion systems by RST controller." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 4.8 (2014): 93-99.
- [32] **F.poitier**, "Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [33] **A. BOYETTE**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »; Thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.

ANNEXES

ANNEXE A

Calcul des paramètres du régulateur PI

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La figure (1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la MADA en boucle fermée par un régulateur PI.

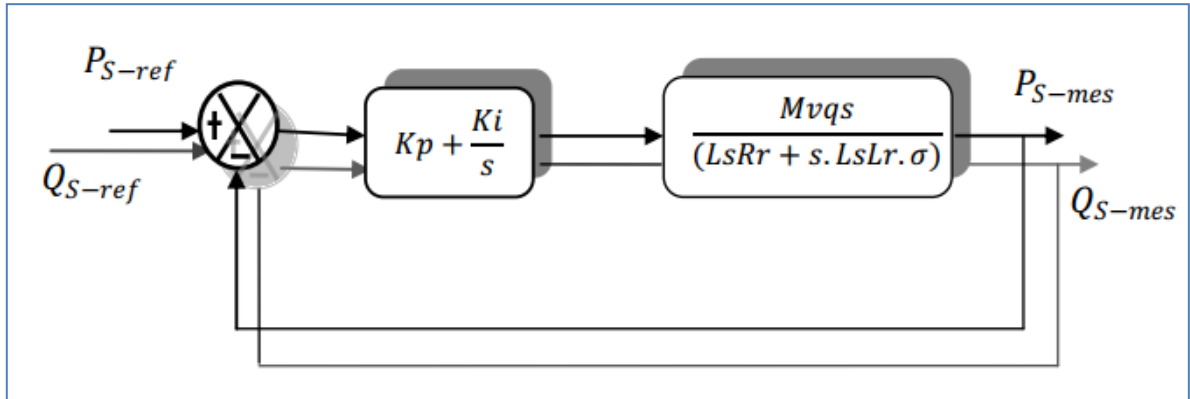


Fig 1 Schéma block du système de régulation des puissances statoriques

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

La fonction de transfert en boucle ouverte (F_{BO}) du système de régulation de la figure (IV. 7) s'écrit comme suit :

$$F_{BO} = \frac{s + \frac{K_i}{K_P}}{\frac{s}{K_P}} \cdot \frac{\frac{Mv_{qs}}{L_s L_r \sigma}}{\frac{R_r}{L_r \sigma} + s}$$

La méthode de compensation des pôles consiste à éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_P} = \frac{R_r}{L_r \sigma}$$

Après la compensation, on obtient la fonction

$$F_{BO} = \frac{K_P M v_{qs}}{L_s L_r \sigma \cdot s}$$

Ce qui nous donne la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$F_{BF} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$$

Avec :

$$\tau = \frac{L_s L_r \sigma}{K_P M v_{qs}}$$

τ est le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 10 ms :

$$K_P = \frac{L_s L_r \sigma}{\tau M v_{qs}}$$

$$K_i = \frac{R_r L_s}{\tau M v_{qs}}$$

On applique la même méthode sur :

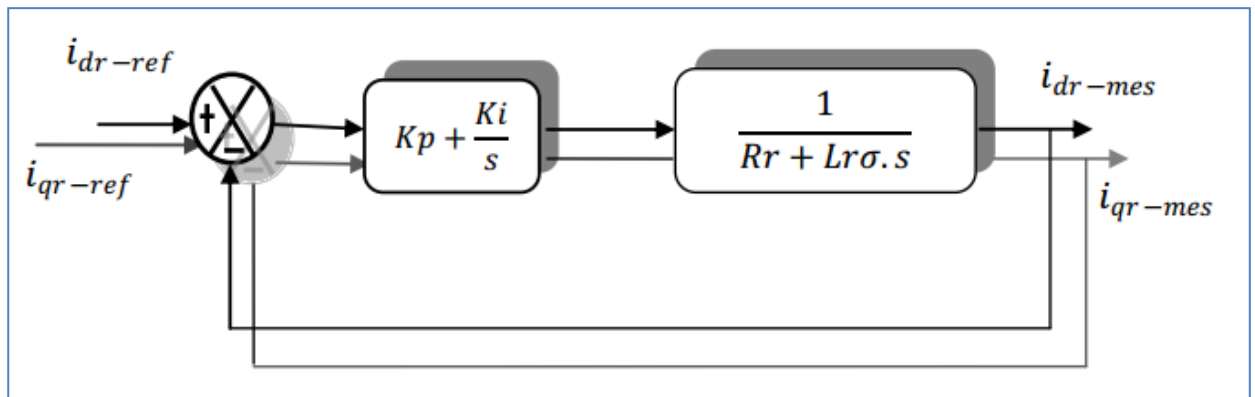


Fig 2 Schéma block du système de régulation des courants rotorique

ANNEXE B

Script de MATLAB de la simulation (paramètres de la chaîne de conversion)

```
1 - clear all; clc ;
2 - Vs=230*sqrt(2);
3 - p=2;
4 - Rs=0.0063;
5 - Ls=0.0118;
6 - Rr=0.0048;
7 - Lr=0.0116;
8 - M=0.0115;
9 - J=50;
10 - F=7.1e-3;
11 - H=[Ls 0 M 0;0 Ls 0 M;M 0 Lr 0;0 M 0 Lr];
12 - LN=inv(H);
13 - G1=[Rs 0 0 0;0 Rs 0 0;0 0 Rr 0;0 0 0 Rr];
14 - G2=[0 -Ls 0 -M;Ls 0 M 0;0 0 0 0;0 0 0 0];
15 - G3=[0 0 0 0;0 0 0 0;0 -M 0 -Lr;M 0 Lr 0];
16 - L=[2/3 -1/3 -1/3;-1/3 2/3 -1/3;-1/3 -1/3 2/3];
17 - Tr=0.001;
18 - Kp=(1/2)*((Lr-(M*M)/Ls))/(Tr);
19 - Ki=4.5*(Rr)/(Tr);
20 - Kpp=0;
21 - Kip=-15*(Ls*Rr)/(M*Vs*Tr);
22 - fp=5000;
23 - Uc=1200;
24 - wr=10.47;
25 - G=28;
26 - R=20;
```