

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

THÈME

Apport du Stockage Inertiel dans la Production Eolienne

Préparé par : BENABDALLAH Naima

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Y. Mihoub	MCB	Président
T. Allaoui	Pr	Examineur 1
B. Belabbas	MCB	Examineur 2
S. Belfedhal	MCB	Encadreur

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciement

*Avant toute chose, je remercie **ALLAH** le tout puissant de m'avoir donnée courage, patience et force durant toute la période d'étude.*

*Je remercie aussi **Mr S. Belfedhal** l'encadreur de ce mémoire qui m'a accordé sa confiance, son aide et sa compréhension.*

*Je remercie vivement **Mr. Youcef MIHOUB** d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Je remercie également **Mr. Tayeb ALLAOUI** et **Mr. Belkacem BELABBAS** l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon modeste travail.*

Mes remerciements vont également à toute personne ayant aidé, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de ce travail.

Naima BENABDALLAH

تعتبر الطاقة الهوائية من الطاقات المتجددة المعتمد على تطويرها و توسيع استعمالها في وقتنا الحالي، في هذه المذكرة سنسلط الضوء على هذا النوع من الطاقات في انتاج الكهرباء باستعمال المحرك اللازامني ذو تغذية مضاعفة ، ونظرا لعدم استقرار سرعة الرياح، فإن قدرة الإنتاج ستكون ضئيلة ومتغيرة تغير عشوائي فيصبح من الضروري إضافة نظام لحل هذه المشكلة، هذا النظام يسمى نظام التخزين ذو كتلة عزم دورانية وهو الهدف الرئيسي في هذه المذكرة، حيث سنتعرف على كيفية واستراتيجية تخزين الطاقة مع الاختلاف العشوائي لسرعة الرياح وذلك بفرض قيمة مرجعية لقدرة الشبكة فتصبح الجملة (محرك لاتزامني+الكتلة الدورانية) متحكممة في تخزين الطاقة وتحويلها للشبكة في حالة تضاعل قدرة الإنتاج أدرجنا في دراستنا تقنية تتبع القيمة الأعظمية للقدرة وكذا تقنية التحكم الشعاعي نظرا للمزايا الجيدة لكليهما الكلمات المفتاحية: الطاقة الهوائية - تتبع القدرة الأعظمية - التحكم الشعاعي - مولد لاتزامني ذو تغذية مضاعفة- محرك لاتزامني بققص السنجاب-تخزين العزم الدوراني

Résumé :

A nos jour l'énergie éolienne est la plus répondu grâce à ces avantages, dans ce mémoire nous allons prendre en considération ce type de production d'énergie utilisant génératrice asynchrone doublement alimentée(GADA) , la non stabilité de vitesse du vent influe sur la puissance produite, pour résoudre ce problème il est important d'ajouter un système s'appelle système de stockage à volant d'inertie qui est notre objectif principal dans ce mémoire, on va étudier la stratégie utilisée pour stocké de l'énergie avec variation de vitesse de vent , par impose une valeur de référence à la puissance produite l'ensemble (moteur(MAS) + volant) stocke l'énergie et la transmettre au réseau lorsqu'il a besoin

On a aussi utilisé dans notre étude la technique d'extraction le maximum de puissance (MPPT), Et la commande vectorielle grâce a ces avantages.

Mots clés : énergie éolienne-MPPT-commande vectorielle-GADA-MAS-Stockage inertiel

Abstract :

Nowdays the wind energy is most answered because of their advantages, in this thesis we will take into consideration this type of energy used doubly fed induction generator (DFIG) , the unstable of the wind speed affects the power produced, to solve this problem it is important to add a system named flywheel storage system (FESS), which is our objective in this thesis. we will study the strategy use to store energy with variation of wind speed ,by imposes a reference value on the power produced, the assembly (induction motor(IM)+flywheel) stores energy and transmits it to the grid when it needs.

We have used too in our work the technicals of Maximum power point tracking (MPPT), and the field oriented control (FOC) because of their advantages

Keywords : Wind turbine – MPPT – DFIM – IM – FESS – FOC-Flywheel storage system

Sommaire

Introduction Générale 1

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne et les systèmes de stockages

1 Introduction 3

2 Source du vent 3

3 Définition de l'énergie éolienne..... 3

4 Principe de fonctionnement de l'éolienne 3

5 Différents types d'éoliennes 5

5.1 Eoliennes à axe verticale : 5

5.1.1 Savanious..... 5

5.1.2 Darrieus..... 6

5.1.3 Avantages :..... 7

5.1.4 Inconvénients :..... 7

5.2 Eoliennes à axe horizontale : 8

5.2.1 Définition : 8

5.2.2 Constitutions d'une éolienne à axe horizontale 9

5.2.3 Avantages :..... 11

5.2.4 Inconvénients :..... 11

6 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 11

7 Les systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne..... 13

7.1 Système de décrochage aérodynamique « stall » 13

7.2 Système d'orientation des pâles « pitch »..... 13

8 Modes de fonctionnements des éoliennes 14

8.1 Fonctionnement à vitesse variable 14

8.1.1 Machine asynchrone à double alimentation MADA 14

8.1.2 Machine synchrone à aimant permanent MSAP 15

8.1.3 Avantage..... 15

8.1.4 Inconvénients 15

8.2 Fonctionnement à vitesse fixe 15

8.2.1 Avantages 16

8.2.2	Inconvénients	16
9	Modes de stockage d'énergies électriques :	16
9.1	Stockage à long terme :	17
9.1.1	Stockage d'énergie sous forme potentiel de l'eau :	17
9.1.2	Stockage d'énergie sous forme de l'air comprimé:	17
9.1.3	Stockage d'énergie sous forme d'énergie chimique :	17
9.2	Stockage à court terme.....	18
9.2.1	Stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES).....	18
9.2.2	Stockage d'énergie électrique dans des super-condensateurs.....	18
9.2.3	Stockage d'énergie dans une masse tournante(volant d'inertie)	18
10	Système de stockage à volant d'inertie.....	19
10.1	Les composants d'un système de stockage à volant d'inertie.....	19
10.1.1	Volant	19
10.1.2	Les paliers	21
10.1.3	Le convertisseur moteur/générateur	21
10.1.4	L'enceinte de confinement.....	21
10.2	Principes de fonctionnement d'un système de stockage à volant d'inertie	21
11	Conclusion.....	23

Chapitre II

Modélisation et commande de la chaîne de conversion éolienne

1	Introduction.....	24
2	Intérêt de la modélisation	24
3	Modélisation de la turbine.....	24
3.1	Modèle du multiplicateur.....	25
3.2	L'équation mécanique de l'arbre.....	25
3.3	Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT)	27
4	Description de la MADA	29
4.1	Modélisation de la MADA et sa commande	29
4.1.1	Hypothèse simplificatrices	29
4.1.2	Modèle déphasé de la MADA dans le repère de Park[8].....	29
4.1.3	Équations électriques	30

4.1.4	Équations magnétique.....	30
4.1.5	Équation mécanique.....	30
4.2	Stratégie de commande de la MADA.....	31
4.2.1	Choix du référentiel pour le modèle de park.....	31
4.2.2	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	32
4.2.3	Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	32
4.2.4	Commande vectorielle indirecte	33
4.2.5	Type du régulateur	34
4.3	Le convertisseur	34
4.3.1	Contrôle du convertisseur	37
5	Simulations	37
5.1	Condition de simulation	37
5.2	Résultats obtenus	38
	38
5.3	Interprétations	39
6	Modèle complet du système de conversion éolienne	39
6.1	Le convertisseur coté réseau	40
6.2	Le bus continu.....	41
7	Simulation.....	41
7.1	Conditions de la simulation	41
7.2	Résultats obtenus	42
7.3	Interprétations	44
8	Conclusion	45

Chapitre III

Modélisation et commande du système de stockage inertiel

1	Introduction.....	46
2	Modélisation	46
2.1	Le volant d'inertie	46
2.2	La machine asynchrone.....	48
2.2.1	Equations électriques dans le repère (d,q).....	48
2.2.2	Equation mécanique de la MAS.....	49

2.2.3	Contrôle vectoriel de la machine asynchrone [2] [6] [7]	50
2.3	Le convertisseur	52
3	Simulation	54
3.1	Résultats obtenus	54
3.2	Interprétations	56
4	Association de la chaine de conversion éolienne au système SISE	57
4.1	Modèle du bus continu	57
4.2	Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien	58
5	Simulation	60
5.1	Résultats obtenus	60
5.2	Interprétations	63
6	Conclusion	64
	Conclusion générale	65

Annexe

Bibliographie

L'électricité est un facteur essentiel au développement économique dans tous les pays du monde. C'est pour cela que les énergies renouvelables jouent un rôle très important pour l'amélioration de ce développement. Avec le besoin de confort moderne et avec l'industrialisation qui s'accroît, les progrès techniques de ces nouvelles énergies se développent de mieux en mieux.

En effet l'exploitation de nouvelles énergies propre est une course pour les énergies future qui permettent d'améliorer la qualité de vie, c'est le produit le plus précieux de notre société moderne, c'est pourquoi il faut fournir de grands efforts et de large investissement pour avoir la compétence de produire plus d'électricité en protégeant l'environnement. Il est donc essentiel de développer les différentes sources d'énergies renouvelables.

Dans ce travail nous allons étudier l'énergie éolienne qui est classée parmi les énergies propres car elle est non polluante. Néanmoins l'électricité produite par ces éoliennes n'est pas constante, ce qui est due aux fluctuations du vent. De plus le problème majeur de ces éoliennes est qu'elles ne participent, en générale, pas aux services systèmes (réglage de la tension, de la fréquence, possibilité de fonctionnement en îlotage). C'est pour cela qu'elles posent certains nombre de problème au niveau de leur intégration : production aléatoire et difficilement prévisible et la sensibilité importante aux variations de la vitesse du vent [1].

Pour régler le flux d'énergie produit, il nous faut développer un système de stockage. D'une part cette solution nous permet de gérer l'énergie destinée à la consommation, et d'autre part elle nous permet une meilleure exploitation de cette énergie (de ne pas gaspiller l'énergie produite).

Ce mémoire est constitué de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur des différents types d'éoliennes, et les systèmes de stockages existants et la présentation du système de stockage à volant d'inertie.

Le deuxième chapitre s'attache au modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation, et de l'élaboration de sa commande ainsi le convertisseur coté rotor permettant un contrôle indépendant des puissances par les tensions rotoriques dont on s'intéresse par la commande indirecte de la MADA. Ensuite on développe le modèle de l'interface de raccordement au réseau comprenant le bus continu, le convertisseur intermédiaire avant de constituer toute la chaîne de conversion éolienne et présente des simulations validant la commande réalisée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK

Dans le troisième chapitre on commence par la modélisation mathématique du système de stockage inertiel, les principes de commandes de la machine asynchrone associée ainsi des

convertisseurs électroniques de puissance, après on traite l'association du système inertiel de stockage avec la chaîne conçue au deuxième chapitre constituant le système global étudié et montrant la possibilité de réglage de contrôle de la puissance générée.

Des simulations sont faites pour valider cette étude.

On termine ce mémoire par une conclusion générale .

Chapitre I

*Généralités sur l'énergie éolienne
et les systèmes de Stockage*

1 Introduction

Comme les moulins à vent du passé, les éoliennes génèrent des forces mécaniques ou électriques. Au cours des dernières années, l'énergie éolienne a suscité un nouvel intérêt pour d'évidentes questions d'environnement. Avec les grandes éoliennes branchées sur le réseau, on produit des kilowattheures propres et renouvelables.

L'objectif de ce premier chapitre est donc de présenter des généralités sur l'énergie éolienne ainsi que les différents systèmes de stockages et la présentation du système de stockage inertiel.

2 Source du vent

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent [1]

3 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes sont composées de pâles en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Elles sont utilisées pour plusieurs fonctionnements :

- La transformation en énergie mécanique : Pour pomper de l'eau ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- La production d'énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif

Généralement dans nos jours, les éoliennes sont utilisées pour produire de l'électricité et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables. On trouve deux utilisations « On-shore » qui signifie installé en terre, et « Off-shore » qui signifie installé en mer.

4 Principe de fonctionnement de l'éolienne

Sous l'effet du vent, les pales de la turbine tournent en produisant une énergie mécanique, cette énergie sera transformée en énergie électrique par un générateur électrique de type synchrone ou asynchrone. Le schéma des transformations énergétiques est simplifié dans le schéma ci-dessous :

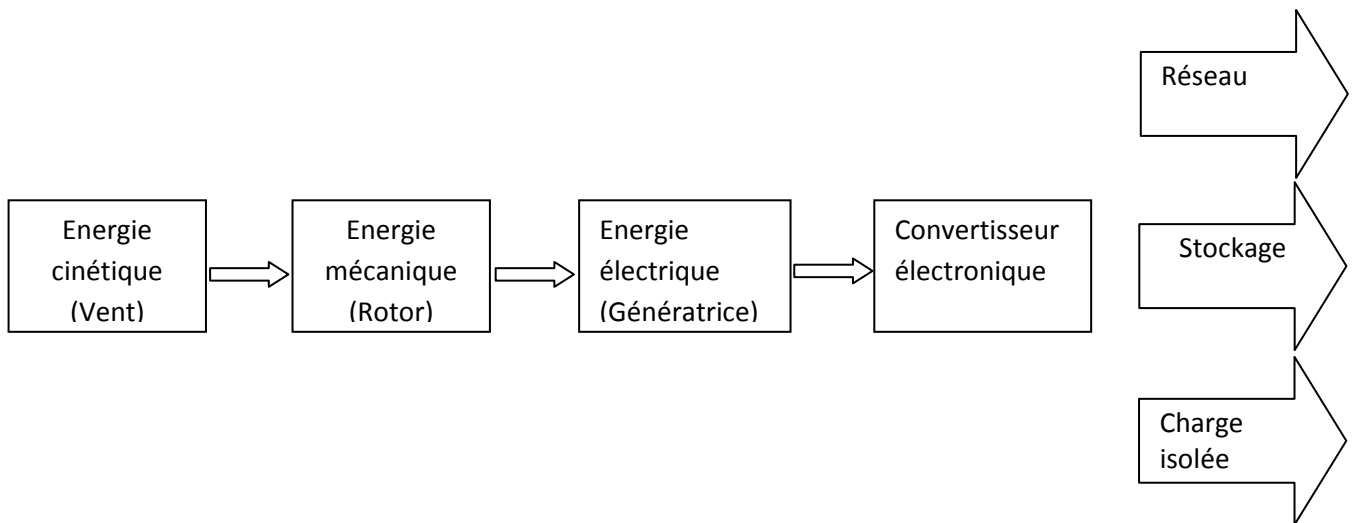


Figure I.1 principe de fonctionnement de la chaîne de conversion

La vitesse de rotation de l'éolienne peut varier entre 5 à 25 tours par minute. Le générateur nécessite une vitesse de rotation du rotor de 1000-2000 tours par minute. Il est donc nécessaire de placer un multiplicateur de vitesse (qui va permettre d'augmenter la vitesse de rotation d'arbre de la turbine). Et pour permettre à l'éolienne de tourner à des vitesses variables du vent on installe des convertisseurs électroniques qui vont permettre d'ajuster la fréquence du courant produit par l'éolienne selon la fréquence du réseau

Le schéma dans la figure (I.2) représente l'enchaînement des composants d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne :

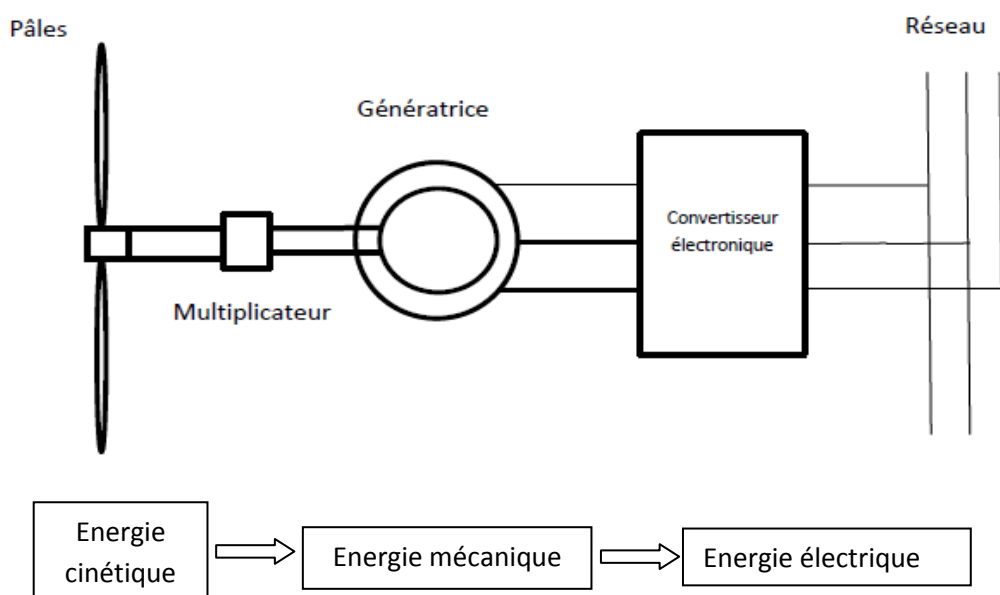


Figure I.2 les composants de chaîne de conversion d'énergie éolienne

5 Différents types d'éoliennes

Ces éoliennes peuvent être classées selon la position de l'axe de leur rotor, on trouve :

5.1 Eoliennes à axe verticale :

Elles présentent un axe vertical et peuvent se passer d'un système d'orientation puisque elles captent tous les vents quelle que soit leur direction. Elles résistent bien aux vents turbulents mais produisent moins d'énergie que les éoliennes à axe horizontal. On en distingue deux types :

5.1.1 Savanious

L'éolienne Savonius est une éolienne à axe vertical inventée par l'ingénieur Sigurd Savonius en 1924. Constituée de demi-cylindre relié à un axe vertical. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes figure (I.3). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.[3].

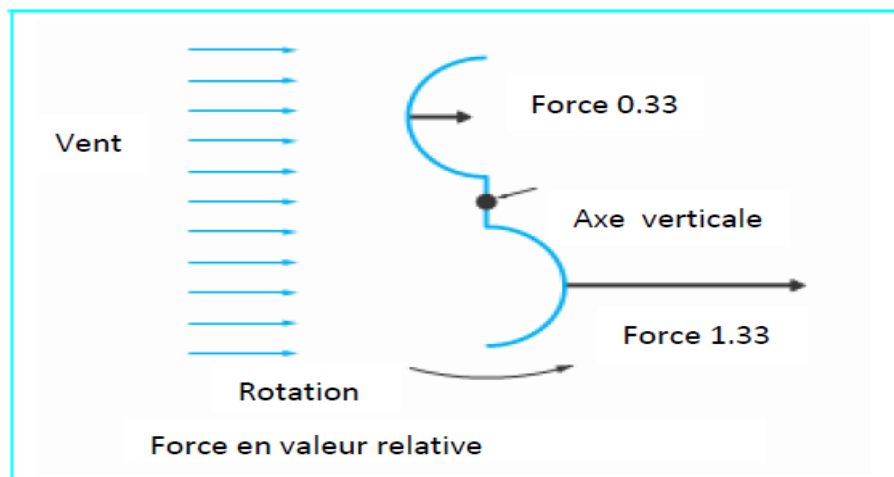


Figure I.3 Effet du vent sur un corps creux[3]

Le couple moteur augmente par la circulation de l'air entre les deux demi-cylindres. La figure (I.4) nous montre le rotor Savonius. Ce type d'éolienne est moins encombrante, est idéale pour l'intégration urbaine, plus silencieuse que les autres éoliennes, mais de faible rendement.

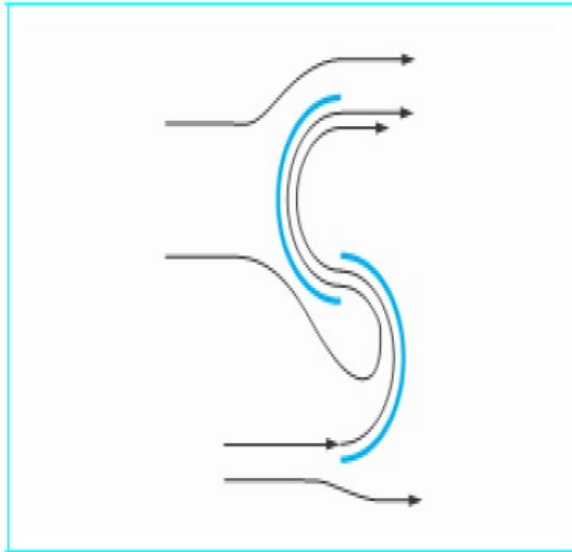


Figure I.4 Rotor Savanious[3]



Figure I.5 Photographie d'une éolienne Savanious [4]

5.1.2 Darrieus

Le principe utilisé dans ce type de machine c'est le principe de variation d'incidence. Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables.

La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur figure (I.6). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la comparaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent.

Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Les rotors peuvent être de forme cylindrique, tonique, parabolique, etc. Figure I.7[6]

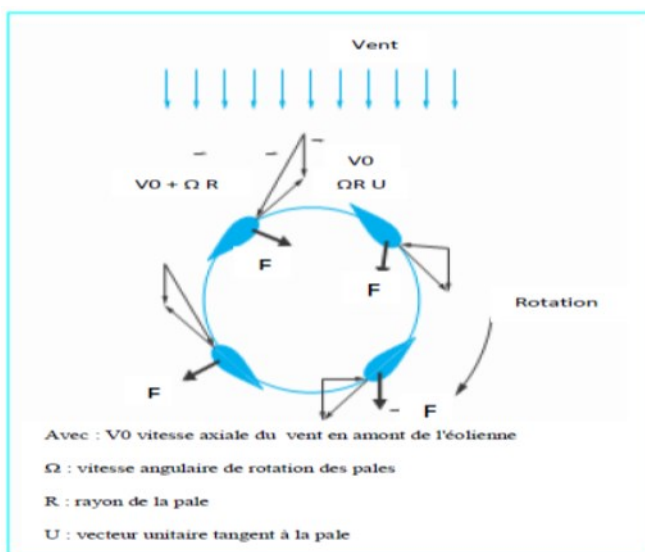


Figure I.6 principe de l'incidence variable[6]

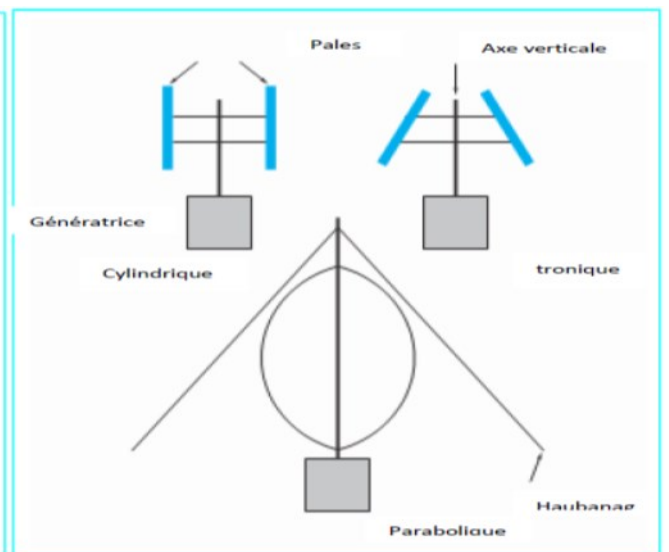


Figure I.7 différents types de Rotor Darrieus[6]

Le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pâles, cela signifie que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire. Cependant, ces éoliennes sont de faible encombrement et intégrables aux paysages et l'architecture urbaine, mais de faible rendement.



Figure I .8 Eolienne à axe verticale de type Darieus [4]

On peut conclure les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe verticale :

5.1.3 Avantages

- Une simple conception
- Le non nécessité d'un système d'orientation par rapport à la direction du vent
- Elles ne sont pas soumises à des contraintes importantes sur les pales lors du fonctionnement.
- Intégrable à l'architecture urbaine.
- Absence de tour car la génératrice, le multiplicateur, ...etc. sont placés à terre.

5.1.4 Inconvénients

- Un faible rendement, et exposé aux contraintes mécanique.
- Généralement le rotor est situé très près du sol, les vitesses du vent sont peu favorable, ce qui réduit l'efficacité de la machine.

- Les éoliennes ne démarrent pas automatiquement. Comme celle du type Dairreus son fonctionnement fait appelle à la rotation des pales donc il lui faut un système de lancement pour la rotation des pales.

5.2 Eoliennes à axe horizontal

5.2.1 Définition

De nos jours c'est les éoliennes les plus utilisées, c'est les descendantes directe du moulin à vent, cependant pour que ces machines fournit de l'énergie mécanique qui actionnera le générateur, elles utilisent la force de portance du vent appliqué aux pales, à la manière des ailes d'avion. Peuvent développer des puissances électriques de plusieurs mégawatts, elle représente généralement des pales compris entre 1 et 3.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. [5]. Il existe deux types de fonctionnements :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la turbine. Le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spécifique.
- **Avale** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle.

Chaque configuration possédé avantages et inconvénients : La formule « amont » requiert des pâles rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « Amont », l'écoulement de l'air sur les pales et peu perturbés par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». En fin une machine « aval » est théoriquement auto orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » [3].

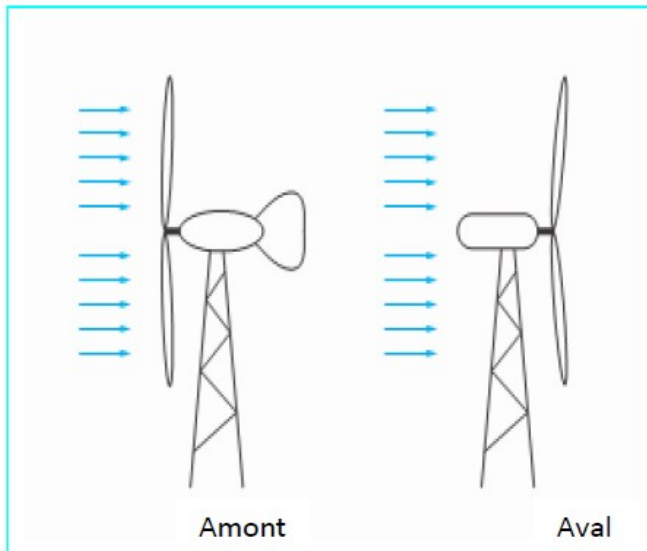


Figure I.9 Configurations à axe horizontale [3]



Figure I.10 Eolienne multipale [3]

5.2.2 Constitutions d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne est composée de plusieurs composants qui sont :

- **Tour**

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor plus nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor plus nacelle) de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation [5].

- **Rotor**

Composé de 1 à 3 pales assemblées dans leur moyeu (en générale 3 c'est la plus répandue) c'est une partie très importante dans l'aérogénérateur, ces pales tournent en fonction des vitesses du vent. Le rotor entraîne est couplé directement à un générateur électrique, il est relié à la nacelle par le moyeu.

- **Nacelle**

Monté au sommet du mat, et à l'intérieur on trouve les composants mécaniques, système hydraulique, composants électriques et électronique nécessaire pour le fonctionnement de la machine. Et parmi ces composants on trouve :

➤ **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique [5].

L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [5].

➤ **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

➤ **Un contrôleur électronique** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent), et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle [5].

➤ **Un système de refroidissement** : Le multiplicateur de vitesse, comme la génératrice, connaissent un échauffement suite aux efforts mécaniques. Des refroidisseurs sont donc utilisés pour limiter les températures de ces organes. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Ce dernier est plutôt destiné pour le refroidissement des multiplicateurs [6].

➤ **Le frein** : qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge [5].

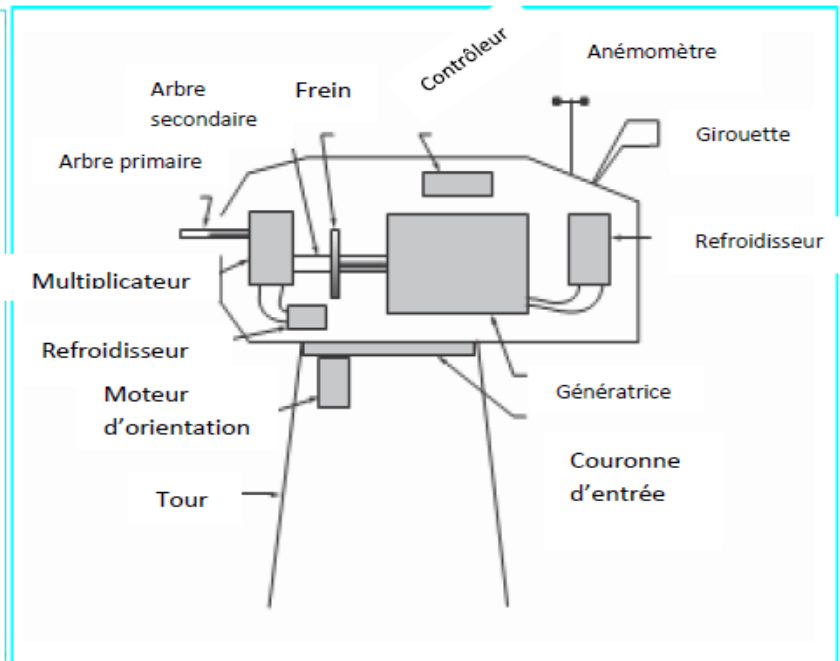
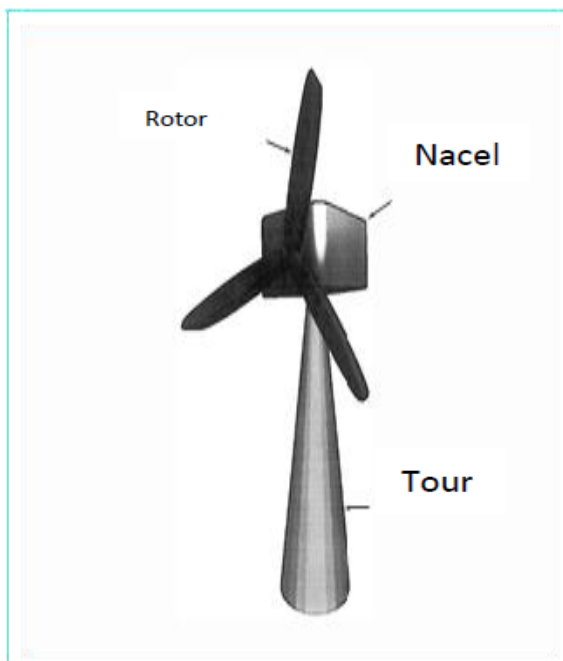


Figure I .11 Composants d'une éolienne à axe horizontale [3]

Figure I .12 les composants de la nacelle [3]

5.2.3 Avantages

- Un rendement plus élevé.
- Moins couteuse que les autres éoliennes.
- Un système d'orientation selon la direction du vent.
- Mieux adaptés aux zones rurales.
- Moins exposé aux contraintes mécaniques.

5.2.4 Inconvénients

- Une conception moins simple que les éoliennes à axe verticale.
- Elles sont bruyantes.
- Peuvent être un risque pour les oiseaux qui volent dans le même couloir du vent. ou on les a placées.

6 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La puissance du vent sur une surface balayé par la turbine s'exprime comme suit [7]:

$$P_V = \frac{\rho S V^3}{2} \quad (I.1)$$

$$P_t = C_p P_V = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.2)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (I.3)$$

Et :

$$S = \pi R^2 \quad (I.4)$$

Ou :

P_V : Puissance du vent

P_t : Puissance de la turbine

C_p : coefficient de puissance d'éolienne (chaque éolienne à son propre C_p)

R : rayon de l'aérogénérateur ou longueur de pâles

ρ : masse volumique de l'air

S : surface balayé par la turbine d'éolienne

V : vitesse du vent

λ : le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

$\frac{P_t}{P_{mt}}$ Appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un max de $\frac{16}{27}$ soit 0,59.

Cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse du vent [1].

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pâles (β) et le ration de vitesse (λ) [1].

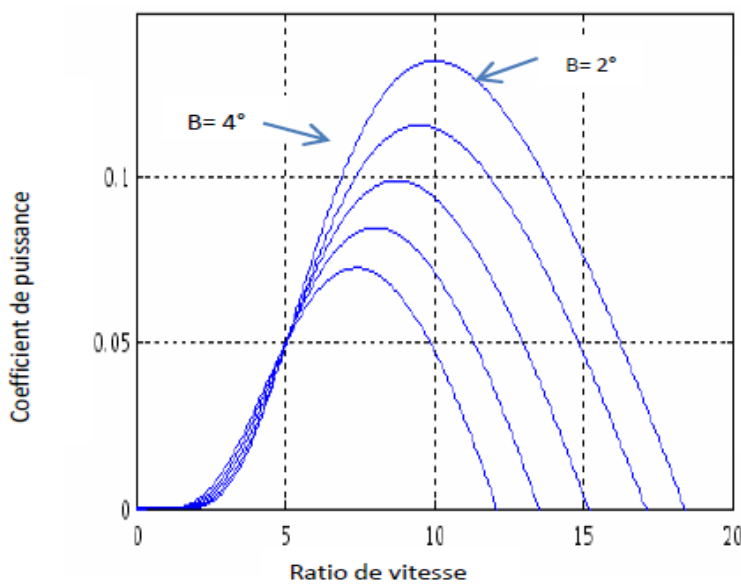


Figure I.13 C_p en fonction de λ et l'angle de calage β [7]

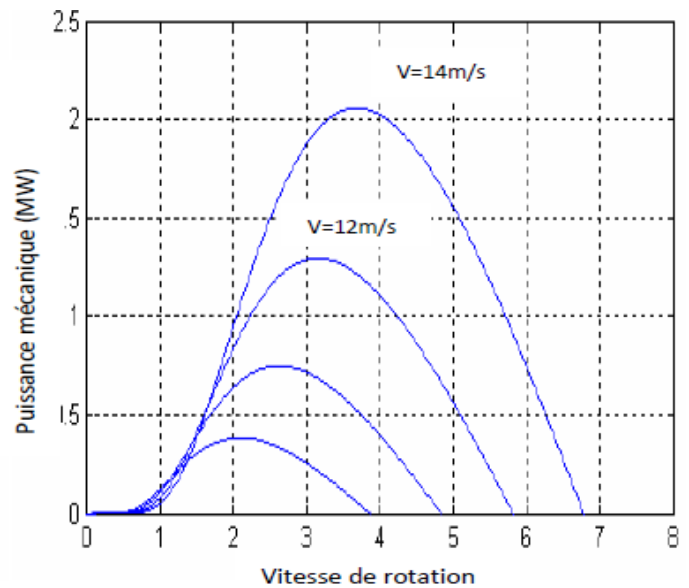


Figure I.14 puissance mécanique en fonction de vitesse du vent [7]

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par. [7]:

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_P \left(\frac{\Omega_g R}{GV} \right) \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.5)$$

Avec: Ω_g : vitesse de rotation après le multiplicateur (vitesse de la génératrice)

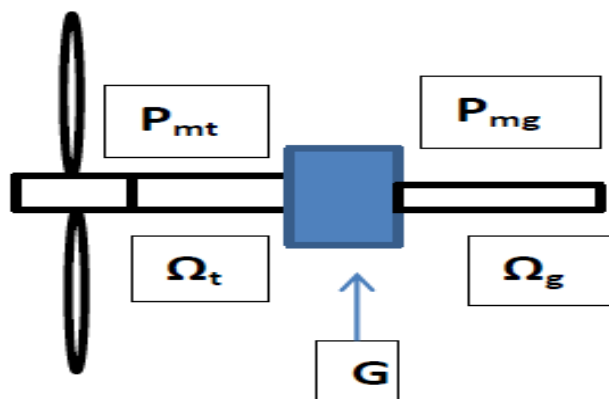


Figure I.15 schéma de puissance et vitesse générée par la turbine à la génératrice [7]

7 Les systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

7.1 Système de décrochage aérodynamique « stall »

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par conséquent. Une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pâles [7].

7.2 Système d'orientation des pâles « pitch »

Le système d'orientation des pâles sert essentiellement à limiter la puissance générée, avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé (pitch control). En réglant l'angle d'orientation des pâles, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pâles sont face au vent en basses vitesses, puis pour les fortes vitesses du vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

8 Modes de fonctionnements des éoliennes

Il existe deux modes de fonctionnement d'une éolienne

8.1 Fonctionnement à vitesse variable

Ce système ne nécessite pas un système d'orientation des pâles, ce qui nous permet d'exploiter les puissances du vent sur une large plage. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [6]. Les machines souvent utilisées dans ce type de fonctionnement sont :

8.1.1 Machine asynchrone à double alimentation MADA

Les bobinages rotoriques sont reliés à une résistance de dissipation via un redresseur à thyristor. Cette structure simplifiée permet un réglage limité de la vitesse. Offre peu de possibilité de réglage de la puissance générée et présente un rendement moindre sur la plage de fonctionnement [1].

Un convertisseur de fréquence commande directement les courants dans les enroulements du rotor. Ceci permet de contrôler la puissance de sortie du générateur en utilisant des convertisseurs dimensionnés à 20 voire 30% de la puissance [8].

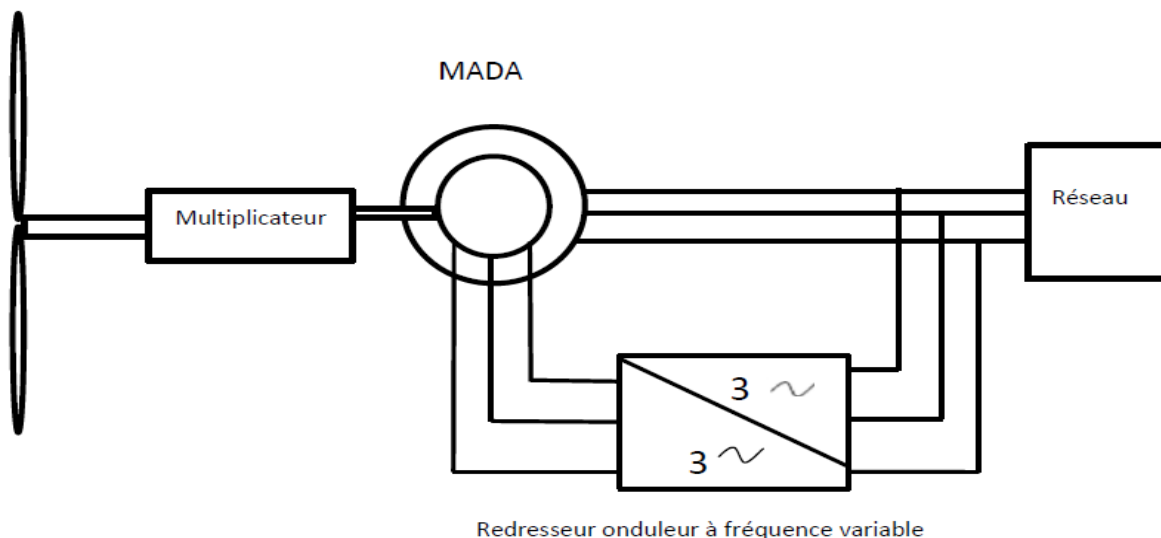


Figure I.16 configuration de conversion de l'énergie éolienne avec la MADA

8.1.2 Machine synchrone à aimant permanent MSAP

Certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. La génératrice est équipée d'aimant permanent. Elle nécessite pour sa connexion au réseau de convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. L'interface avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau. Tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en utilisant le pitch contrôle à une fonction de sécurité par grand vent. [1].

8.1.3 Avantages

- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Large exploitation du vent.
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

8.1.4 Inconvénients

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance «complexe ».

8.2 Fonctionnement à vitesse fixe

En générale la machine la plus utilisée pour ce fonctionnement c'est la machine asynchrone à cage d'écureuil relié directement au réseau, pour des raisons de robustesses et de faible coûts, ce dernier exige la fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques de la machine. Sa vitesse est maintenue approximativement constante par le système d'orientation des pâles (pitch contrôle). La machine fonctionne en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse $\Omega_s(1-g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme (souvent $N_s= 1500$ trs.min⁻¹) et g le glissement, avec $g < 0$ pour un fonctionnement en génératrice avec une convention moteur ($|g| \leq 1\%$) [1].

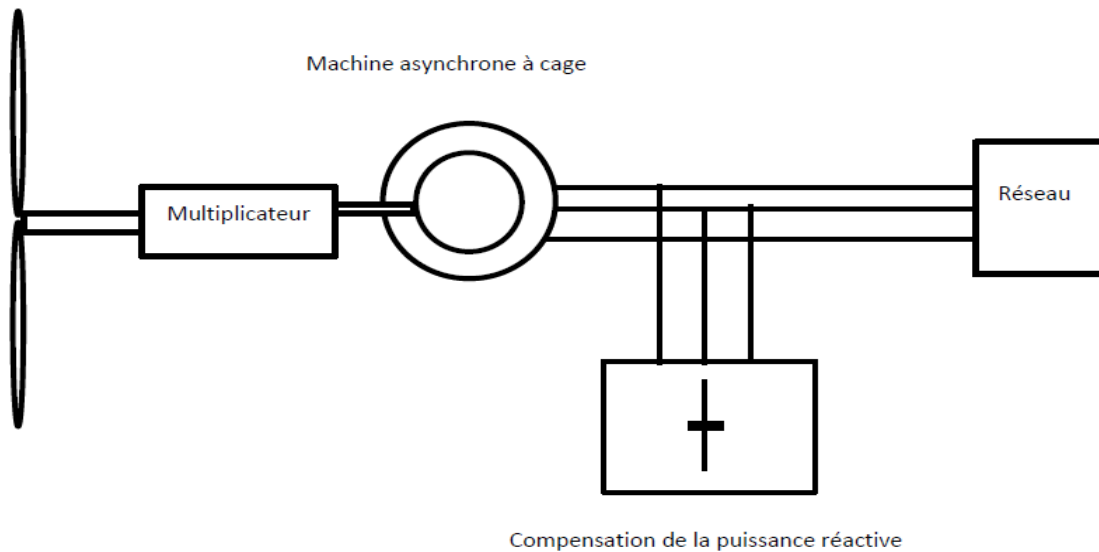


Figure I .17 conversion de l'énergie éolienne par la MAS à cage

8.2.1 Avantages

- Système électrique simple.
- Grande fiabilité.
- Prix modéré.

8.2.2 Inconvénients

- Une puissance extraire non optimale.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone.

9 Modes de stockage d'énergies électriques

L'électricité ne peut pas être stocké facilement et nécessite sa transformation sous une autre forme (chimique, thermique, potentielle, mécanique, etc.). Le stockage de l'énergie électrique constitue une des composantes d'un futur développement durable. Il y a plusieurs méthodes de stockage d'énergie pouvant être différenciés en deux catégories [11] :

- Stockage à long terme (temps de stockage supérieur à 10 minutes).
- Stockage à court terme (temps de stockage inférieur à 10 minutes).

9.1 Stockage à long terme

9.1.1 Stockage d'énergie sous forme potentiel de l'eau :

Nommée aussi stockage par pompage hydraulique est une méthode utilisée depuis 1929, étant la plus vieille technologie de stockage d'énergie dans les centrales. En effet, jusqu'à en 1970, c'était la seule énergie disponible sur le marché pour stocker de grandes quantité d'énergie [11].

Ce système comporte deux grands réservoirs d'eau dont les hauteurs se différent, des pompes et des turbines hydrauliques, l'eau du réservoir inférieur est pompé au réservoir supérieur. A partir du besoin énergétique, une quantité d'eau du réservoir supérieur est relâchée pour qu'elle soit à nouveau dans le réservoir inférieur. En passant par une ou plusieurs turbines l'énergie potentielle de l'eau est transformée en énergie mécanique, cette énergie entraine des générateurs qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.

9.1.2 Stockage d'énergie sous forme de l'air comprimé:

Le stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé (CAES: Compressed-Air Energy Storage) constitue une autre alternative, apparue un peu plus tard [11].

Le principe de ces installations est de comprimer de l'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande profondeur. Pour récupérer l'électricité, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Pour être exploité, l'air est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz naturel. Cette technique conduit à stocker de l'énergie sous forme d'air comprimé, soit dans de grandes cavités géologiques (par exemple mine de sel) soit à une échelle plus petite, dans des bouteilles de gaz sous pression. Les inconvénients de cette technologie sont : son faible rendement, la faible manœuvrabilité (mise en route environ 15 min), l'investissement élevé et la consommation de gaz [12].

9.1.3 Stockage d'énergie sous forme d'énergie chimique :

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répondeue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la

stocké sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité [11].

9.2 Stockage à court terme

9.2.1 Stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES)

SMES (Superconducting Magnet Energy Storage) des stockages magnétiques qui utilisent des matériaux supraconducteurs qui fonctionnent à très basse température, ce qui permet d'avoir une résistance quasi-nulle. L'absence de résistance dans les conducteurs permet de stocker de l'énergie dans un bobinage court-circuité sur lui même pendant un temps théoriquement infini. La complexité de ce type de stockage réside dans la nécessité d'avoir un système de réfrigération. Ce système est commercialisé notamment aux Etats-Unis. Ce type de stockage a été utilisé pour la stabilisation des réseaux (contrôle de P et Q) ou pour améliorer la qualité du réseau [12].

9.2.2 Stockage d'énergie électrique dans des super-condensateurs

Le stockage d'énergie dans des super-condensateurs est l'un de deux systèmes de stockage direct de l'électricité, sous la forme d'un champ électrique entre deux électrodes. À la différence des dispositifs électrochimiques, il n'y a pas de réaction chimique ce qui accroît considérablement la cyclabilité. Le principe est voisin de celui du condensateur mais l'isolant, qui sépare les électrodes, est remplacé par un électrolyte conducteur ionique dans lequel le déplacement des ions s'effectue le long d'une électrode conductrice à très grande surface spécifique. On obtient ainsi de meilleures énergies volumiques à un coût très élevé, mais avec une constante de temps de décharge supérieure à cause de la lenteur de déplacement des ions dans l'électrolyte (puissance de 800 à 2000 W/kg) [10].

9.2.3 Stockage d'énergie dans une masse tournante (volant d'inertie)

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISE) ont été redécouverts depuis quelques années. Un SISE comporte un volant d'inertie couplé à une machine électrique pouvant fonctionner dans deux régimes : moteur ou générateur. Les SISEs ont des constantes de temps de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures, en fonction de leur conception. Les SISEs ont trouvé une application spécifique dans le domaine d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, pour maintenir la fréquence et la tension du réseau dans les limites imposées par les

règlements. En raison de leur dynamique élevée, de leur bon rendement et de leur longue période de vie, les SISEs sont bien adaptés pour stocker l'énergie pendant des périodes courtes, ce qui suffit pour améliorer la qualité de l'énergie [11].

Pour augmenter l'efficacité de l'éolienne, diminuer les contraintes de qualité d'énergie produite et faciliter l'intégration avec l'utilisation, faut choisir parmi ses systèmes de stockage le plus rentable pour une production éolienne.

Tout système de stockage d'énergie est caractérisé principalement par les critères suivants [12] :

- La puissance massique (en W/kg).
- L'énergie massique (en Wh/kg).
- le nombre de cycles de fonctionnement.
- Le coût de l'installation.
- Le rendement énergétique

Une analyse est faite sur la capacité du stockage à augmenter la pénétration des éoliennes dans le réseau. L'article montre que le plus rentable système de stockage est le SISE, si la période de stockage ne dépasse pas 10 min. De plus, il est montré que l'association d'un SISE de 300 kW à une éolienne de 1 MW peut augmenter le revenu de 14000 €/an [11].

10 Système de stockage à volant d'inertie

10.1 Les composants d'un système de stockage à volant d'inertie

Les principaux composants d'un dispositif de stockage électromécanique inertiel sont schématisés dans figure (I.18):

10.1.1 Volant

Élément principal de l'accumulation, puis le moteur-générateur, le tout guidé par des paliers éventuellement magnétiques, un convertisseur électronique de puissance et une enceinte à basse pression [12]

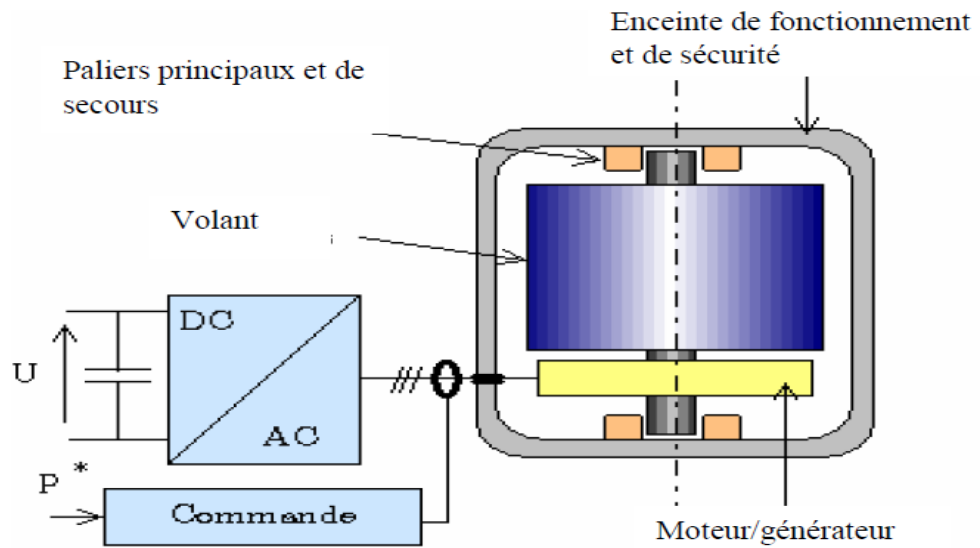


Figure I.18 principaux composants d'un accumulateur inertiel batterie

C'est la partie principale du système, de forme cylindrique. Les matériaux utilisés doivent avoir une haute résistance à la traction (σ_{max}) due à la force centrifuge pour permettre des vitesses périphériques élevées [13].

L'énergie massique vaut :

$$\frac{E_C}{M} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (I.6)$$

Avec :

M ; la masse du volant

K : dépendant de la forme du volant d'inertie

ρ : masse volumique du volant d'inertie

E_C : l'énergie cinétique stockée dans le volant d'inertie J_v

Tel que :

$$E_C = \frac{1}{2} J_{st} \Omega_{st}^2 \quad (I.7)$$

Avec :

$$J_{st} = KMR_{st}^2 \quad (I.8)$$

Cette équation montre que pour une même énergie, un fonctionnement à vitesse élevée réduit considérablement la valeur du coefficient d'inertie.

Ou :

Ω_{st} : La vitesse de rotation du volant en [rad.S⁻¹].

J_{st} : Le moment d'inertie du volant en [Kg.m²].

R_{st} : Le rayon de la masse tournante.

La résistance mécanique de la structure du volant impose une vitesse maximum de :

$$V_{stmax} = \sqrt{\frac{R_e}{\rho}} \quad (I.9)$$

Ou :

Re : limite de la résistance de rupture la plus élevée possible

Ainsi l'augmentation de l'énergie cinétique stockée nécessite des matériaux qui combinent une faible densité (ρ), les volants les plus performants sont fabriqués de Klever

10.1.2 Les paliers

Les paliers (souvent magnétiques) assurent la libre rotation de l'ensemble autour de l'axe principal d'inertie et minimisent les frottements et les vibrations, sources de pertes. Ils doivent donc assurer les deux fonctions, sustentation et centrage [10].

10.1.3 Le convertisseur moteur/générateur

Le moteur /générateur est l'élément de conversion, il permet la transformation réversible de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le moteur /générateur associé à un système inertiel de stockage d'énergie doit être capable de fonctionner à puissance constante sur une large plage de vitesse. [14].

10.1.4 L'enceinte de confinement

Elle participe au maintien d'une atmosphère contrôlée autour du volant, en particulier d'une faible pression afin de minimiser les pertes d'autodécharge [10].

10.2 Principes de fonctionnement d'un système de stockage à volant d'inertie

Comme dans la majorité des systèmes de stockage d'énergie électrique, il y a une transformation réversible d'énergie. Lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire du moteur électrique. L'énergie mécanique est stockée

dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique d'une masse tournante. Lors de la décharge du SISE, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique. D'habitude, il y a une seule machine électrique qui peut fonctionner en moteur ou en générateur, en fonction du régime de fonctionnement du SISE. Le régime de fonctionnement est imposé par le convertisseur électronique de puissance, qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers la machine électrique. Les SISEs sont capables de fournir des puissances très élevées, limitées seulement par les puissances nominales des générateurs et des convertisseurs électroniques de puissance. Le temps de réponse est limité à quelques millisecondes et le nombre de cycles charge/décharge est conditionné seulement par l'efficacité du système de refroidissement des composants électriques et électroniques

Plusieurs types de machines sont utilisés. Pour réaliser un système de stockage plus rentable la plus adaptée c'est celle qui a des parties tournantes plus robustes, et simple à réaliser. Ces caractéristiques on les trouve dans la machine asynchrone.

De nombreux travaux sont réalisés sur le système de stockage à volant d'inertie parmi ces travaux on cite :

Systèmes inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens, recherche faite par le docteur Gabriel-Octavian Cimuca [11], la thèse a été suggérée par une la société Norelec pour augmenter le taux de pénétration des éoliennes à vitesse fixe dans les sites isolés. Pour permettre l'augmentation le docteur a travaillé sur la nécessité de lisser la puissance générée par les éoliennes on ajoutant un système de stockage à court terme, très dynamique, et il a développé une stratégie de commande de l'ensemble éolienne.

Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie, dont le docteur Arnaud Davigny [1] à travailler dessus pour donner une solution pour que des systèmes de génération, à base d'éolienne associée à du stockage inertiel d'énergie, puissent participer aux réglages du réseau.

Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, recherche faite par le docteur Ludovic Leclercq [14], ce travail a pour but d'évaluer les possibilités de participation aux services systèmes d'éoliennes couplées à des systèmes de stockage inertiel. C'est un travail dont il a modélisé et élaboré de stratégies de commande et de la simulation de trois systèmes d'électrotechniques, il a traité le système de stockage inertiel considérant le couplage mécanique d'un volant d'inertie sur l'arbre de la turbine, et en utilisant uniquement le volant d'inertie.

11 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur les éoliennes et leurs fonctionnements et aussi les différents systèmes de stockage existants. Le système de stockage le mieux adapté pour notre étude c'est le stockage inertiel, pour cela on a présenté les constitutions et le principe de fonctionnement d'un système de stockage à volant d'inertie.

Notre étude sera sur une turbine éolienne tripale, entraînant une génératrice asynchrone double alimentation (MADA), pour des vitesses variables via un multiplicateur mécanique. On étudiera et on modélisera cette chaîne de conversion d'énergie, avec un système de stockage inertiel comprenant une masse tournante, une machine de type asynchrone et un convertisseur statique avant d'élaborer un système de commande du système global.

Chapitre II

*Modélisation et Commande de la Chaîne de
Conversion Eolienne*

1 Introduction

Ce chapitre est destiné à la modélisation de différentes parties de la chaîne de conversion éolienne, à vitesse variable basé sur machine asynchrone doublement alimentée (MADA), dont le stator est connecté directement au réseau. Et le rotor est alimenté par deux convertisseurs de puissance en MLI monté en cascade via un bus continu.

On va étudier la liaison au réseau dont le convertisseur coté réseau est identique à celui du coté rotor, ensuite regrouper l'ensemble et finaliser le travail par des résultats de simulation pour valider le modèle complet de la chaîne (figure II.1) .

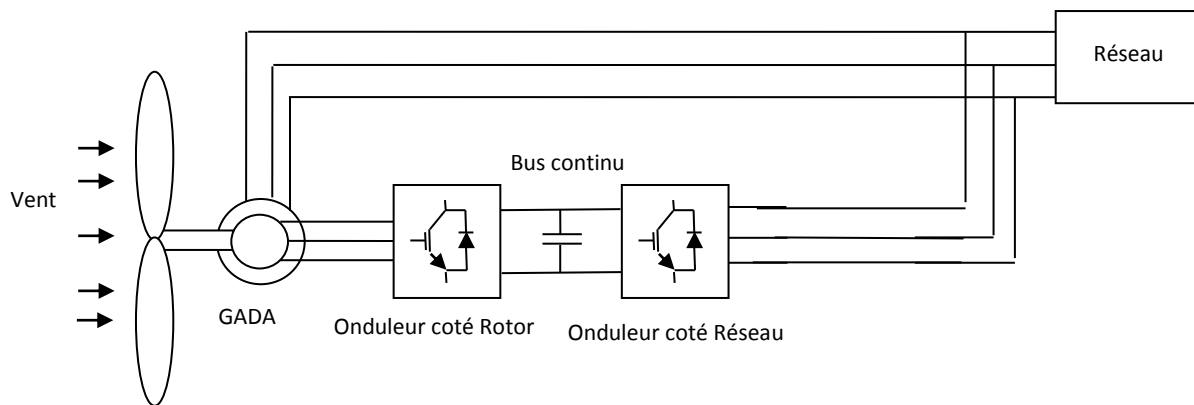


Figure II .1 structure générale de la chaîne de conversion éolienne

2 Intérêt de la modélisation

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique, c'est ce qu'on appelle modélisation, il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de commande performants.

3 Modélisation de la turbine

Un système éolien classique est constitué d'un aéro-turbine qui transforme de l'énergie de vent en énergie mécanique, d'un multiplicateur de vitesse de gain G qui permet à la fois de diminuer le couple et d'augmenter la vitesse de rotation, et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Comme nous l'avons déjà présenté au **chapitre I** la puissance du vent est :

$$P_V = \frac{\rho S V^3}{2} \quad (\text{II.1})$$

La puissance aérodynamique récupérée au niveau du rotor de la turbine peut s'écrire sous la forme :

$$P_{aér} = C_P P_V = C_P(\lambda, \beta) \frac{\rho S V^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

La relation des vitesses qui définit le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent est :

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{V} \quad (\text{II.3})$$

Connaissant la vitesse de la turbine (Ω_t), nous déterminons le couple aérodynamique (couple de la turbine éolienne) :

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\Omega_t} = C_P(\lambda, \beta) \frac{\rho S V^3}{2 \Omega_t} \quad (\text{II.4})$$

3.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice [2].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (\text{II.5})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

G ; gain du multiplicateur de vitesse

C_g : Couple résistant (issu du multiplicateur)

3.2 L'équation mécanique de l'arbre

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie J_{tur} . Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice J_g , et on suppose que le multiplicateur de vitesse est idéal. L'inertie totale J est donnée par l'expression suivante :

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

L'équation fondamentale de la dynamique permet d'établir l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor [5]:

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.8)$$

Le couple mécanique est fonction du couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux C_{visq} et du couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{visq} \quad (II.9)$$

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_{visq} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.10)$$

Avec :

f : Coefficient du frottement visqueux

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine (figure II.2)

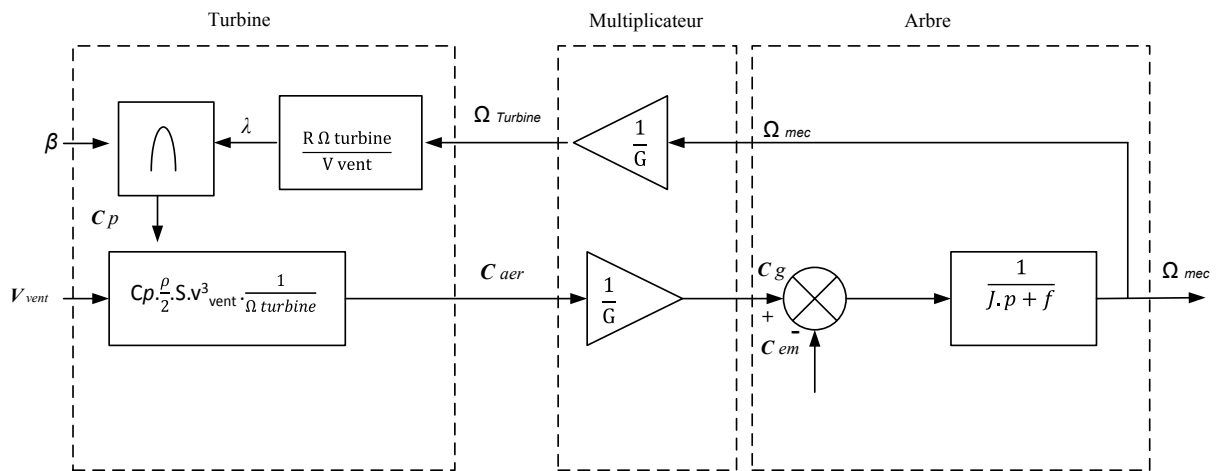


Figure II .2 schéma bloc fonctionnel du modèle de la turbine

Le schéma bloc, nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur l'angle de calage des pales et sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

3.3 Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être envisagés. La structure de commande obtenue consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence.

On peut écrire :

$$C_{em_ref} = PI_{\Omega}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II.11)$$

Avec :

PI_{Ω} : Le régulateur de vitesse

Ω_{ref} : La vitesse de référence mécanique

La vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer (Ω_{tur_ref}) pour maximiser la puissance extraite, on prenant en compte le gain du multiplicateur on a :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{tur_ref} \quad (II.12)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspondant à la valeur optimale de ratio de vitesse, λ_{Cpmax} (à β constant égal à 0°) permet d'obtenir la valeur maximal du C_p [2] (figure II.4)

Elle est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{Cpmax} \cdot v}{R} \quad (II.13)$$

La figure (II.3) résume le schéma bloc de la stratégie MPPT étudiée.

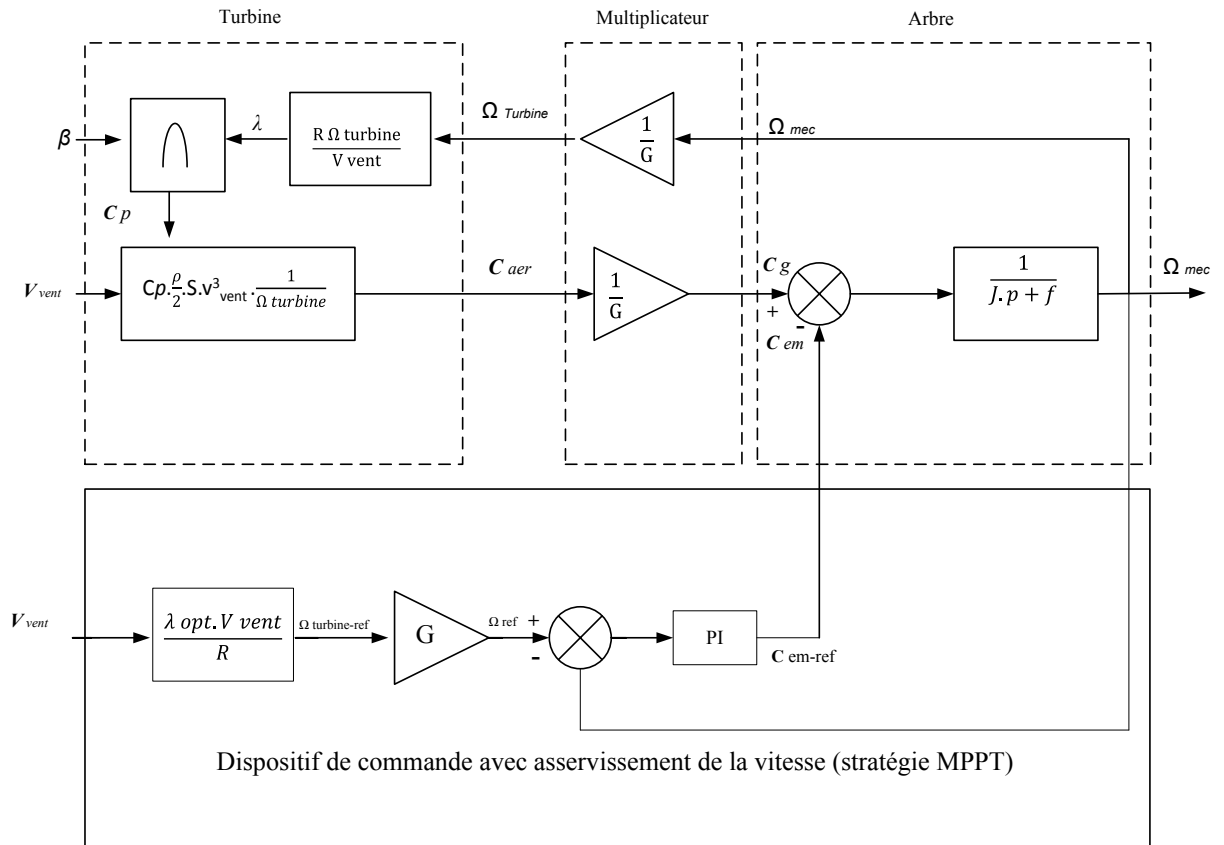


Figure II.3 schéma bloc de la stratégie MPPT avec asservissement de vitesse

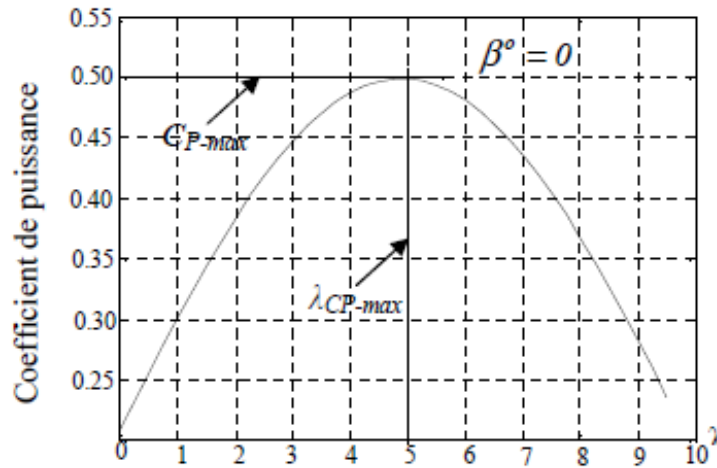


Figure II.4 coefficient de puissance C_p en fonction de rapport de vitesse λ [8]

Le calcul des constantes du correcteur utilisé pour l'asservissement de la vitesse qui est de type Proportionnel Intégral est détaillé sur l'annexe

4 Description de la MADA

La MADA est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles l'un au rotor et l'autre au stator. Elle est constituée le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles les enroulements sont logés.

4.1 Modélisation de la MADA et sa commande

4.1.1 Hypothèse simplificatrices

Lors de la modélisation de la MADA, on a supposé que :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale
- Les résistances ne varient pas avec la température
- Entre fer constant
- L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte

De ce fait tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements.

4.1.2 Modèle déphasé de la MADA dans le repère de Park[8]

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $P(\Psi)$ permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a,b,c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d,q,o). Le produit matriciel définissant la transformation de Park est exprimée par :

$$[X]_{dqo} = P(\Psi) \cdot [X]_{abc} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Avec : } P(\Psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Psi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\Psi) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

La transformation inverse de Park est donnée par :

$$[X]_{abc} = P^{-1}(\Psi) \cdot [X]_{dqo} \quad (\text{II.16})$$

Où :

$$P^{-1}(\Psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Psi + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$\Psi = \theta_s$ (Phase statorique), pour les grandeurs statoriques.

$\Psi = \theta_r$ (Phase rotorique), pour les grandeurs rotoriques.

Pour un système équilibré la composante homopolaire est nulle, et en appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu après calcul, il est représenté sous la forme suivante :

4.1.3 Équations électriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

4.1.4 Équations magnétique

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

4.1.5 Équation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.21})$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques est comme suit :

$$C_{em} = P(\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

P : nombre de paires de pôles

4.2 Stratégie de commande de la MADA

L'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation outre que la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique puissance-vitesse optimale de l'éolienne, la caractéristique montre que pour chaque vitesse du vent, il existe une vitesse de rotation de turbine qui correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance, permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement aérodynamique possible.

Pour pouvoir tourner à une vitesse optimale, à vitesse de vent donnée, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est-à-dire une puissance active débitée par la MADA. C'est en utilisant cette référence de puissances active et réactive que la machine peut être alors commandée. Le modèle de la turbine associé au modèle de la MADA nous a permis de déterminer, pour chaque vitesse de vent la puissance que devait générer la MADA pour permettre à l'éolienne de tourner à vitesse optimale [8].

Nous allons déterminer les expressions des puissances active et réactive de l'aérogénérateur sur lesquelles nous agissons pour commander la génératrice par le principe de la commande vectorielle en puissance.

4.2.1 Choix du référentiel pour le modèle de park

En choisissant un référentiel diphasé 'd-q' lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statorique Φ_s avec l'axe 'd', nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} (\phi_s \cdot i_{qr}) \quad (\text{II.24})$$

Dans la production éolienne, on utilise les machines de moyenne, et de forte puissance, sur ceux on peut négliger la résistance statorique et toujours dans la deuxième approche suscitée (flux statorique constant), on peut écrire les expressions des tensions et des flux statoriques comme suit

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \cdot \Phi_s \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

À partir du système d'équations (II.23), nous pouvons exprimés les courants statoriques i_{ds} et i_{qs} en fonction des courants rotoriques i_{dr} et i_{qr} comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{L_s} \phi_s - \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

4.2.2 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Les puissances actives et réactives de la MADA, sont exprimées par les relations suivant

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} \cdot i_{ds} - v_{ds} \cdot i_{qs} \\ P_r = v_{dr} \cdot i_{dr} + v_{qr} \cdot i_{qr} \\ Q_r = v_{qr} \cdot i_{dr} - v_{dr} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

En remplaçant les courants i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données (équation II.27), dans les relations de puissances statoriques on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qr} \\ Q_s = v_s \cdot \frac{\phi_s}{L_s} - v_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

4.2.3 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les relations (II.27), et on obtient, le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{dr} + \frac{Mv_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Ces expressions des flux d'axes 'd' et 'q', sont alors portées dans les expressions des tensions rotoriques (II.18), nous obtenons alors :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \frac{d}{dt} i_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \frac{d}{dt} i_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{dr} + g \left(\frac{Mv_s}{L_s}\right) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

En régime permanent, le système d'équations (II.31), s'écrit :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \cdot \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \cdot \omega_s \left(L_s - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot i_{dr} + g \left(\frac{Mv_s}{L_s}\right) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Où g : est le glissement de la MADA

A partir des équations que nous venons de mettre en place nous avons un processus dont les grandeurs de commande sont les tensions rotoriques délivrées par l'onduleur et les grandeurs commandées sont les puissances statoriques active et réactive

Il est possible maintenant de commander séparément les deux axes (d) et (q) avec leurs propres régulateurs [2].

La commande effectuée pour cette machine dite : indirecte, cette commande est caractérisé par son système qui comporte une boucle permettant de contrôler les courants rotoriques.

4.2.4 Commande vectorielle indirecte

Cette méthode consiste à réguler que les courants rotoriques dont les consignes résultent directement des puissances de références imposées à la machine (figure II.5)

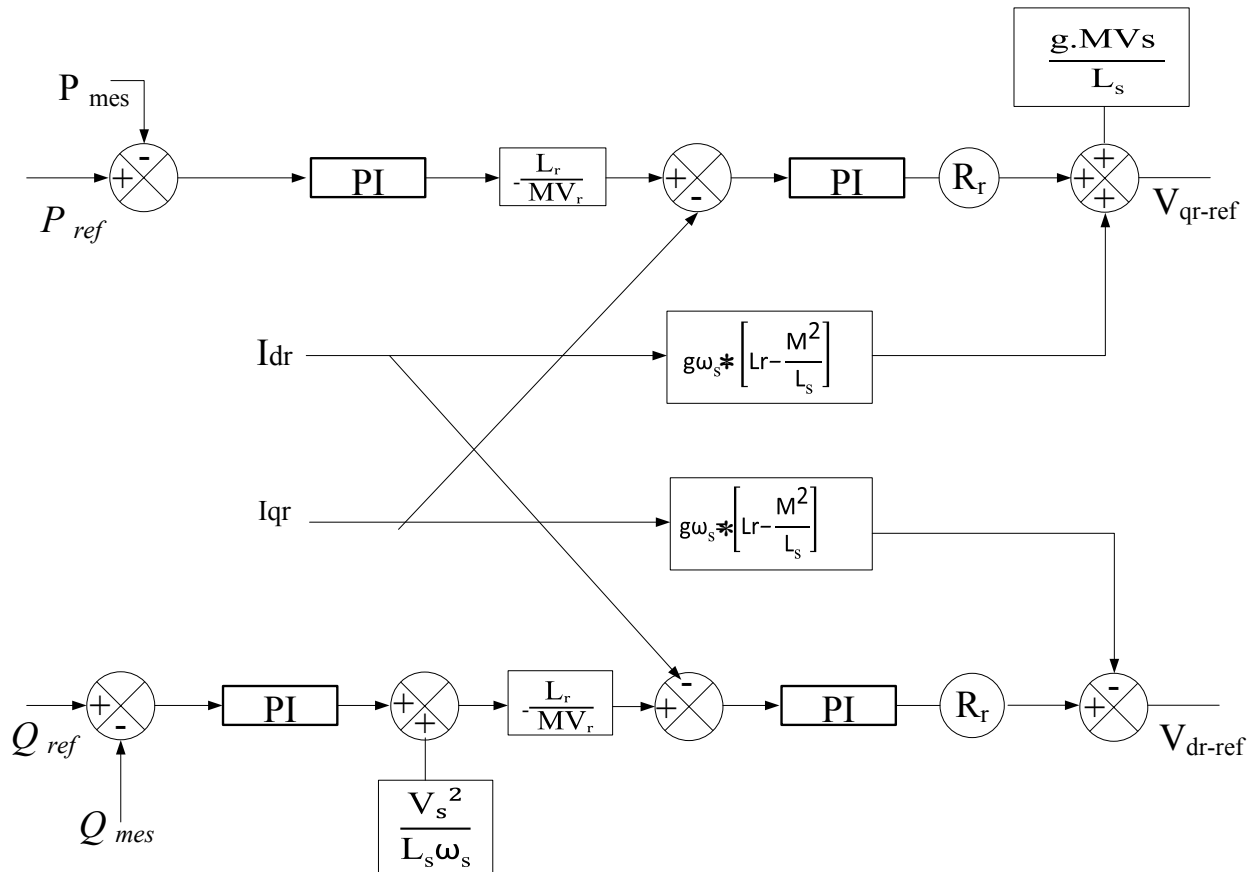


Figure II .5 commande en puissances indirecte

4.2.5 Type du régulateur

Dans plusieurs structures de commande des régulateurs PI ont été utilisé pour commander la MADA. On adopte à l'utiliser pour sa simplicité, sa rapidité et sa facilité à mettre en œuvre notamment que ses performances sont suffisamment acceptables. Le calcul des gains du régulateur est présenté dans l'annexe dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

4.3 Le convertisseur

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor où les signaux de commande résultent de l'application de la commande vectorielle de la MADA afin de régler simultanément la fréquence et la tension.

En vue de la modélisation la machine asynchrone à double alimentation qui est présenté dans le repère de Park, nous utiliserons dans tout ce qui va suivre un modèle continu équivalent

également dans le repère de Park [2], dans le but de simplifier l'analyse lors de l'étude du système complet de génération d'énergie.

L'onduleur de tension triphasé à modéliser est représenté à la figure (II.6).

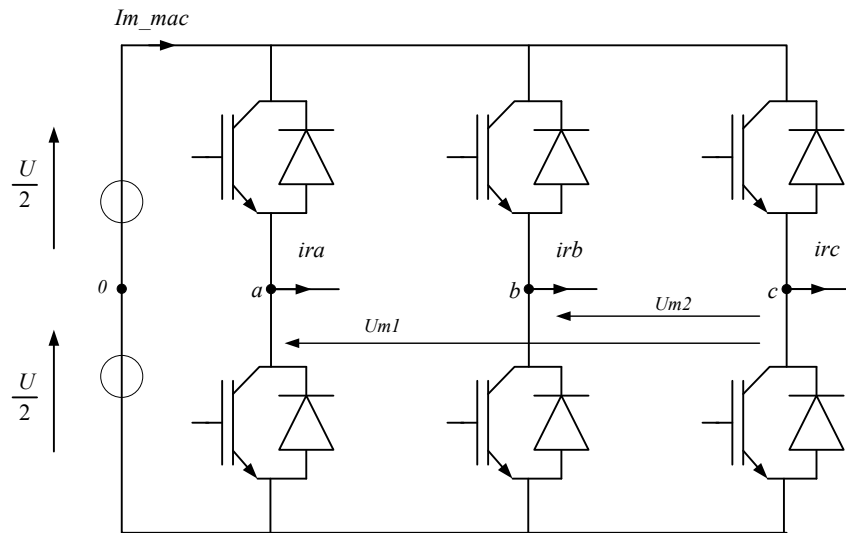


Figure II .6 convertisseur coté Rotor de la MADA a modélisé

La commande de ce convertisseur est obtenue par une modulation de largeur d'impulsion et qui détermine les deux niveaux de tension pour chaque tension modulée V_{rma} , cette dernière résulte d'une comparaison d'un signal triangulaire T qui s'appelle la porteuse d'une fréquence très élevée avec le signal de référence V_{ra} (généralement sinusoïdal) [2].

La figure (II.7) montre le principe de la MLI.

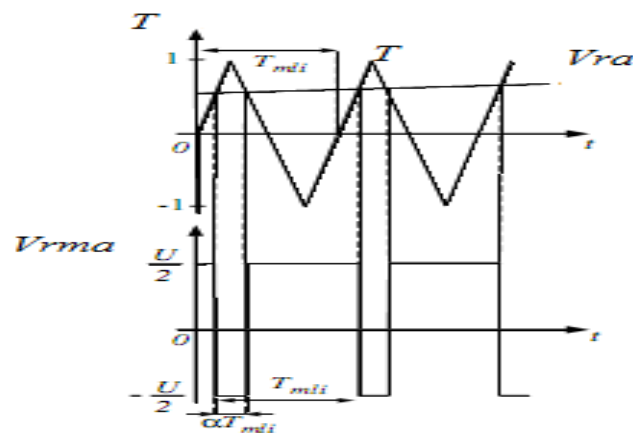


Figure II .7 principe de la MLI [2]

La valeur moyenne de la tension modulée sur une période MLI (T_{MLI}) est :

$$\bar{V}_{rma} = \frac{1}{T_{mli}} \int_0^{T_{mli}} (V_a - V_0) dt = \frac{1}{T_{mli}} \left[-\frac{U}{2} \alpha T_{mli} + \frac{U}{2} (1 - \alpha) T_{mli} \right] = \frac{U}{2} (1 - 2\alpha) \quad (\text{II.33})$$

Où: α : est le rapport cyclique

Du fait que T_{mli} est très petite la référence V_{ra} varie peu durant cette période et les deux premières intersections de la porteuse avec la référence nous donnent :

$$V_{ra} = 1 - 2\alpha \quad (\text{II.34})$$

En combinant les équations (II.30) et (II.31) on trouve:

$$\bar{V}_{rma} = \frac{U}{2} V_{ra} \quad (\text{II.35})$$

La même chose pour les deux autres phases, on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{rma} \\ \bar{V}_{rmb} \\ \bar{V}_{rmc} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

En appliquant le principe de la conservation de puissance on écrit :

$$U \cdot I_{m_mac} = [\bar{V}_{rma} \bar{V}_{rmb} \bar{V}_{rmc}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

En remplaçant les tensions moyennes par leurs valeurs on obtient:

$$I_{m_mac} = \frac{1}{2} [V_{ra} V_{rb} V_{rc}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Où : \bar{V}_{rma} , \bar{V}_{rmb} et \bar{V}_{rmc} représentent les tensions simples modulées par le convertisseur

I_{m_mac} : représente le courant modulé par le convertisseur

En appliquant la transformation de Park sur les tensions de référence et les tensions modulées on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{rmd} \\ V_{rmq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{rd_reg} \\ V_{rq_reg} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$I_{m_mac} = \frac{1}{2} [V_{rd_reg} V_{rq_reg}] \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Où :

V_{rmd}, V_{rmq} : représentent les tensions modulées dans le repère de Park.

V_{rd_reg}, V_{rq_reg} : Les tensions de réglage dans le repère de Park.

i_{rd}, i_{rq} : Les courants rotoriques dans le repère de Park.

U : La tension du bus continu

Les équations (II.39) et (II.40) qui décrivent le modèle continu équivalent du convertisseur et qui va être utilisé pour tout ce qui va suivre, on ne tient pas compte donc des fréquences de commutation des convertisseurs.

4.3.1 Contrôle du convertisseur

Le contrôle vectoriel de machine fixe des tensions de réglage que l'on appelle V_{rd_reg} et V_{rq_reg} à appliquer au rotor de la MADA pour qu'elle suive les consignes de puissances. la relation inverse du modèle continu équivalent du convertisseur pour une référence à un point milieu fictif de la tension du bus continu nous permet d'écrire [2] :

$$V_{rd_reg} = \frac{2}{U} V_{rd_ref} \quad (\text{II.41})$$

$$V_{rq_reg} = \frac{2}{U} V_{rq_ref} \quad (\text{II.42})$$

Avec : V_{rd_ref} et V_{rq_ref} sont les tensions de référence issues de la commande vectorielle.

5 Simulations

Le modèle de la machine ainsi que celui du convertisseur a été implanté dans Matlab Simulink afin de montrer et analyser les performances de la commande vectorielle à flux statorique orienté.

5.1 Condition de simulation

Les paramètres de la MADA sont cités dans l'annexe après le calcul des constantes des régulateurs on a appliqué des échelons comme des valeurs de références pour les puissances actives et réactives afin d'observer le comportement de sa régulation

5.2 Résultats obtenus

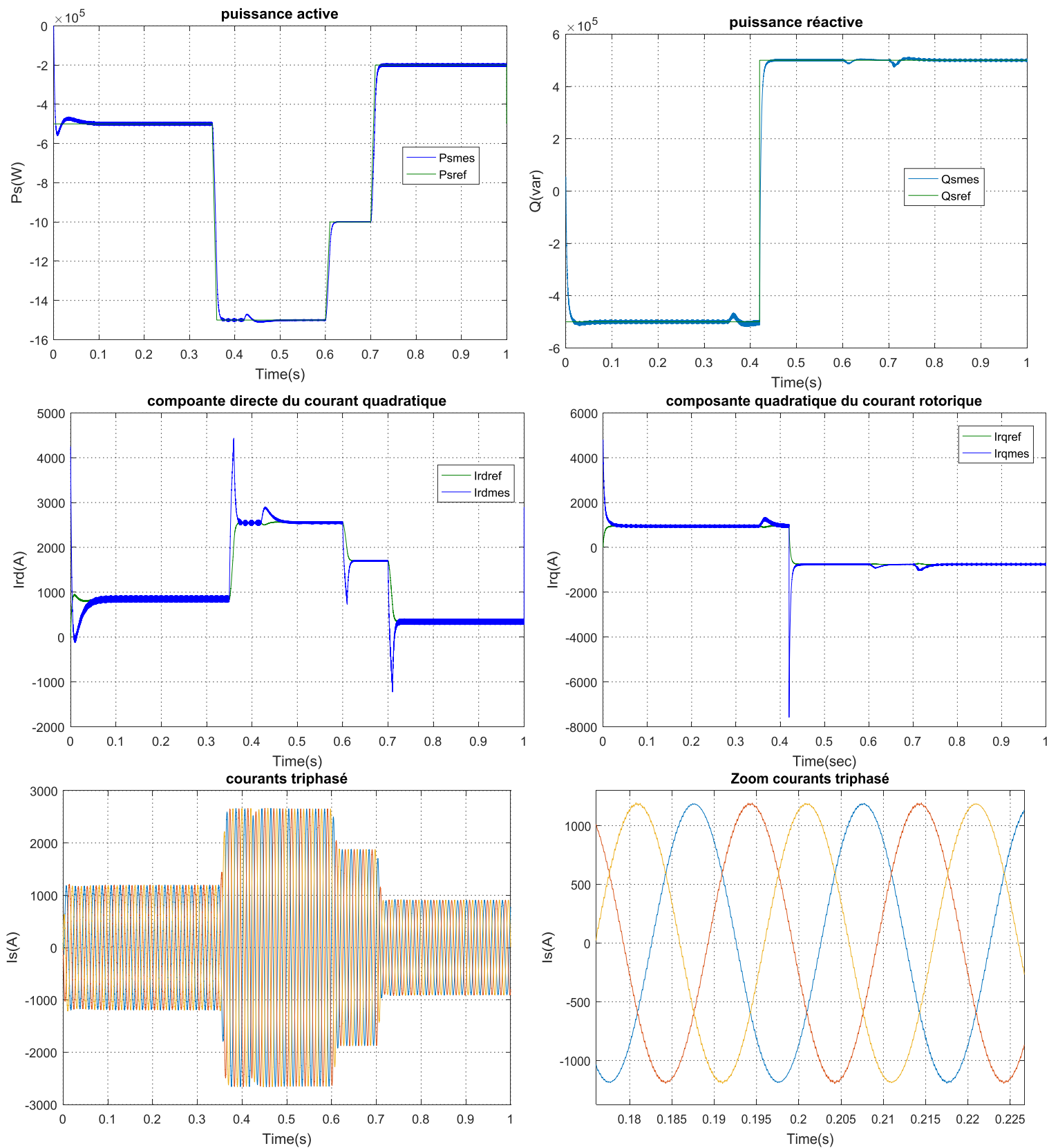


Figure II .8 Résultats de simulation de la commande indirecte de GADA

5.3 Interprétations

D'après ces résultats, nous remarquons que les puissances active et réactive suivent avec rapidité et précision la consigne imposée

Cependant, l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) est observé sur les résultats de la commande, car un échelon imposé à l'une des deux puissances active ou réactive, va induire de faibles oscillations sur l'autre.

Au instants 0 s, 0.35 s, 0.36s,0.6s,0.7 s et 0.71 s des échelons de consigne de -0.5 MW, -1.5 MW, -1 MW et -0.2 MW respectivement sont appliqués au niveau de la puissance active. La puissance active produite par la MADA suit fidèlement les consignes introduites.

Au niveau de la puissance réactive, la première consigne est appliquée à l'instant 0 s, elle vaut -5000 VAR. Ensuite, à l'instant $t=0.45$ s nous introduisons le deuxième échelon le consigne qui est égale à 5000 VAR. La puissance réactive suit avec précision et rapidité les consignes imposées.

Nous remarquons aussi, que les courants statoriques de la MADA sont sinusoïdaux mais de fréquence (50Hz).

6 Modèle complet du système de conversion éolienne

On adopte le modèle continu équivalent des convertisseurs représentés dans le repère de Park notamment la génératrice, le bus continu, la liaison au réseau contenant le deuxième convertisseur MLI.

La figure (II.8) présente un descriptif détaillé du système de conversion éolienne.

En regroupant toutes les parties qu'on a développé précédemment , afin de délivrer à la génératrice la puissance active de référence tout en maintenant une référence de puissance réactive nulle pour faire fonctionner à facteur de puissance unitaire et injecter une puissance de qualité.

Les signaux de commande du convertisseur coté rotor proviennent de l'application de la commande vectorielle de la génératrice dont le convertisseur coté réseau est chargé à régler la tension de l'étape continue pour assurer toujours l'alimentation du premier et quelque soit le sens de transit de puissance.

On travaille à facteur unitaire coté réseau pour cela on fixe une référence réactive égal à zéro.

C'est ces deux consignes qui vont nous servir à imposer les courants de référence transités au réseau

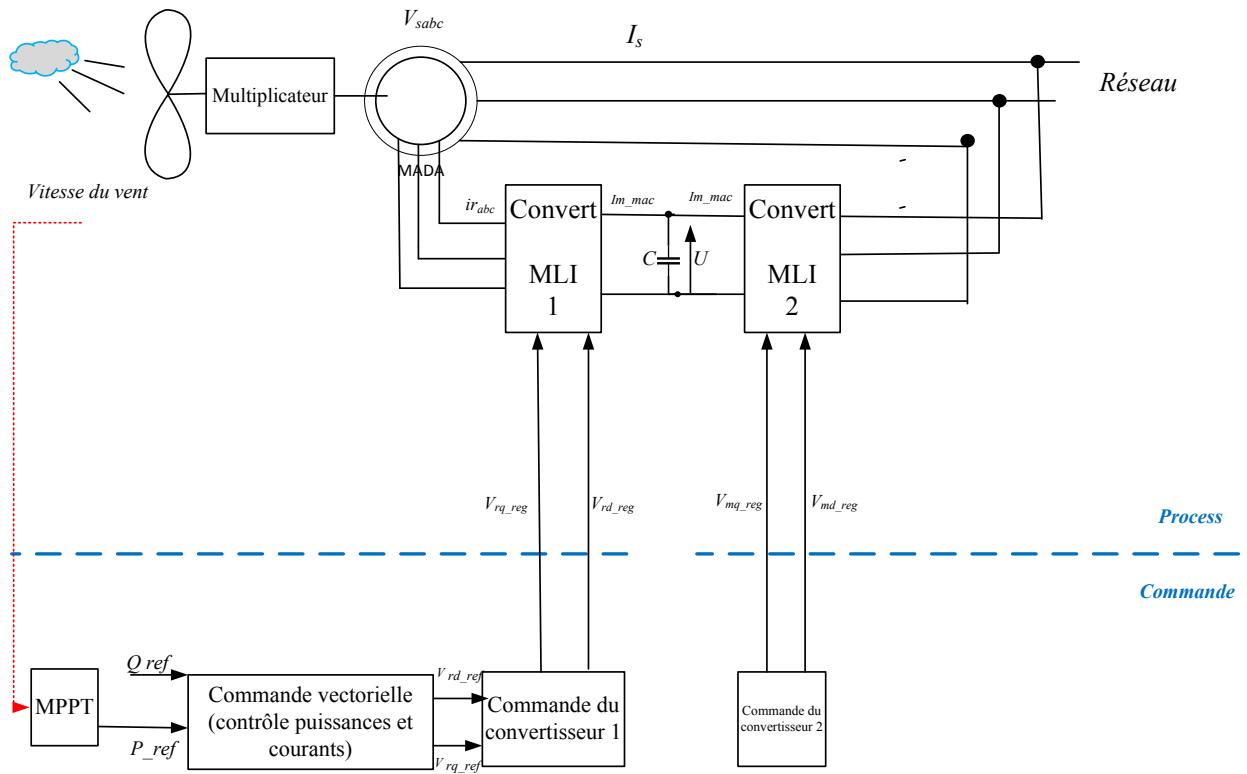


Figure II.9 dispositif de commande de la chaîne de conversion

6.1 Le convertisseur coté réseau

Le modèle du convertisseur coté réseau et sa commande sont identiques à celui du coté rotor de la MADA étudié précédemment, nous pouvons alors écrire :

$$\begin{bmatrix} V_{md} \\ V_{mq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{md_reg} \\ V_{mq_reg} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Où :

V_{md}, V_{mq} : Tensions modulées par le convertisseur coté réseau dans le repère de Park.

V_{md_reg}, V_{mq_reg} : Les tensions de réglage dans le repère de Park.

I_{m_res} : Le courant modulé par le convertisseur coté réseau.

Les tensions de réglage sont obtenues par les relations suivantes :

$$V_{md_reg} = \frac{2}{U} V_{md_ref} \quad (\text{II.45})$$

$$V_{mq_reg} = \frac{2}{U} V_{mq_ref} \quad (\text{II.46})$$

Avec : V_{md_ref} et V_{mq_ref} représentent les composantes directe et quadratique des tensions de références issues du contrôle de la liaison au réseau.

6.2 Le bus continu

En se basant sur la convention illustrée à la figure (II.8) et en intégrant le courant capacitif I_c on trouve la tension continue U par :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (\text{II.47})$$

Où :

$$I_c = I_{m_mac} - I_{m_res} \quad (\text{II.48})$$

On trouve :

$$U = \int \frac{dU}{dt} + U(t_0) \quad (\text{II.49})$$

Avec : $U(t_0)$ représente la valeur initiale de la tension continue.

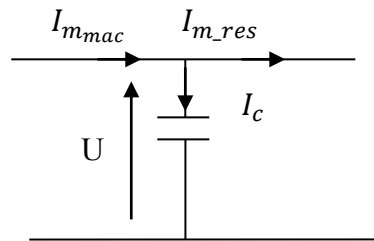


Figure II .10 le bus continu

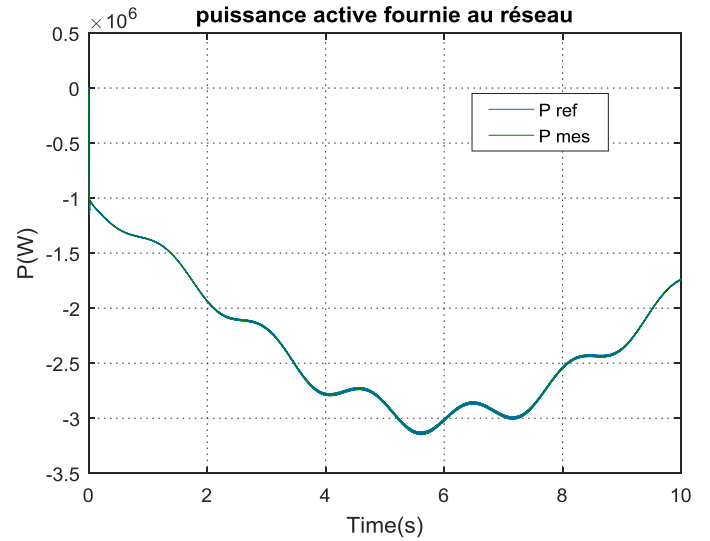
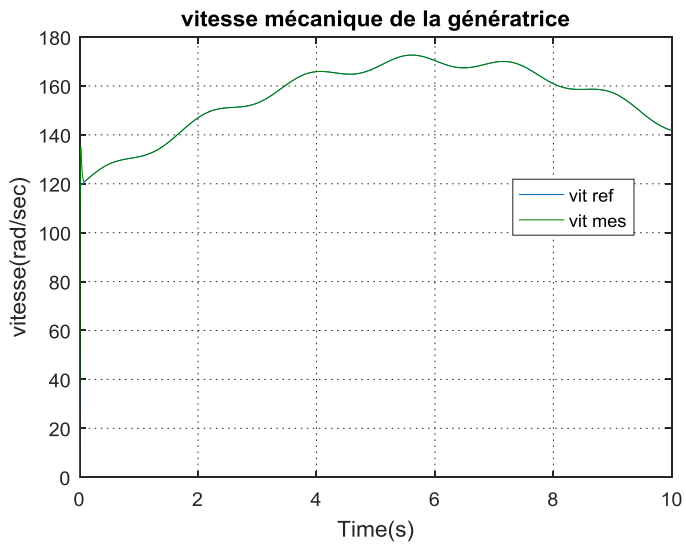
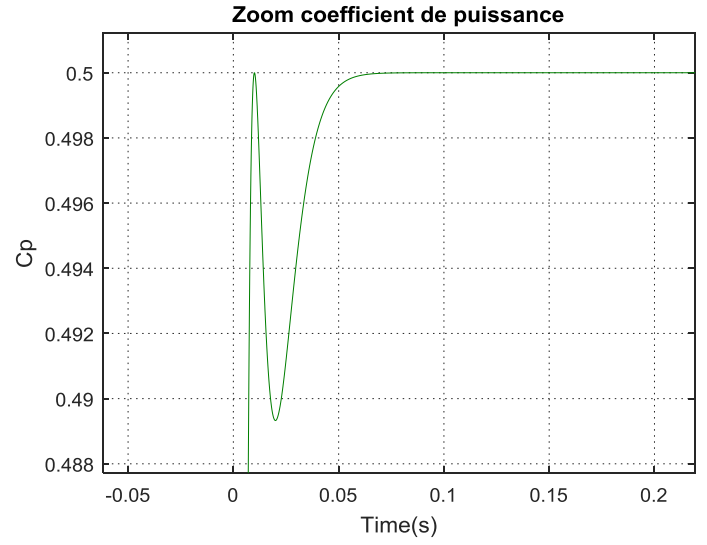
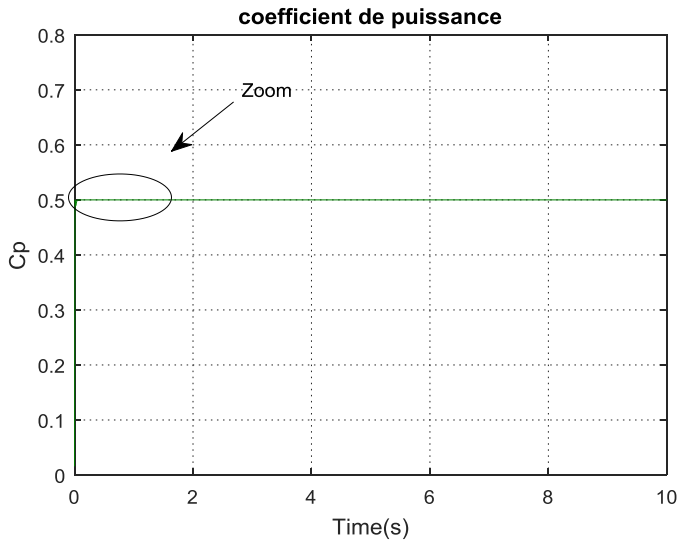
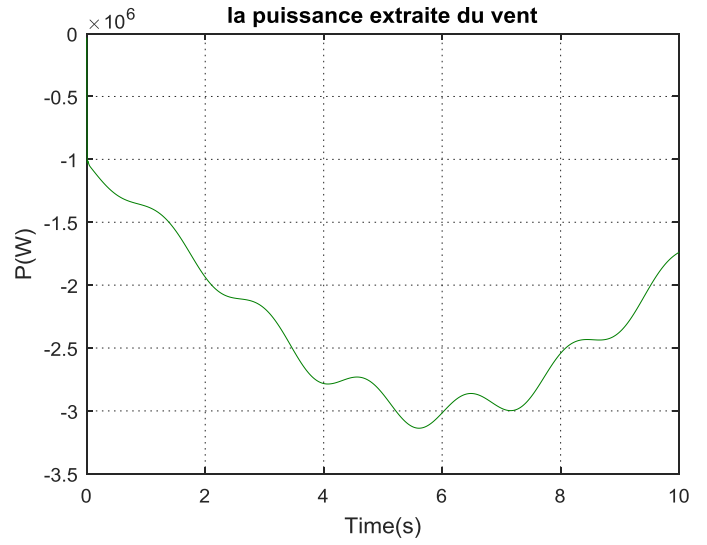
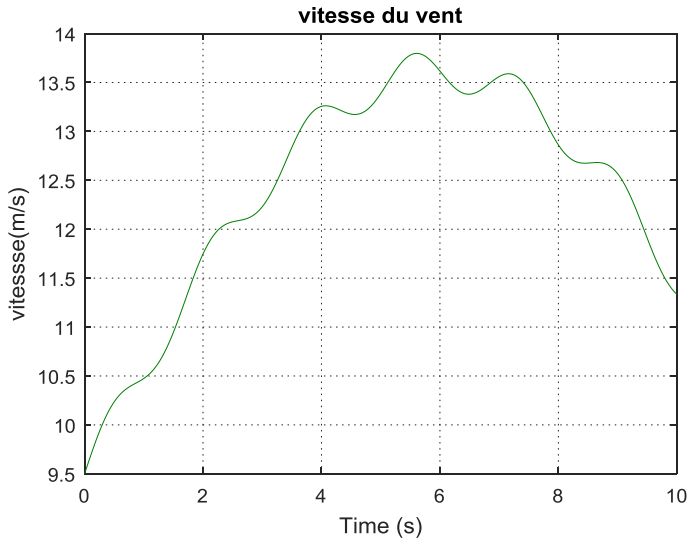
7 Simulation

Le modèle de la chaîne complète de conversion éolienne est établi dont la cascade est basée sur une machine asynchrone à double alimentation. Les résultats de simulation sont obtenus à l'aide du MATLAB Simulink

7.1 Conditions de la simulation

Le profil de vent appliqué est de 09.25m/s de vitesse moyenne et la MADA utilisée est celle étudiée précédemment avec les paramètres de la turbine sont cités à l'annexe.

7.2 Résultats obtenus



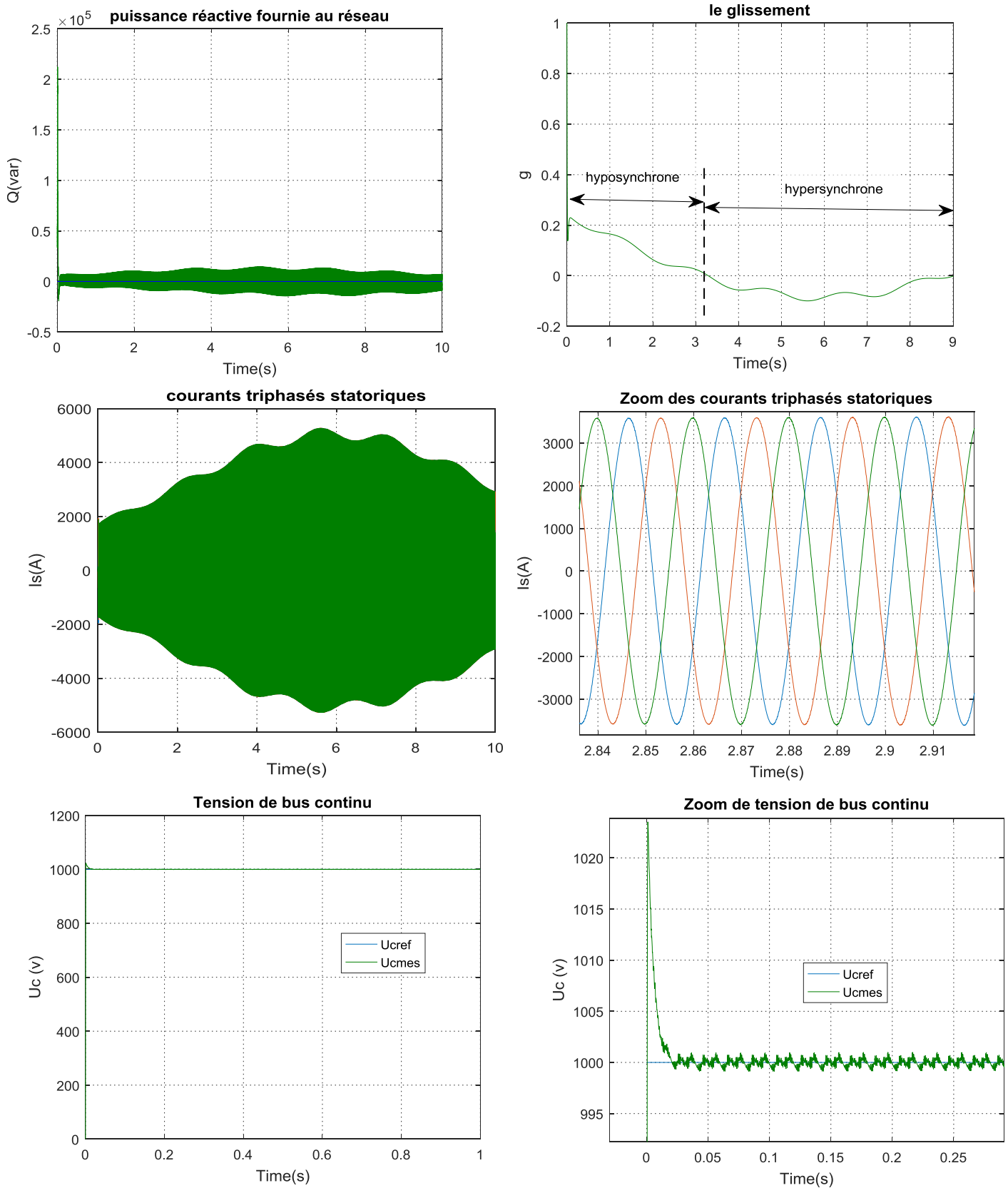


Figure II .11 résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne

7.3 Interprétations

La puissance produite par l'éolienne est fluctuante du fait du caractère du vent. Le coefficient de puissance C_p qui oscille autour d'une moyenne de 0.5 et essaye d'être gardé à cette valeur maximale, la vitesse mécanique de la génératrice suit toujours les variations du vent cette dernière montre que l'éolienne est entraînée d'extraire le maximum de puissance cette puissance qui est appliquée comme référence à la génératrice, comme indique la figure de la puissance fournie par le réseau, et cela constitue un intérêt majeur pour les éoliennes de ce genre (à vitesse variable). la puissance active essaye toujours de suivre leur référence qu'en a fixé à une valeur nulle, on remarque qu'il existe des ondulations dans cette dernière qui perturbent cette puissance à suivre nettement sa référence.

Les courants statoriques (ou du réseau) et les courants rotoriques se concentrent autour de leurs fréquences ils sont liés entre eux par le glissement de la machine.

8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les différentes parties de l'éolienne Simulé le Système aérogénérateur, en implantant le modèle mathématique de la chaîne éolienne sur le logiciel MATLAB/Simulink.

la MADA fonctionne en génératrice asynchrone synchronisée et le rotor est alimenté par des grandeurs continues. La puissance active fournie au réseau varie en fonction de la vitesse du vent et suit la puissance de référence cela justifie que la puissance injectée au réseau est celle récupérée par l'application de la stratégie M.P.P.T..

De ces considérations, il en ressort que la MADA offre l'avantage de fonctionner, en mode génératrice asynchrone, et de s'adapter aux variations de la vitesse du vent.

Toutefois, la bonne marche des éoliennes connectées au réseau peut être entravée par la qualité de la puissance générée, qui est de nature stochastique. Ce fait limite la participation de l'éolienne au service système. D'où le fonctionnement du générateur seul est pratiquement impossible, et pour palier à ce problème, l'intégration d'un système de stockage est indispensable.

L'application de la MADA dans une éolienne, associée au réseau, impose un système de lissage de la puissance échangée avec la source principale. Ce dernier fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

*Modélisation et Commande du système de
stockage inertiel*

1 Introduction

Dans le chapitre précédent on a représenté la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne et leur fonctionnement. Mais, la puissance fournie par l'aérogénérateur est variable, par contre le réseau doit recevoir une puissance lissée.

Pour cela plusieurs études ont été concentrées autour de régulation des puissances débitées sur le réseau, afin d'assurer l'équilibre production/consommation en exploitant l'idée de stockage d'énergie. [8]

L'objectif de ce chapitre est l'étude du système de stockage de type inertiel associé à la chaîne de conversion éolienne raccordée au réseau électrique; comme on a présenté dans le premier chapitre les systèmes de stockage en général, on s'intéresse particulièrement au système de stockage inertiel noté SISE (figure III.1) en détaillant le modèle mathématique de ce dernier, du convertisseur associé ainsi que leur commande.

Nous clôturons ce chapitre par présentation des résultats de simulation obtenus sous MATLAB Simulink.

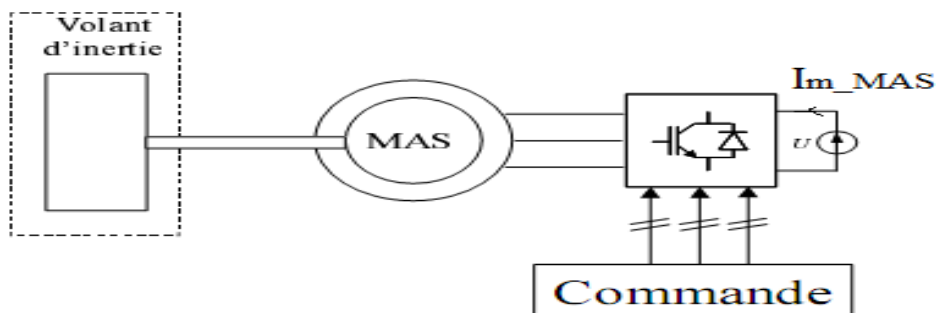


Figure III .1 Constitution du système de stockage inertiel SISE [2].

2 Modélisation

Le modèle du système inertiel du stockage d'énergie peut être décomposé en trois parties: Le volant d'inertie, la machine asynchrone et le convertisseur de puissance.

2.1 Le volant d'inertie

L'énergie cinétique emmagasinée par le volant se détermine comme suit [8]:

$$W_v = \frac{1}{2} J_v \cdot \Omega_v^2 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

W_v : L'énergie stockée (J)

J_v : Moment d'inertie du volant exprimé en (kg.m²)

Ω_v : vitesse angulaire de rotation du volant (rad/sec)

Le moment d'inertie du volant est un paramètre essentiel car il caractérise la capacité de stockage (ou restitution), pour cela on le détermine en fonction de la puissance stockée durant un temps voulu.

La puissance de stockage est exprimée en fonction de l'énergie par :

$$P_v = \frac{dW_v}{dt} \quad (\text{III.2})$$

P_v : La puissance stockée par le volant égale à la puissance nominale de la machine asynchrone couplée à ce volant (W).

Comme on peut exprimer la variation d'énergie stockée durant un temps par :

$$\frac{dW_v}{dt} = \frac{1}{2} J_v \cdot \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad (\text{III.3})$$

De (III.2) et (III.3) on peut écrire:

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \cdot \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad (\text{III.4})$$

Supposant qu'on a des petites variations l'équation (III.4) devient :

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \cdot \frac{\Delta\Omega_v^2}{\Delta t} \quad (\text{III.5})$$

$\Delta\Omega_v$: Petite variation de vitesse de rotation du volant autour d'un point de fonctionnement exprimée en (rad/s).

Δt : Petite variation de temps (s).

De (III.5) l'inertie vaut :

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Delta\Omega_v^2} \quad (\text{III.6})$$

Où :

$$\Delta\Omega_v^2 = \Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2 \quad (\text{III.7})$$

Remplaçant (III.7) dans (III.6) l'inertie vaut :

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2} \quad (\text{III.8})$$

L'équation (III.1) met en évidence l'intérêt de fonctionner à très haute vitesse, car l'énergie est proportionnelle au carré de la vitesse.

En analysant l'allure de puissance et du couple en fonction de la vitesse de rotation d'une machine asynchrone (couplée au volant) on peut déterminer la zone de fonctionnement utile qui nous convient.

D'après la figure (III.2) on constate que le couple produit par la machine nous donne une puissance proportionnelle à la vitesse de rotation si cette dernière est comprise entre zéro et la vitesse nominale ; en arrivant à des vitesses supérieures à la vitesse nominale, la puissance devient proportionnelle au carré de la vitesse (elle est maximale) à la différence du couple qui tend à diminuer de manière à garder le produit (vitesse, couple) constant.

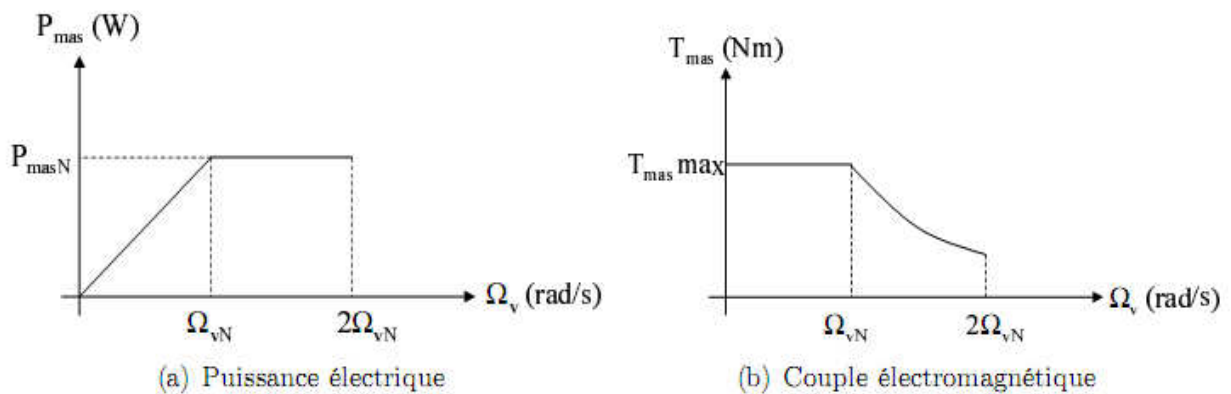


Figure III .2 Allures de puissance et du couple en fonction de la vitesse de rotation d'une MAS [8].

Donc, si l'on souhaite disposer de la puissance nominale de la machine, il est indispensable de l'utiliser au-delà de sa vitesse nominale. On suppose que l'on puisse monter jusqu'au double de la vitesse nominale, ce qui nous laisse considérer la vitesse nominale comme étant la limite basse du stockage inertiel et le double de celle-ci comme étant la limite haute. Le stockage inertiel avec machine asynchrone sera donc utilisé dans la plage de vitesse comprise entre la vitesse nominale et le double de celle-ci afin de disposer de la puissance nominale quelque soit la vitesse [2].

2.2 La machine asynchrone

2.2.1 Equations électriques dans le repère (d,q)

On utilise le modèle de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park pour les mêmes raisons que pour la MADA étudiés au chapitre précédent [7].

Le modèle de la MAS sous forme d'équations d'état dans un référentiel lié au champ tournant peut s'écrire comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r_{MAS}}{L_r_{MAS}} (\omega_s - P \cdot \Omega_v) & \frac{M \cdot R_r_{MAS}}{L_r_{MAS}} & 0 & 0 \\ -(\omega_s - P \cdot \Omega_v) & -\frac{R_r_{MAS}}{L_r_{MAS}} & 0 & \frac{M \cdot R_r_{MAS}}{L_r_{MAS}} \\ \frac{M \cdot R_r_{MAS}}{\sigma \cdot L_s_{MAS} \cdot L_r_{MAS}^2} & \frac{M \cdot P \cdot \Omega_v}{\sigma \cdot L_s_{MAS} \cdot L_r_{MAS}} & -\frac{R_{sr}}{\sigma \cdot L_s_{MAS}} & \omega_s \\ \frac{M \cdot P \cdot \Omega_v}{\sigma \cdot L_s_{MAS} \cdot L_r_{MAS}} & \frac{M \cdot R_r_{MAS}}{\sigma \cdot L_s_{MAS} \cdot L_r_{MAS}^2} & -\omega_s & \frac{R_{sr}}{\sigma \cdot L_s_{MAS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

Avec :

L_{s_MAS} : Inductance propre cyclique statorique (H).

L_{r_MAS} : Inductance propre cyclique rotorique (H).

M : inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor (H).

σ : Coefficient de dispersion égale à : $1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$

R_{s_MAS} : Résistance d'une phase statorique (Ω).

R_{r_MAS} : Résistance d'une phase rotorique (Ω).

Le terme $R_{sr} = R_{s_MAS} + \frac{M^2}{L_r^2_{MAS}} \cdot R_{r_MAS}$

ϕ_{rd} : Composante directe du flux rotorique totalisé (Web).

ϕ_{rq} : Composante quadratique du flux rotorique totalisé (Web).

i_{sd} : Composante directe du courant statorique (A).

i_{sq} : Composante quadratique du courant statorique (A).

v_{sd} : Composante directe de la tension statorique (V).

v_{sq} : Composante quadratique de la tension statorique (V).

P : le nombre de paires de pôles de la MAS.

ω_s : Pulsation du champ dans le repère statorique (rad/s).

Ω_v : vitesse mécanique de l'arbre (rad/s).

Le couple électromagnétique de la machine est obtenu par :

$$T_{em_MAS} = \frac{P \cdot M}{L_r_{MAS}} (\phi_{rd} \cdot i_{sq} - \phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (III.10)$$

2.2.2 Equation mécanique de la MAS

L'équation mécanique est donnée par :

$$J_v \cdot \frac{d\Omega_v}{dt} = T_{em_MAS} - f_v \cdot \Omega_v \quad (\text{III.11})$$

Avec :

f_v : Le coefficient du frottement visqueux $\text{kg.m}^2/\text{s}$.

2.2.3 Contrôle vectoriel de la machine asynchrone [2] [6] [7]

Pour déterminer la commande (tensions de référence à appliquer au convertisseur) de la machine asynchrone, on opte le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté parce que les équations sont plus simples par rapport au contrôle à flux statorique ou à flux d'entrefer orienté [8].

La position du référentiel est obtenue afin d'annuler la composante quadratique du flux rotorique donc faire coïncider le vecteur flux rotorique avec l'axe 'd' du repère de Park[8].

On pose :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \phi_r \\ \phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Ainsi :} \quad \begin{cases} \omega_r = 0 \\ \omega_s = \omega \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Le système d'équations (III.9) devient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_r \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r_MAS}{L_r_MAS} & \frac{M.R_r_MAS}{L_r_MAS} & 0 \\ \frac{M.R_r_MAS}{\sigma.L_s_MAS.L_r_MAS} & -\frac{R_{sr}}{\sigma.L_s_MAS} & \omega \\ \frac{M.P.\Omega_v}{\sigma.L_s_MAS.L_r_MAS} & -\omega & \frac{R_{sr}}{\sigma.L_s_MAS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_r \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma.L_s_MAS} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma.L_s_MAS} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Et le couple électromagnétique devient :

$$T_{em_MAS} = \frac{P.M}{L_r_MAS} (\phi_r \cdot i_{sq}) \quad (\text{III.15})$$

Posant les deux tensions E_d et E_q telles que :

$$\begin{cases} E_d = v_{sd} + \frac{M.R_r_MAS}{L_r_MAS} \cdot \phi_{rd} + \sigma.L_s_MAS \cdot \omega \cdot i_{sq} \\ E_q = v_{sq} - \frac{M.P.\Omega_v}{L_r_MAS} \cdot \phi_{rd} - \sigma.L_s_MAS \cdot \omega \cdot i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

D'après (III.14), (III.16) on obtient:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{1}{\sigma.L_{s_MAS}} (E_d - R_{sr} \cdot i_{sd}) \\ \frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{1}{\sigma.L_{s_MAS}} (E_q - R_{sr} \cdot i_{sq}) \\ \frac{d}{dt} \phi_r = -\frac{R_{r_MAS}}{L_{r_MAS}} \cdot \phi_r + \frac{M.R_{r_MAS}}{L_{r_MAS}} \cdot i_{sd} \end{cases} \quad (III.17)$$

En inversant les deux premières équations de (III.17), nous obtenons les tensions de références E_{d_ref} et E_{q_ref} comme suit :

$$\begin{cases} E_{d_ref} = PI_i(i_{sd_ref} - i_{sd}) \\ E_{q_ref} = PI_i(i_{sq_ref} - i_{sq}) \end{cases} \quad (III.18)$$

PI_i est le correcteur des boucles de courant .il est de type proportionnel intégral et est identique pour les deux axes de Park.

Les tensions E_{d_ref} et E_{q_ref} sont les tensions de référence non compensées parce qu'elles contiennent les termes de couplage entre les axes « d » et « q ».

La mesure du flux est difficile mais on peut l'estimer en mesurant le courant direct par la fonction de transfert suivante :

$$\phi_{r_est}(s) = \frac{M}{1 + \frac{L_{r_MAS}}{R_{r_MAS}} \cdot s} \cdot i_{sd_mes} \quad (III.19)$$

Avec : S est l'opérateur de Laplace.

Le flux de référence est déterminé à partir de la loi de défluxage de la MAS qui nous donne un flux nominale pour des vitesses de rotation inférieurs à la vitesse de base, et pour obtenir des vitesses supérieurs le flux est réduit conformément à la non linéarité suivante[2] :

$$\phi_{r_ref}(\Omega_v) = \begin{cases} \phi_m & \text{si } |\Omega_v| \leq \Omega_{vn} \\ \phi_m \cdot \frac{\Omega_{vn}}{|\Omega_v|} & \text{si } |\Omega_v| > \Omega_{vn} \end{cases} \quad (III.20)$$

Avec : Ω_v : la vitesse nominale de la MAS (rad/s).

$$\phi_m = \frac{L_{r_MAS}}{M} \cdot \phi_{sn} \quad (III.22)$$

ϕ_m : est le flux rotorique nominal (Web).

ϕ_{sn} : est le flux statorique nominal (Web).

$$\text{Où : } \phi_{sn} = \sqrt{3} \frac{v_s}{\omega_b} \quad (\text{III.23})$$

Avec : v_s : la valeur efficace de la tension simple statorique (V).

ω_b : la pulsation du réseau égale à 314.16 rad/s.

A partir de la troisième équation du (III.17) on écrit :

$$i_{sd_ref} = PI_\phi(\phi_{r_ref} - \phi_{r_est}) \quad (\text{III.24})$$

On souhaite contrôler la puissance de la machine asynchrone couplée au volant d'inertie, pour cela à partir d'une puissance de référence qu'on veut stocker (ou restituer) notée P_{v_ref} et une mesure de la vitesse de rotation du volant, le couple électromagnétique de référence de la MAS peut être calculé par :

$$T_{em_MAS_ref} = \frac{P_{v_ref}}{\Omega_v} \quad (\text{III.25})$$

Le courant d'axe 'd' est régulé suivant une régulation du flux et le courant d'axe 'q' est régulé suivant la référence du couple électromagnétique.

On peut déterminer les références pour cette commande comme suite :

$$i_{sq_ref} = \frac{T_{em_MAS_ref} \cdot L_{r_MAS}}{P \cdot M \cdot \phi_{rd_ref}} \quad (\text{III.26})$$

On estime la pulsation statorique par la relation suivante [2] :

$$\omega = P \cdot \Omega_v + \frac{M \cdot R_r_MAS}{L_r_MAS} \cdot \frac{i_{sq_ref}}{\phi_{rd_ref}} \quad (\text{III.27})$$

Il reste maintenant à déterminer les tensions de référence v_{sd_ref} et v_{sq_ref} pour déterminer les signaux de commande appliqués au convertisseur.

A partir des équations (III.16) on écrit :

$$v_{sd_ref} = E_{d_ref} - \frac{M \cdot R_r_MAS}{L_r_MAS^2} \cdot \phi_{r_ref} - \sigma \cdot L_{s_MAS} \cdot \omega \cdot i_{sq_ref} \quad (\text{III.28})$$

$$v_{sq_ref} = E_{q_ref} + \frac{M \cdot P \cdot \Omega_v}{L_r_MAS} \cdot \phi_{r_ref} + \sigma \cdot L_{s_MAS} \cdot \omega \cdot i_{sd_ref} \quad (\text{III.29})$$

2.3 Le convertisseur

On adopte le modèle continu équivalent du convertisseur représenté dans le repère de Park pour des raisons de simplicité (déjà citées auparavant); il est identique à celui étudié au chapitre précédent

Nous définissons les tensions simples modulées par le convertisseur dans le repère de Park et appliquées au stator de la MAS par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \cdot \begin{bmatrix} V_{d_reg} \\ V_{q_reg} \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

Avec :

V_{d_reg} et V_{q_reg} Représentent les tensions de réglage du convertisseur dans le repère de Park.

U représente la tension continue alimentant le convertisseur associé à la MAS.

Ainsi le courant modulé par le convertisseur est donné par :

$$I_{m_MAS} = \frac{1}{2} \cdot [V_{d_reg} \cdot V_{q_reg}] \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

Où :

i_{sd} et i_{sq} sont les composantes directe et quadratique du courant statorique

La commande du convertisseur associé à la MAS est déduite en inversant le système d'équation (III.20) et les tensions de réglage valent :

$$V_{d_reg} = \frac{2}{U} \cdot v_{sd_ref} \quad (\text{III.32})$$

$$V_{q_reg} = \frac{2}{U} \cdot v_{sq_ref} \quad (\text{III.33})$$

Avec :

v_{sd_ref} et v_{sq_ref} Représentent les composantes directe et quadratique des tensions de références issues de la commande vectorielle de la MAS.

La structure et le principe de la commande du système de stockage inertiel est résumé par la figure (III.3).

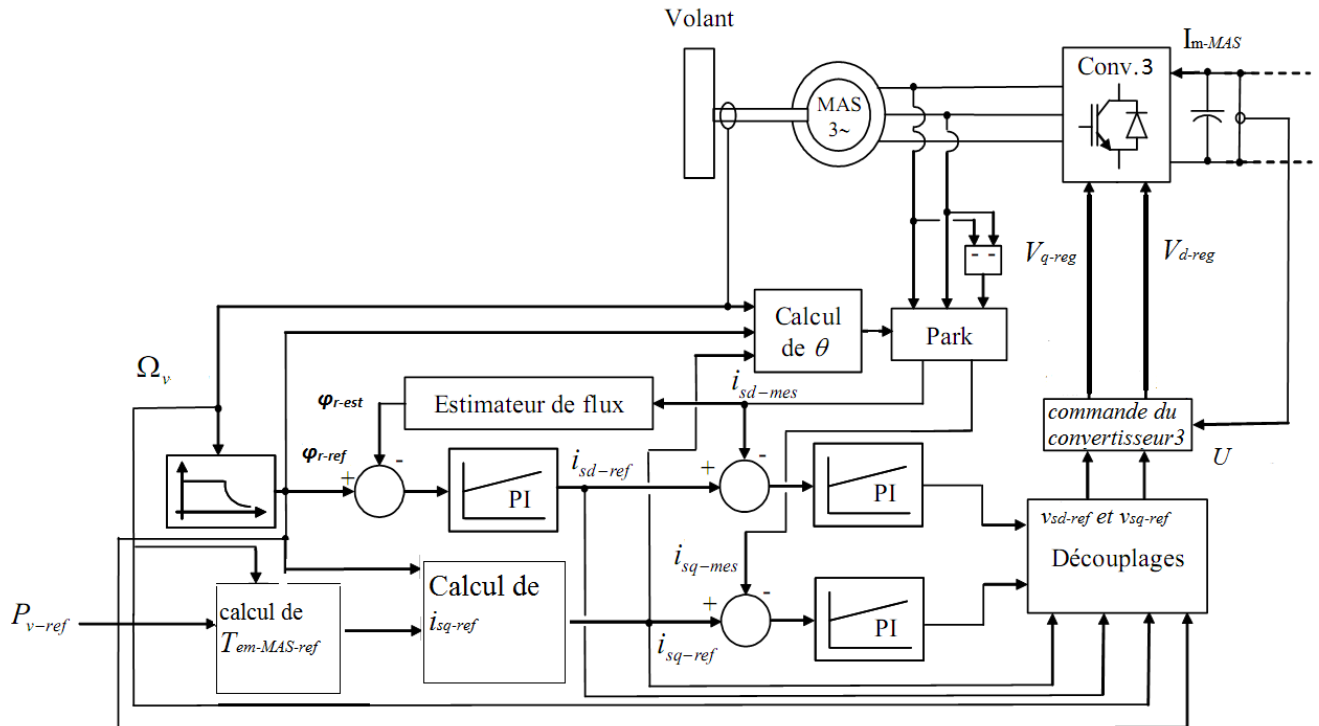
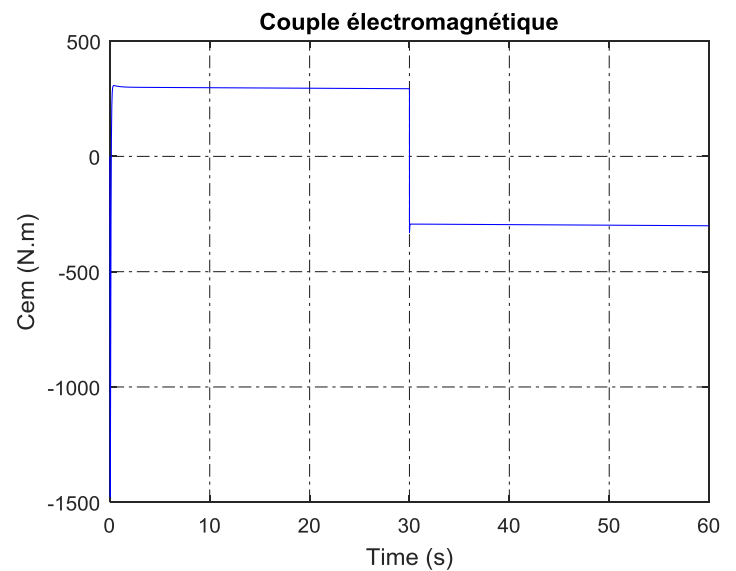
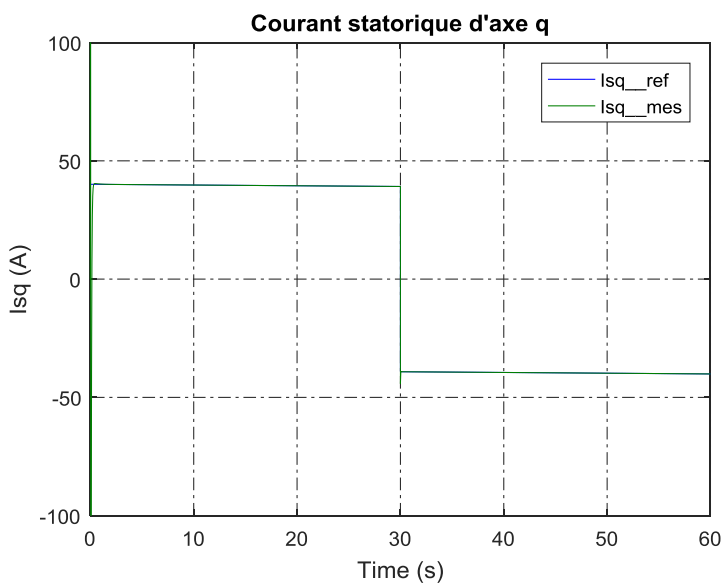
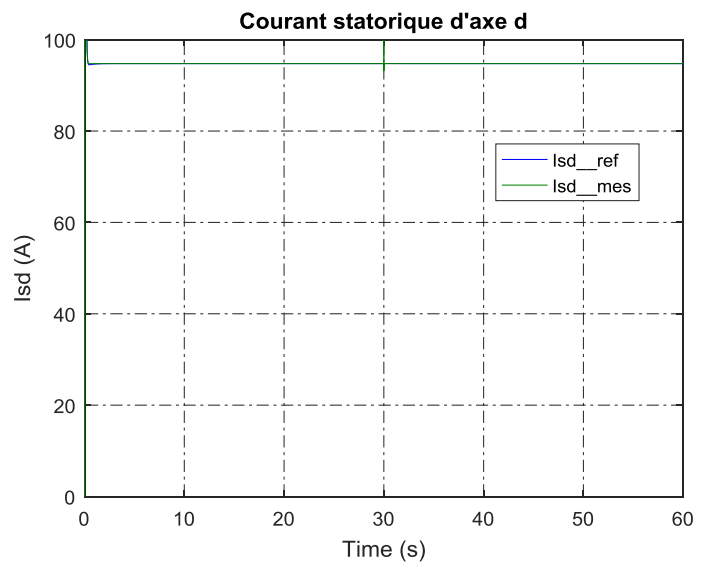
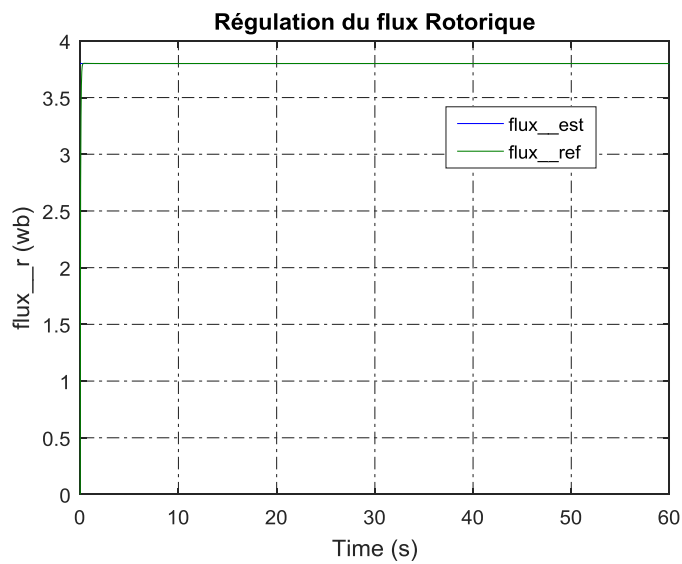
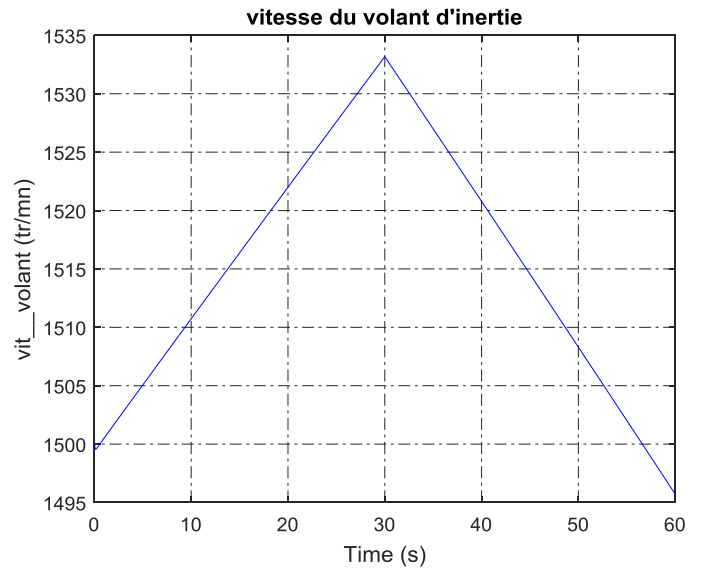
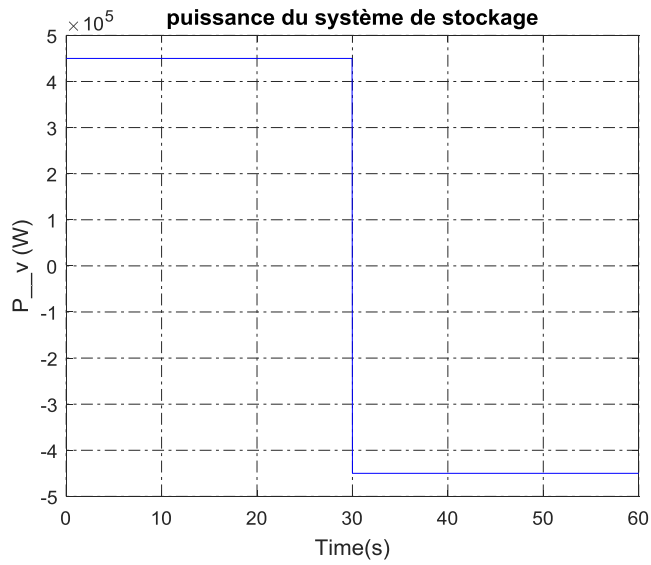


Figure III.3 structure de la commande du système de stockage inertiel [2] [5]

3 Simulation

Le modèle de la MAS, de sa commande vectorielle, de son accouplement mécanique avec le volant d'inertie ainsi que le convertisseur d'électronique de puissance a été implanté sous MATLAB Simulink afin de simuler le comportement du système de stockage en contrôlant la puissance stockée.

3.1 Résultats obtenus



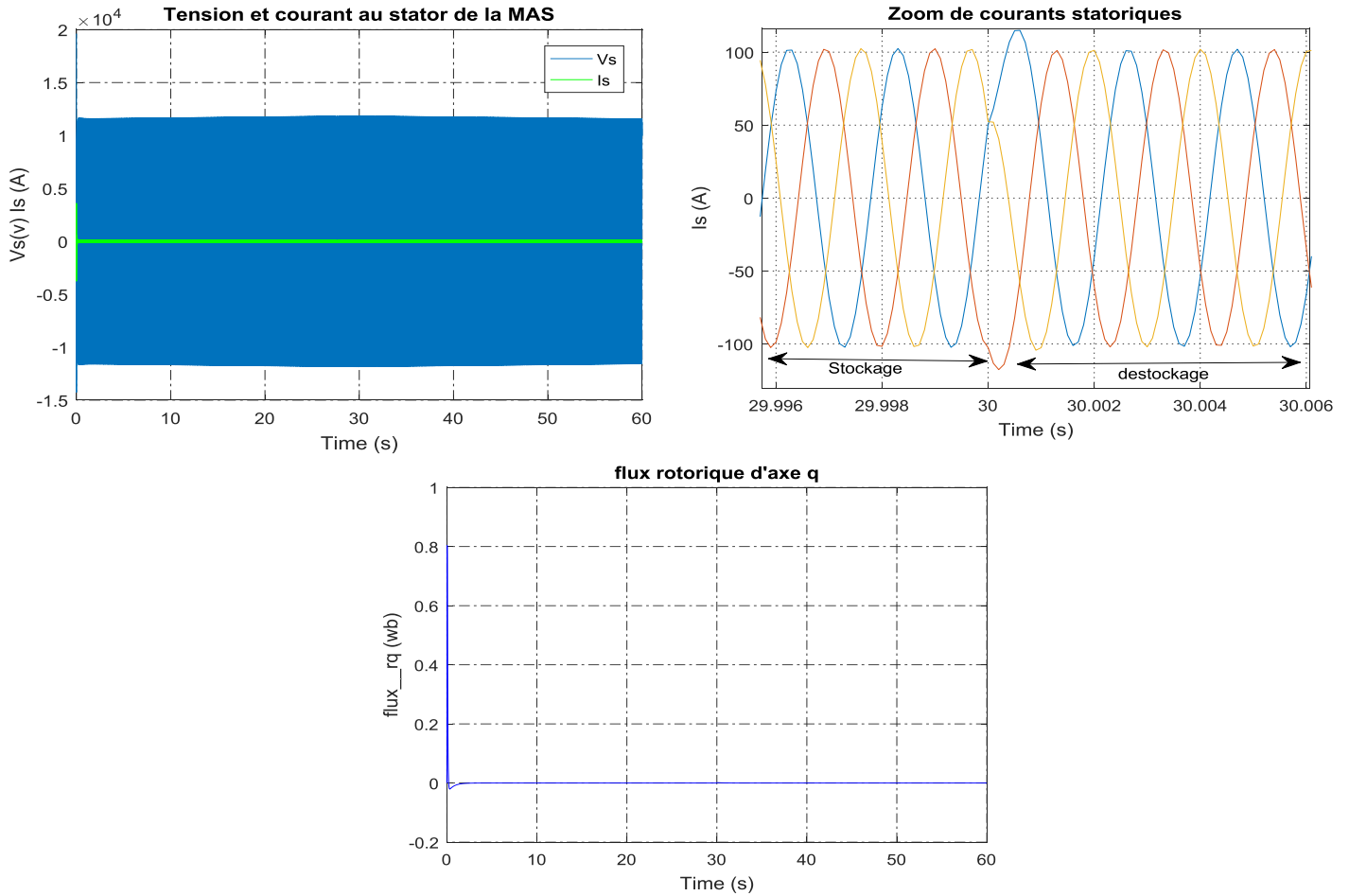


Figure III .4 résultats de simulation de la chaîne de stockage

3.2 Interprétations

Suivant l'allure de la puissance de référence qu'on a imposé et celle de vitesse, on remarque que pendant les premiers 30 seconds la puissance vaut +450kw, et la vitesse de rotation du volant croit à partir de 1500tr/mn, ce qui signifie que la machine fonctionne en moteur et notre SISE va stocker de l'énergie.

Et pour les 30 seconds qui restent, la puissance de référence vaut -450kw, et la vitesse de rotation du volant décroît, ce qui signifie que la MAS fonctionne en génératrice et le SISE va restituer de l'énergie

Les allures de courants et flux montrent un bon suivi des consignes et une bonne dynamique, ce qui rend le fonctionnement de SISE dans des bonnes conditions.

Suivant la forme du courant I_{sd} et celle du flux φ_{rd} on remarque que le courant est l'image du flux. L'allure du courant d'axe quadratique est influencée par la variation de vitesse qui a introduit une variation du couple électromagnétique de la MAS, le signe du courant d'axe quadratique suit le signe

du couple électromagnétique, ce dernier diminue lorsque la vitesse croît, il est négatif dans le fonctionnement génératrice de la MAS et positif pendant le fonctionnement moteur.

L'allure des courants statorique justifie les deux fonctionnements de la MAS .

Et pour l'allure du flux rotorique quadratique, elle nous justifie le principe de la commande vectorielle

4 Association de la chaîne de conversion éolienne au système SISE

Nous considérons le système inertiel de stockage d'énergie associé à la chaîne de conversion éolienne étudiée au chapitre 2 dont la connexion du SISE est assurée par le biais du bus continu des convertisseurs électroniques de puissance comme le montre la figure III.5. où on peut voir le schéma d'une éolienne à vitesse variable avec machine asynchrone doublement alimentée et équipée d'un SISE dans le but multiple d'extraire le maximum de puissance (MPPT) et la réguler avant d'avoir fournie au réseau.

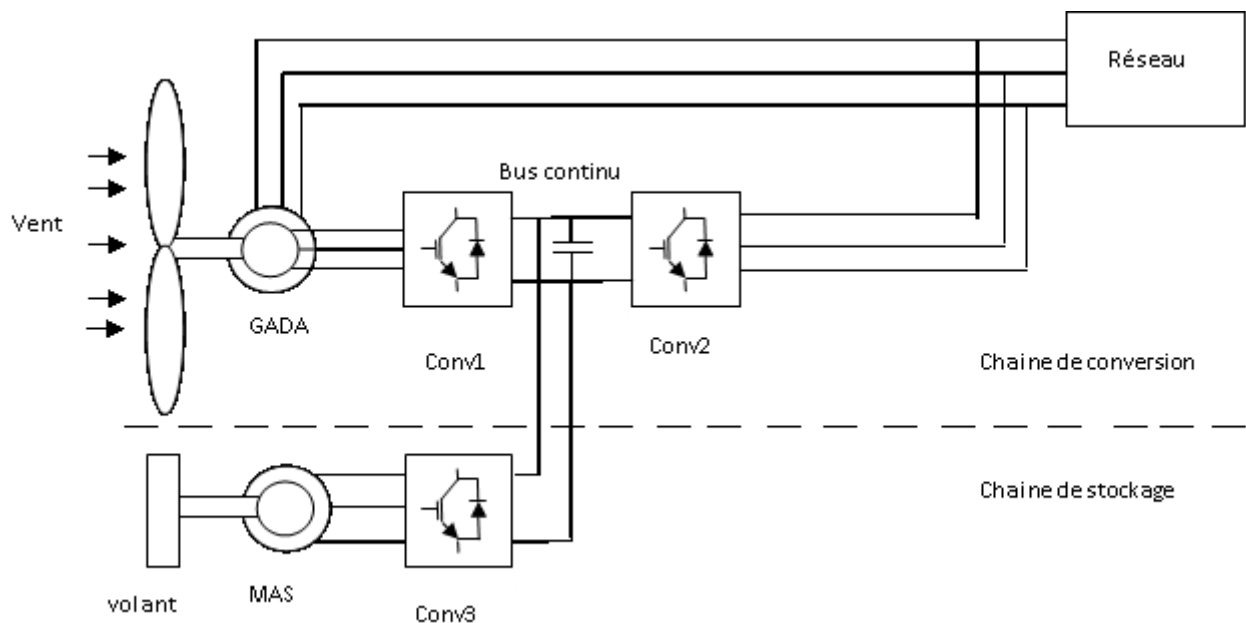


Figure III .5 chaîne de conversion éolienne associée au SISE

4.1 Modèle du bus continu

Comme il est montré à la figure (III.6), Le couplage du générateur éolien au système de stockage est fait par l'intermédiaire d'un bus continu où sont connectés tous les bus continus des convertisseurs électroniques de puissance. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur.

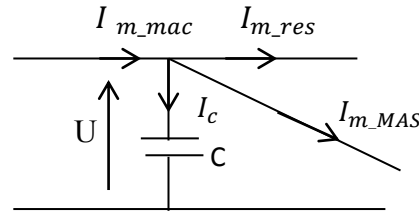


Figure III .6 le bus continu

A partir de la figure III.4 la loi des nœuds nous permet d'écrire :

$$I_c = I_{m_mac} - I_{m_res} - I_{m_MAS} \quad (\text{III.34})$$

En intégrant le courant capacitif I_c on trouve la tension continue U par :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (\text{III.35})$$

On trouve :

$$U = \int \frac{dU}{dt} + U(t_0) \quad (\text{III.36})$$

Avec : $U(t_0)$ est la valeur initiale de la tension continue.

4.2 Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien

Connaissant la puissance débitée par le générateur éolien et la puissance (constante) de référence à injecter au réseau, on peut déterminer la puissance de référence à appliquer au SISE conformément à l'expression suivante [3] :

$$P_{v_ref} = P_{res_ref} - P_{eol} \quad (\text{III.37})$$

Le modèle et le dispositif de commande du système global étudié dans cette partie est représenté à la figure (III.7).

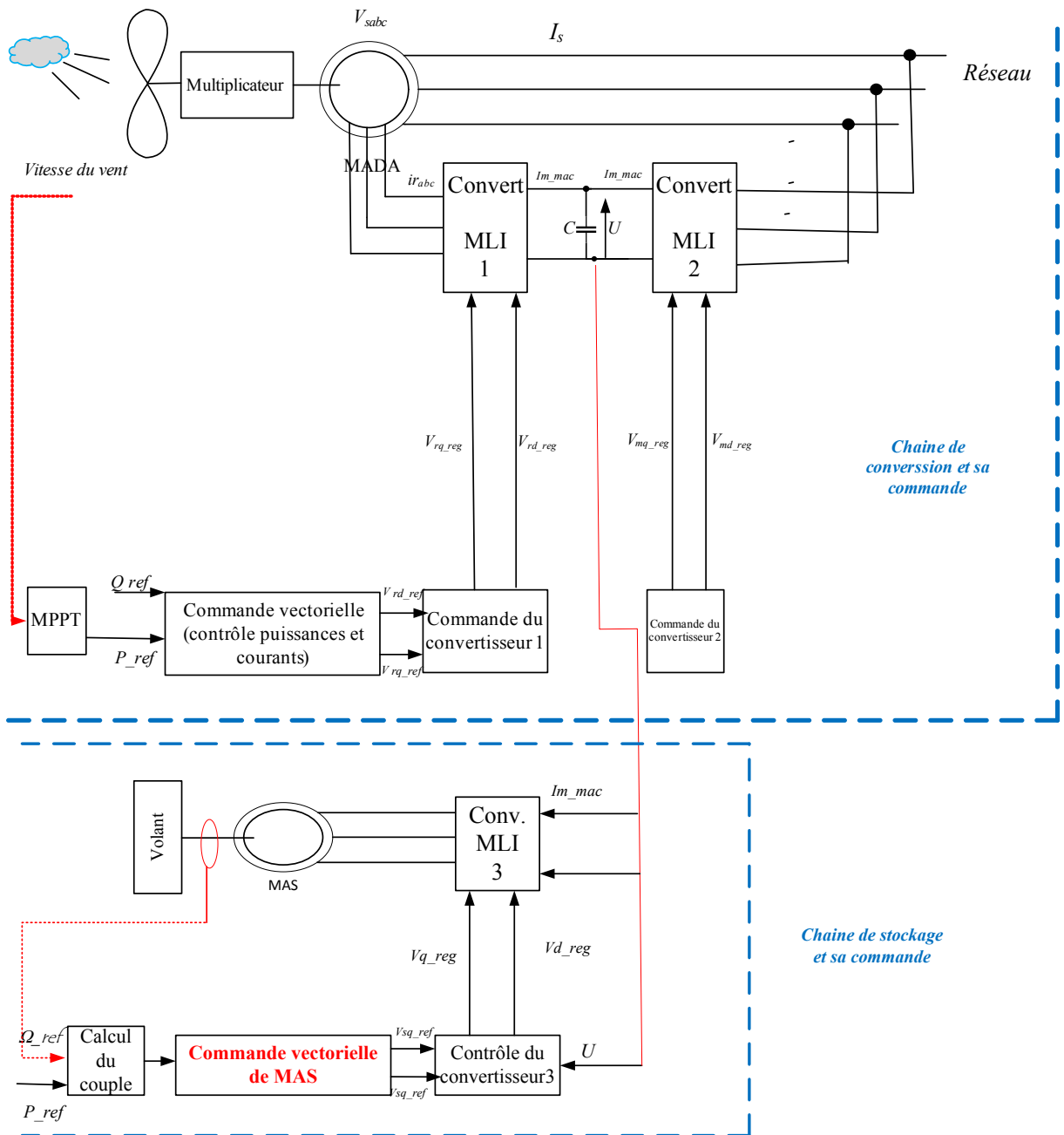


Figure III .7 dispositif de commande du système global étudié

Le contrôle de la puissance de SISE à stocker de l'énergie en cas de surplus de puissance ($P_{v_ref} > 0$) qui se traduit par un fonctionnement de la MAS en moteur et à restituer l'énergie en cas de déficit ($P_{v_ref} < 0$) qui se traduit par le fonctionnement de la MAS en génératrice. la figure III.8, présente le principe à citer.

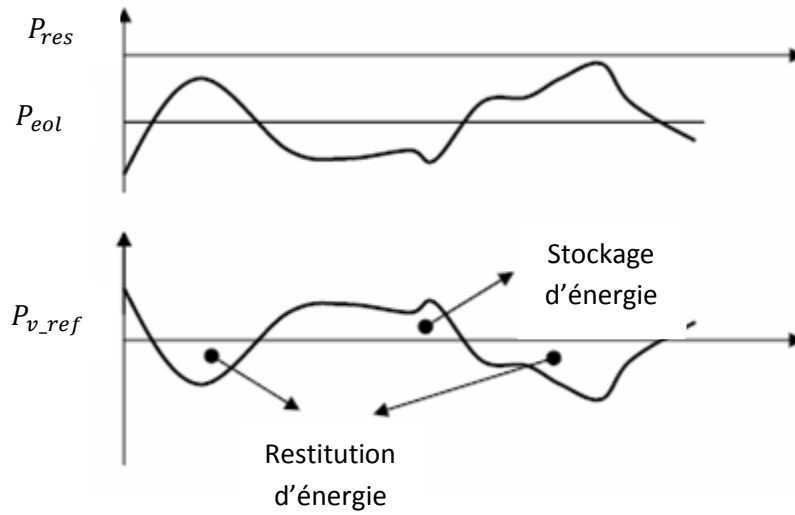
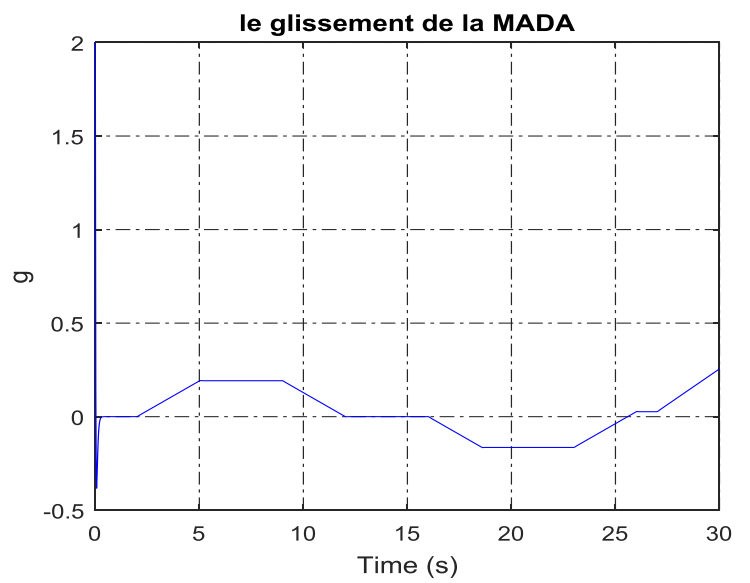
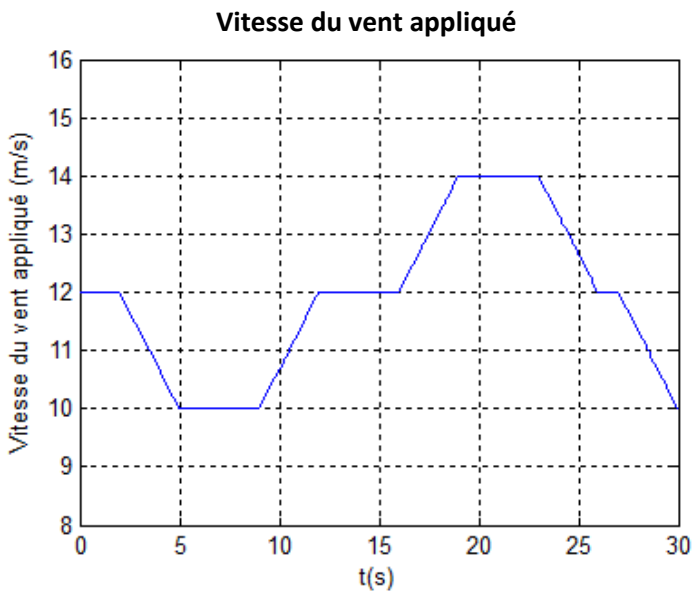
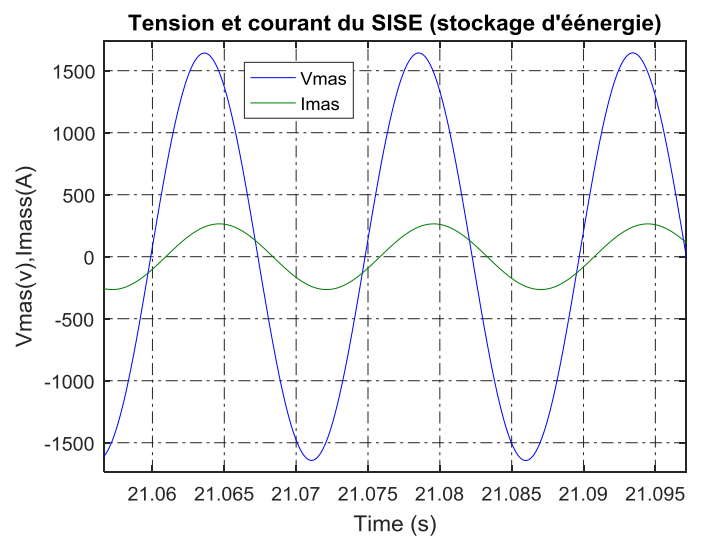
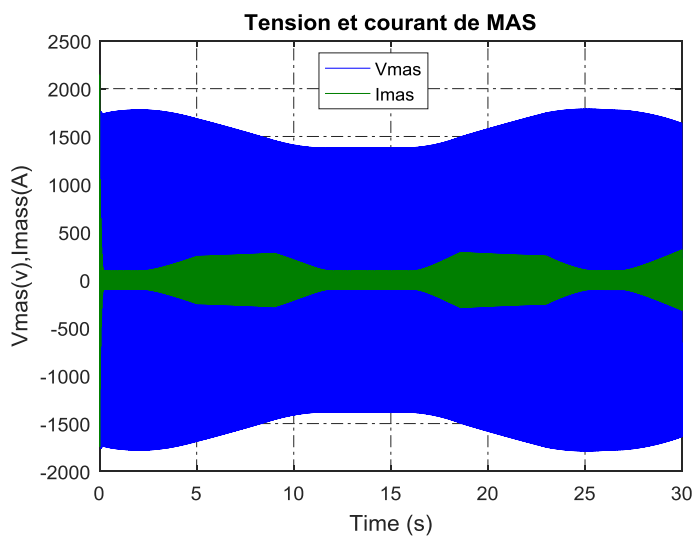
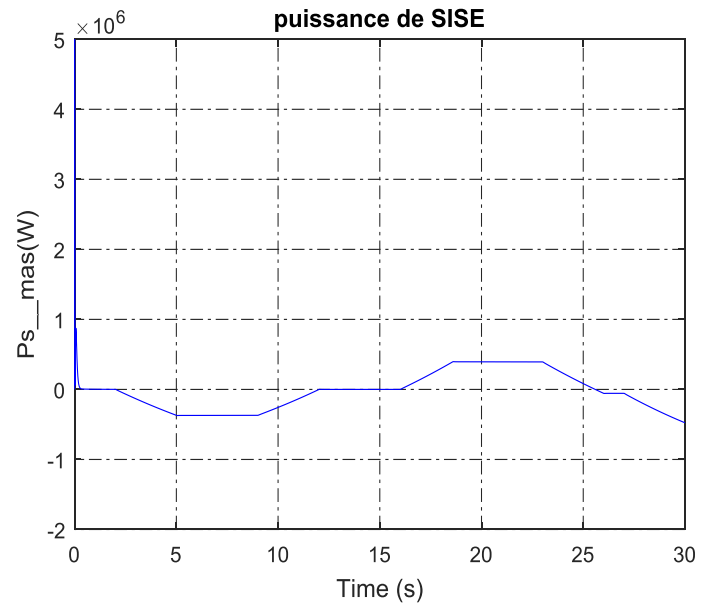
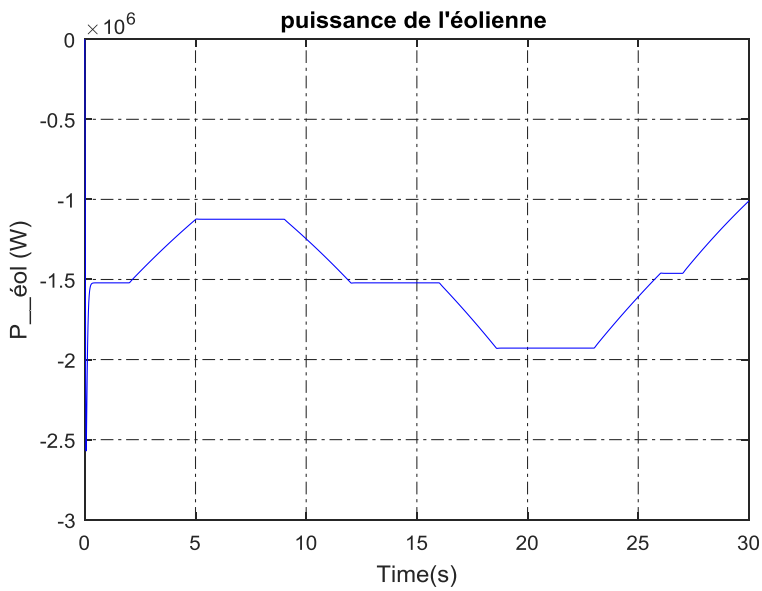
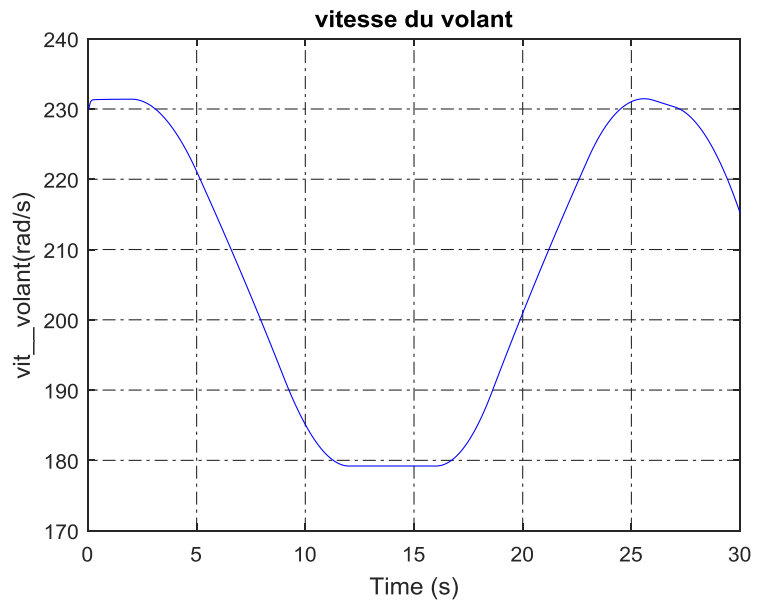
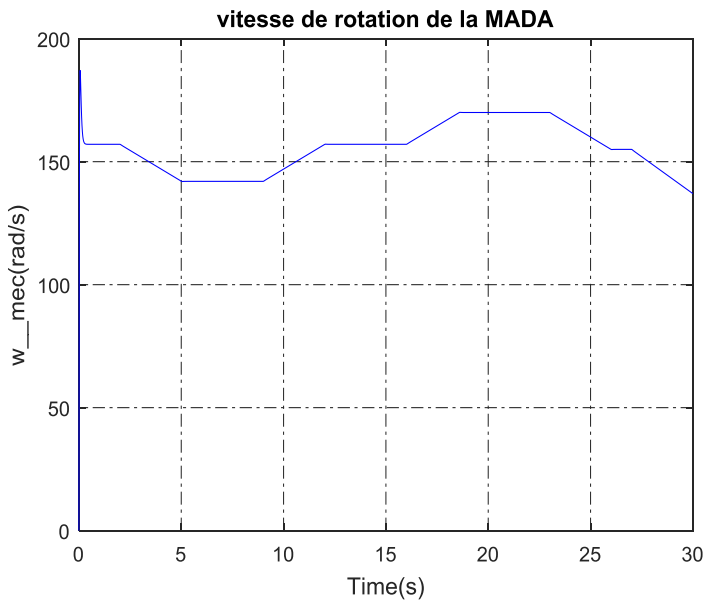


Figure III .8 Exemple de principe de contrôle de SISE associé au générateur éolien [8]

5 Simulation

5.1 Résultats obtenus





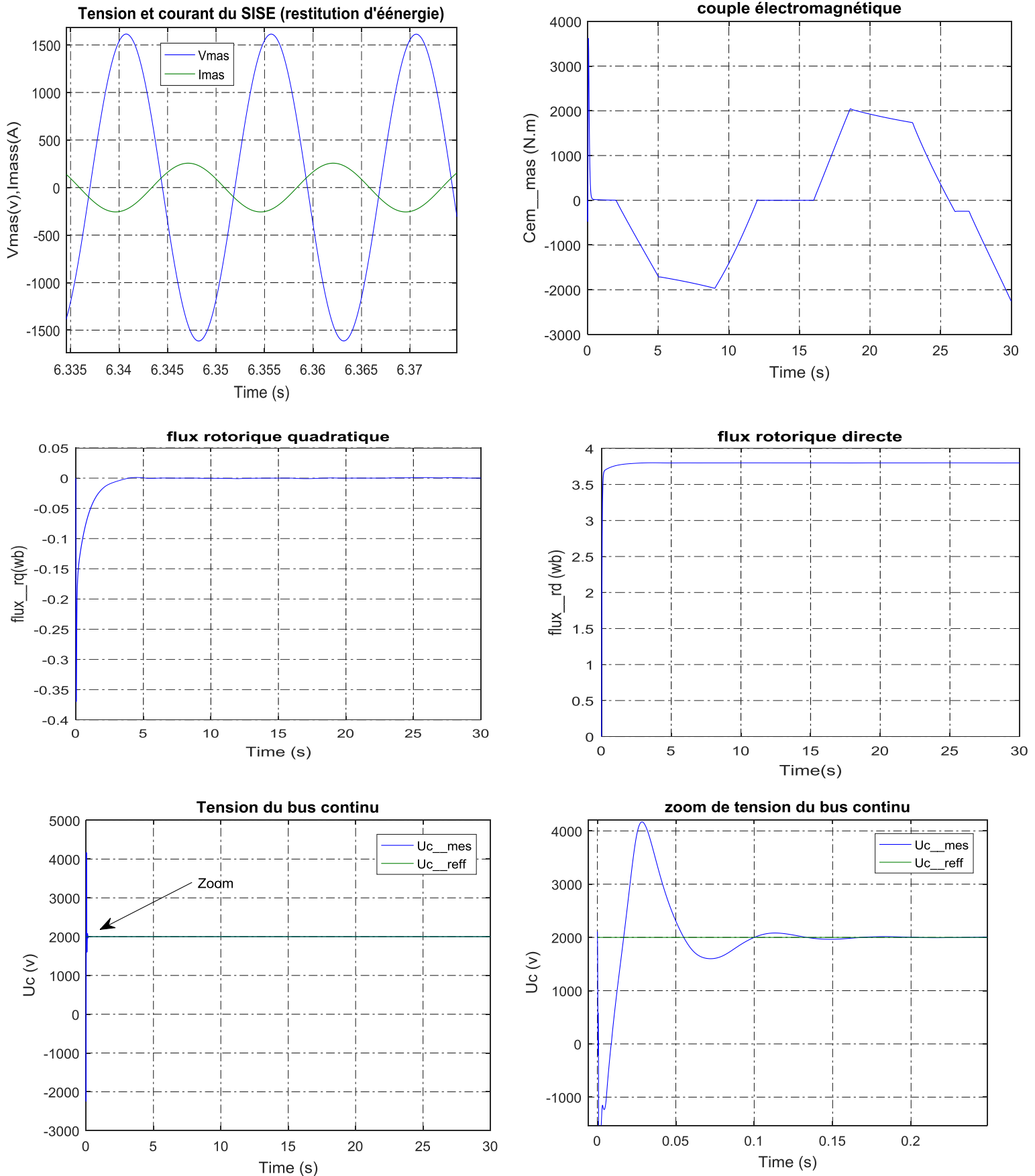


Figure III.9 Résultats de simulation d'association chaîne conversion et SISE

5.2 Interprétations

Les allures de la figure précédente présentent en premier le profil du vent utilisé pour cette simulation, en suite l'allure du glissement de la MADA qui nous indique les zones de fonctionnement de cette dernière, on remarque que la vitesse mécanique de la MADA suit de l'image du profil du vent, et pour la présentation de vitesse du volant d'inertie, elle est variée suivant les deux fonctionnements de génératrice utilisés dans la chaîne de conversion éolienne (diminue dans le fonctionnement hyposynchrone et elle augmente dans le fonctionnement hypersynchrone), et cette dernière est presque constante dans l'intervalle où elle est proche de où le glissement est nul, l'allure de la puissance éolienne varie aussi suivant les deux fonctionnements de la MADA, elle varie de -1.1 à -1.5 Mw pour le fonctionnement hyposynchrone, et pour le fonctionnement hypersynchrone varie entre -1.5 à -1.9 Mw, cette puissance se stabilise à une valeur constante (presque -1.5 Mw) dans l'intervalle où la valeur du glissement s'annule.

La puissance active injectée au réseau est constante et égale à la puissance nominale de la MADA (1.5 Mw), et la puissance réactive est mise à une valeur nulle.

L'allure de la puissance de SISE nous montre qu'elle change de signe en fonction de la puissance d'éolienne, si la valeur de la puissance d'éolienne est inférieure à 1.5 Mw (fonctionnement hyposynchrone) le SISE va fournir une certaine puissance pour compenser le déficit de la puissance d'éolienne donc le transfert d'énergie va de SISE vers le réseau ce qu'on appelle le déstockage, pour une valeur de puissance éolienne supérieure à 1.5 Mw (fonctionnement hypersynchrone) le transfert d'énergie va de l'éolienne vers le SISE ce qu'on appelle le stockage.

L'allure du couple électromagnétique de la MAS suit le signe de la puissance de SISE

Pour l'allure de tensions et courants dans le déstockage, la MAS va se fonctionner comme une génératrice (compensation) et le déphasage du courant par rapport à la tension est d'un angle $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$

Et pour l'allure de tensions et courants dans le stockage, la MAS est en fonction en moteur et le courant est déphasé d'un angle $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension.

On remarque dans l'allure du flux rotorique direct est limité à une valeur constante pour montrer la loi de défluxage.

L'allure de flux rotorique quadratique nous montre l'effet de l'application de la commande vectorielle sur la MAS.

Et pour le couple électromagnétique de la MAS, son signe suit le signe d'écoulement de la puissance active de SISE.

L'allure de la tension du bus continu nous montre que sa régulation assure le maintien de U_c autour de sa valeur de consigne (2000v), et elle se stabilise à l'instant $t=0.2s$.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a tenu compte l'objectif principal de ce mémoire qui était sur la contribution et l'intégration de système de stockage à volant d'inertie dans la production éolienne , tous d'abord on a présenté le modèle mathématique des éléments principaux constituant ce système , tel que le volant d'inertie qui est la masse tournante dans laquelle l'énergie est stockée, ainsi que la machine asynchrone qui fait l'élément de base de ce système, le bus continu et le convertisseur de puissance

Un contrôle vectoriel de la MAS était envisagé pour ce système, et pour valider ce comportement on a présenté des résultats de simulation

Après la validation du control de notre système, on a le associé avec la chaine de conversion étudiée dans le chapitre précédent avec une fixation d'une puissance débiter au réseau, les résultats nous montrent l'intérêt de ce système qui permet de lisser la puissance demandée par le réseau malgré le caractère fluctuant du vent.

Conclusion
Générale

Le but principal de ce travail, consiste à l'étude, la modélisation et la simulation du système inertiel de stockage d'énergie dans une chaîne éolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone doublement alimentée connectée au réseau. Avec l'utilisation de l'environnement MATLAB /Simulink pour avoir des résultats et valider nos études.

Pour cela en premier temps nous avons étudié uniquement les performances de l'aérogénérateur avec la stratégie MPPT après on a fait l'associe au système inertiel de stockage d'énergie, l'ensemble est connecté au réseau.

L'intérêt qui porte le système inertiel de stockage d'énergie associé à l'éolienne, réside dans la minimisation (l'absorption) des variations de la puissance active restituée au réseau, ceci est réalisé par un stockage de surplus de puissance et restituée à la demande.

Il en résulte que l'application privilégiée du système inertiel de stockage d'énergie est évidemment celui du lissage de la puissance injectée au réseau.

En utilisant le volant, ce dernier nous a permis de stocker et de restituer de la puissance.

Le sujet de ce mémoire est un thème d'actualité, et l'étude réalisée n'est qu'une vue générale qui prend en considération un point de départ de largement d'idées et de recherche dans le futur.

ANNEXES

1 Paramètres de la chaîne de conversion

1.1 la Turbine

Nombre de pales	3
Gain du multiplicateur de vitesse	$G=90$
Inertie de l'arbre (Turbine+MADA)	$J_{tot}= 1000 \text{ kg/m}^2$
Densité volumique de l'air	$\rho =1.22 \text{ Kg/m}^3$
Rayon de la turbine	$R=35.25 \text{ m}$

1.2 La machine asynchrone à double alimentation

Puissance nominale	$P_{MADA}=1.5\text{MW}$
Résistance statorique	$R_s=0.012\Omega$
Résistance rotorique	$R_r=0.021\Omega$
Inductance mutuelle	$M_{sr}=0.035\text{H}$
Inductance statorique	$L_s=0.035+2.037.10^{-4} \text{ H}$
Inductance rotorique	$L_r=0.035+1.75.10^{-4} \text{ H}$
Le nombre de paire de pôles	$P=2$
Le coefficient de frottement de la MADA	$f=0.0024 \text{ N.m.s/rd}$
La tension délivrée par le réseau	$V_s=690\text{V}$ à fréquence de 50Hz.

1.3 Le bus continu

Capacité du bus continu	$C=4400\mu\text{f}$
-------------------------	---------------------

2 Paramètres de la chaîne de stockage

2.1 La machine asynchrone

Tension statorique	$v_s=690\text{V}$
Puissance nominale	$P =450\text{kW}$
Résistance statorique	$R_{s_MAS}=0.051\Omega$
Résistance rotorique	$R_{r_MAS}=0.051\Omega$
Inductance statorique	$L_{s_MAS}=40.71*10^{-3}\text{H}$
Inductance rotorique	$L_{r_MAS}=40.71*10^{-3}\text{H}$
Inductance mutuelle	$M=40.1*10^{-3}\text{H}$

Le nombre de paire de pôles	P=2
-----------------------------	-----

2.2 Le volant d'inertie

Le coefficient de frottement	$f_v=0.008 \text{ N.m.s/rd}$
L'inertie (MAS+volant)	$J=250 \text{ kg/m}^2$

3 Synthèse de régulateur

Les régulateurs utilisés sont de type Proportionnel-intégrale (PI) pour sa simplicité et sa facilité à mettre en œuvre

3.1 Régulateur du dispositif MPPT

Comme on a vu au CH2 en ce qui concerne la maximisation de puissance avec asservissement de vitesse de la turbine le régulateur doit atténuer le couple de l'éolienne qui constitue une entrée de perturbation. Comme indiqué dans la figure suivante :

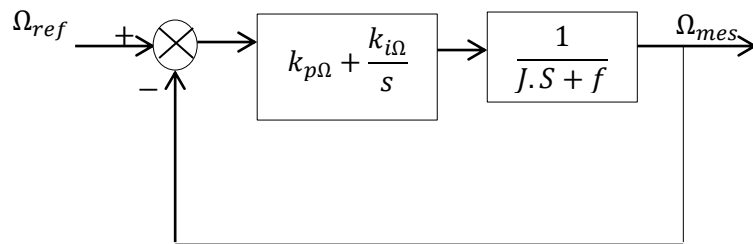


Figure 1 schéma de régulation de vitesse de la turbine

avec :

$k_{p\Omega}$: gain proportionnel du correcteur

$k_{i\Omega}$: gain intégral du correcteur

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$F_{bo}(s) = \frac{k_{p\Omega} \cdot s + k_{i\Omega}}{J \cdot s^2 + f \cdot s}$$

La fonction de Transfert en boucle fermée est :

$$F_{bf}(S) = \frac{k_{p\Omega} \cdot s + k_{i\Omega}}{\frac{J}{k_{i\Omega}} \cdot s^2 + \left(\frac{f + k_{p\Omega}}{k_{i\Omega}}\right) \cdot s + 1}$$

Par identification à un second ordre : $\frac{1}{w_n^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \zeta}{w_n} \cdot s + 1$; on trouve :

$$k_{i\Omega} = w_n^2 \cdot J \quad \text{et} \quad k_{p\Omega} = \frac{2 \cdot \xi \cdot k_{i\Omega}}{w_n} - f$$

Supposons : le coefficient d'amortissement est unitaire et le temps de réponse égal à 0.1s
 $(t_r = 3 \cdot \frac{1}{\omega_n \cdot \xi})$

3.2 Régulateurs des courants rotoriques et puissances sstatoriques

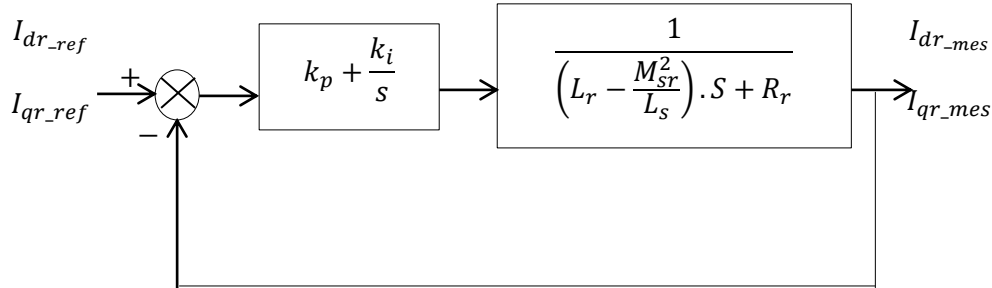


Figure 2 schémas de régulation des courants rotoriques

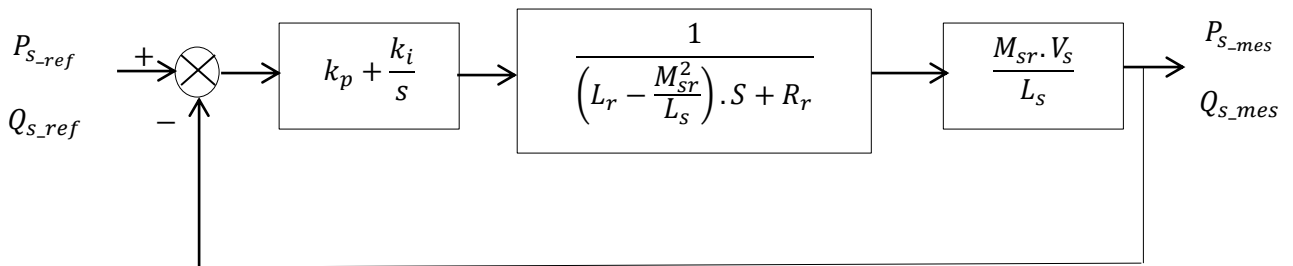


Figure 3 schémas de régulation des puissances statoriques

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit de la manière suivante:

$$F_{bo}(s) = \frac{S + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{S}{k_p}} \cdot \frac{\frac{M_{sr} \cdot V_s}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)}}{S + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)}}$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s}\right)}$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$F_{bo}(s) = \frac{k_p \cdot \frac{M_{sr} \cdot V_s}{L_s(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})}}{s}$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$F_{bf}(s) = \frac{1}{1 + \frac{L_s(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})}{k_p \cdot M_{sr} \cdot V_s} \cdot s}$$

Et $F_{bf}(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s}$ avec $\tau = \frac{1}{k_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})}{M_{sr} \cdot V_s}$

On obtient :

$$k_p = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})}{M_{sr} \cdot V_s} \quad \text{et} \quad k_i = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{R_r \cdot L_s}{M \cdot V_s}$$

Le temps de réponse $\tau = 10ms$

De la même méthode on calcule les utilisés dans le contrôle de la chaîne de stockage

3.3 Régulateurs de flux de la MAS

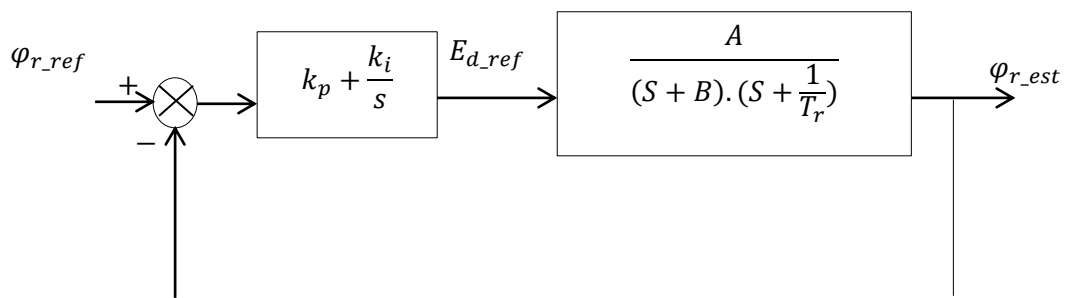


Figure 4 schémas fonctionnels de la régulation du flux

$$A = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot MAS \cdot T_r \cdot MAS} \quad B = \frac{1}{\sigma \cdot T_s \cdot MAS} + \frac{1 - \sigma}{\sigma \cdot T_r \cdot MAS}$$

La compensation des pôles donne :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{1}{T_{r_MAS}}$$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est donnée par :

$$F_{bo}(s) = \frac{k_p \cdot A}{s(s + B)}$$

L'équation caractéristique du système en boucle fermée est la suivante :

$$\frac{1}{k_p \cdot A} \cdot S^2 + \frac{B}{k_p \cdot A} \cdot S + 1 = 0$$

Que nous cherchons à identifier à la forme canonique du 2^{ème} ordre, nous avons donc à résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{1}{k_p \cdot A} = \frac{1}{\omega_n^2} \\ \frac{B}{k_p \cdot A} = \frac{2 \cdot \zeta}{\omega_n} \end{cases} \quad \text{Donc, les paramètres du régulateur du flux sont : } \begin{cases} k_p = \frac{B^2}{A \cdot (2 \cdot \zeta)^2} \\ k_i = \frac{k_p}{T_{r_MAS}} \end{cases}$$

3.4 Régulateurs des courants statoriques de la MAS

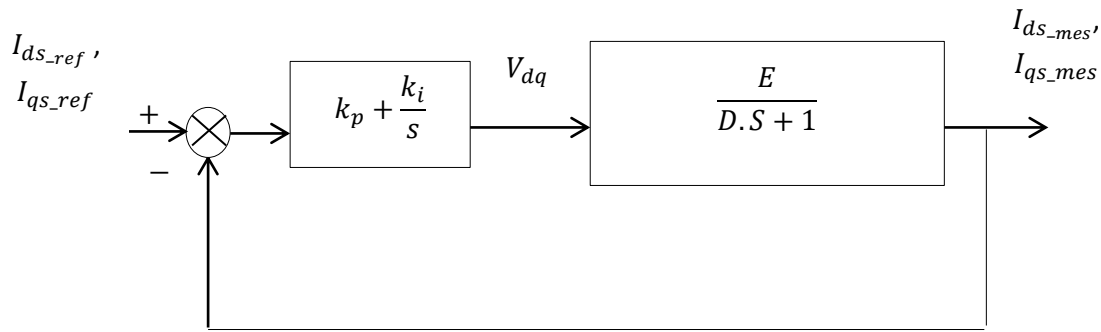


Figure 5 schémas fonctionnels de la régulation des courants

$$E = \frac{1}{R_{s_MAS} + \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right)^2 \cdot R_r}$$

$$D = \frac{\sigma \cdot L_{s_MAS}}{R_{s_MAS} + \left(\frac{M_{sr}}{L_r}\right)^2 \cdot R_r}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est:

$$F_{bo}(s) = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{E}{D}}{s + \frac{1}{D}} \quad \text{utilisons méthode compensation zéro} \quad \frac{k_i}{k_p} = \frac{1}{D}$$

$$F_{bf}(s) = \frac{1}{1 + \frac{D}{E \cdot k_p} \cdot s} \quad \tau = \frac{D}{E \cdot k_p} \quad k_p = \frac{D}{\tau \cdot E} \quad k_i = \frac{1}{\tau \cdot E}$$

3.5 Régulateurs de bus continu

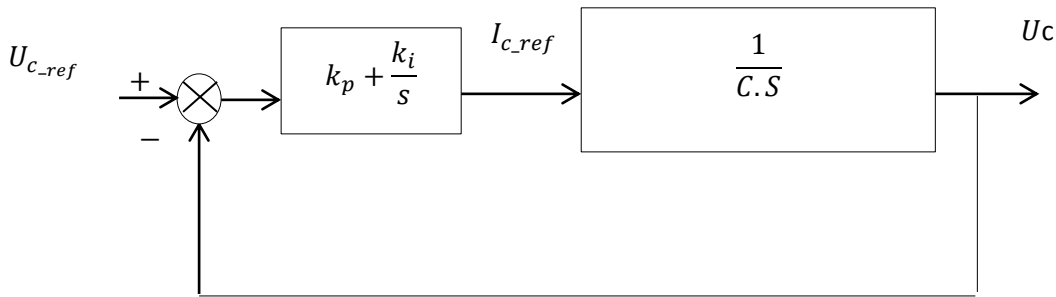


Figure 6 schémas fonctionnels de la régulation de tension de bus continu

C : capacité $c = 4400\mu F$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$F_{bf}(s) = \frac{\frac{k_p}{c} \cdot s + \frac{k_i}{c}}{s^2 + \frac{k_p}{c} \cdot s + \frac{k_i}{c}}$$

D'où l'équation caractéristique en boucle fermée est de la forme suivante :

$$s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0$$

Par identification on obtient :

$$\begin{cases} k_p = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot c \\ k_i = c \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad \text{Imposant } \zeta = 1 \text{ et le temps de réponse } t_r = \frac{3}{\omega_n} = 0.1s$$

- [1] **S. Boukheddami** << Contribution à la commande d'un système de stockage inertiel >> .Mémoire Master2. Université Bijaia. Algérie. 2015
- A. **Boyette** << Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne>>.Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I, France, décembre 2006.
- [2] **S. Belfedhal** << Modélisation et commande d'une chaîne éolienne avec intégration du stockage inertiel >>.Thèse Magistère. Ecole nationale polytechnique d'Alger.10octobre2010
- [3] **L. Leclercq** << Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes >> .Thèse Doctorat. Université de science et technologie. Lille. France. 14décembre2004
- [4] **site :** <https://www.futura-sciences.com> << Les différents types d'éoliennes>>. consulté Février 2020
- [5] **A. TAMAARAT** << Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA >> .Mémoire Magistère. Université Mohamed Khider. Biskra. Algérie. 08 Décembre 2015
- [6] **K. Idjdarene** << Contribution à l'étude et la commande des génératrices asynchrones à cage dédiée à des centrales électrique éoliennes autonome >> .Thèse Doctorat. Université Bijaia (Algérie) et université et université Lille1 (France). 23 Mai 2010
- [7] **A. Boyette** << Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne>>.Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy I, France, décembre 2006.
- [8] **S. Taraft** << Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation >> .Mémoire Magistère. Université Bijaia. Algérie. 14 Mai 2008

- [9] **A. Davigny** << Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie>> .thèse Doctorat. Université de Lille1. France 2007
- [10] **H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron** << Solutions de stockage de l'énergie éolienne>>. Rapport interne laboratoire de recherche du groupe éolien université Québec à Rimouski, 01 janvier 2006.
- [11] **B. Kelkoul** << Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation>>. Mémoire Magistère. Université de Tlemcen. Algérie 29 juin 2011
- [12] **F. Tria** << Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques>. Mémoire Magistère. Université d'El-oued. Algérie 2013
- [13] **A. Mirecki** << Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance >>. Thèse doctorat. Institut National polytechnique. Toulouse, France, 05 Avril 2005
- [14] **S. Belfedhal, E. Berkouk, et Y. Messlem** << Analysis of grid connected hybrid renewable energy system>>. Journal of Renewable and Sustainable Energy **11**, 014701 (2019).
- [15] **S. Belfedhal, E. Berkouk,** << Modeling and Control of Wind Power Conversion System with a Flywheel Energy Storage System >>. International Journal Of Renewable Energy Research Vol.1, No3, pp.152-161, 2011
- [16] **S. Belfedhal, E. Berkouk, Y. Messlem et Y. Soufi** << Modeling and Control of Wind Power Conversion System with a Flywheel Energy Storage System and compensation of Reactive power >>. International Journal Of Renewable Energy Research Vol.2, No.3, 2012
- [17] **D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E. Berkouk** << Network power flux control of a wind generator >>. Renewable Energy **34** (2009) 615–622
- [18] **S. Nemsı, S. Belfedhal, L. Barazane** << Role of Flywheel Energy Storage System in Microgrid >>. JERT, VOLUME 3, ISSUE 3, SEPTEMBER 2016

- [19] **S. Belfedhal, E. Berkouk** << Modeling and control of wind power conversion system with a flywheel energy storage system >>. Reve Monaco 2011
- [20] **S. Belfedhal, E. Berkouk et Y. Messlem** << Modeling and control of wind power conversion system with a flywheel energy storage system and compensation of reactive power >>. Reve Monaco 2012
- [21] **S. Nems** << Stockage de l'énergie éolienne par volant d'inertie >>. Recherche et développement , N° 28 2013
- [22] **S. Belfedhal, E. Berkouk, Y. Messlem et S. Kouadria** << Study and control of wind energy conversion system (WECS) based on the doubly fed induction generator (DFIG) connected to the grid >>. IEEE, 2014
- [23] **M. Smail, A. Benatiallah** << Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne équipée D'une machine asynchrone double alimentation >>. Revue des Energies Renouvelables ICESD'11, 2011
- [24] **I. Hamzzaoui, F. Bouchafaa et A. Talha** << Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens >>. ICEO, 2011.
- [25] **R. Abdessamed** << Modélisation et simulation des machines électriques >>. ouvrage, Collection elipses .
- [26] **M. Allam, Y. Djeriri et Y. Adjoudj** << Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne >>. Research Gate, Juin 2014