

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : CHATER Alya

Thème

**Étude et commande d'une turbine  
éolienne utilisant une machine  
asynchrone à double alimentation**

Soutenu publiquement, le 15 / 09 / 2022, devant le jury composé de :

Mr F.Boukli Hacène	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mr M.Mebrouki	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr D.Bendaoud	Ingénieur de production	SPE/PPO/Oran	Co- Directeur de mémoire
Mr A.kerboua	MCB	ESSA. Tlemcen	Examinateur
Mme D.Kherbouche	MCA	ESSA. Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2021/2022

# Remerciement

*Comme chaque étudiant, je suis passée par des hauts et des bas au cours de mon cursus. Alors, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mes études et mon projet de fin d'étude et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.*

*Je voudrais dans un premier temps remercier mon encadrant Mr Mohamed MEBROUKI et Mr Djilali BENDAOUED pour leur patience, leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Aussi tous les professeurs au sein de l'école supérieure des sciences appliquées de Tlemcen qui ont tellement ajouté à mes compétences personnelles autant que professionnelles et qui j'avais un énorme plaisir d'être leur étudiante, citant parmi eux Mr Mohammed MESSIRDI.*

*Je tiens également à remercier les membres du jury, M. F. Boukli Hacene, M. A. Kerboua et Mme D. Kharbouche.*

*Je désire aussi remercier Mme Soumia DJERABA ingénieur en électrotechnique, pour son aide et son orientation tout le long de la réalisation de ce modeste mémoire.*

*Alya CHATER*

# Table des matières

<b>Remerciment</b>	1
<b>List of Figures</b>	2
<b>List of Tables</b>	3
<b>Nomenclature</b>	4
<b>1 Système éolien et commande de la turbine éolienne</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction	2
1.2 Technologie des éoliennes	2
1.3 Types d'éoliennes	2
1.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical	2
1.3.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus	3
1.3.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius	3
1.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal	4
1.4 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal	4
1.5 Structures des systèmes éoliens :	5
1.5.1 Eoliennes à vitesse fixe	5
1.5.2 Eoliennes à vitesse variable	6
1.5.2.1 Eolienne à machine asynchrone à cage :	6
1.5.2.2 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation (MADA) :	7
1.5.2.3 Autres machines :	7
1.6 Type d'éolienne étudié :	7
1.7 Modélisation de la turbine	8
1.7.1 Modélisation du vent	8
1.7.2 Conversion de l'énergie éolienne cinétique du vent en énergie mécanique	8
1.7.3 Théorie de Betz	9
1.7.4 Modélisation de la turbine	9
1.7.5 Modélisation du multiplicateur	10
1.7.6 Modélisation de l'arbre	10
1.8 Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable	11
1.8.1 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	11
1.8.1.1 Système d'orientation des pales (Pitch Control)	11

1.8.2	Système à décrochage aérodynamique (Stall)	13
1.9	Technique d'extraction du maximum de puissance	13
1.9.1	Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	13
1.9.2	Commande MPPT avec asservissement de la vitesse	15
1.10	Résultats de la simulation :	16
1.10.1	Interprétation des résultats	19
1.11	Conclusion	19
<b>2</b>	<b>Modélisation de la MADA et sa stratégie de commande</b>	<b>20</b>
2.1	Introduction	20
2.2	Présentation de la MADA	20
2.3	Principe de fonctionnement de la MADA	20
2.4	Avantages et inconvénients de la MADA	22
2.4.1	Avantages	22
2.4.2	Inconvénients	22
2.5	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	23
2.5.1	Hypothèses simplificatrices	23
2.5.2	Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation	23
2.5.3	Modèle de la MADA dans le référentiel de Park	24
2.5.3.1	Équation de la machine asynchrone dans le référentiel $dq$	25
2.5.4	Association de la MADA avec un onduleur MLI	26
2.5.4.1	Onduleur de tension :	26
2.5.4.2	Commande par modulation de largeur d'impulsion	26
2.5.5	Commande vectorielle	26
2.5.5.1	Principe de la commande vectorielle	26
2.5.5.2	Orientation du flux statorique	27
2.5.6	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	28
2.5.7	Commande directe des puissances active et réactive	30
2.5.7.1	Dimensionnement du régulateur PI	31
2.5.8	Commande indirecte des puissances active et réactive de la MADA	32
2.5.8.1	Dimensionnement du régulateur PI	33
2.6	Résultat de la simulation	34
2.6.1	Commande directe des puissances active et réactive	34
2.6.2	Commande indirecte des puissances active et réactive	38
2.7	Interprétation des résultats	42
2.7.1	Interprétation des résultats des commandes directe et indirecte	42
2.8	Conclusion	42
<b>3</b>	<b>Étude, modélisation et simulation du système de stockage</b>	<b>43</b>
3.1	Introduction	43
3.2	Avantage technique et économique	43
3.3	Différents types de systèmes de stockage	44

3.3.1	Systèmes directs	44
3.3.2	Systèmes indirects	44
3.4	Choix du système de stockage	44
3.5	Accumulateur au lithium-ion (Li-ion)	45
3.5.1	Principe de fonctionnement	46
3.5.2	Modélisation de la batterie	46
3.6	Super-condensateur	47
3.6.1	Principe de fonctionnement	47
3.6.2	Modélisation du super condensateur	48
3.7	Comparaison batterie/super-condensateur	48
3.8	Structure Générale du système de conversion d'énergie	49
3.9	Contrôle de l'unité de stockage	49
3.10	Résultat de la simulation	50
3.10.1	Batterie Li-ion	50
3.10.2	Super-condensateur	51
3.11	Interprétation	51
3.12	Conclusion	51

## Annexes 54

<b>Annexe 1</b>		<b>54</b>
1	La chaîne éolienne	54
1.1	La turbine éolienne	54
1.1.1	MPPT avec asservissement de vitesse	54
1.1.2	MPPT sans asservissement de vitesse	55
1.2	La génératrice à double alimentation	55
1.3	Commande de l'onduleur	56
1.3.1	La commande directe des puissances	56
1.3.2	La commande indirecte des puissances	57
2	Système de stockage	57
2.1	Unité de contrôle	57

<b>Annexe 2</b>		<b>59</b>
1	Machine asynchrone à double alimentation utilisée en simulation du système éolien	59
2	La turbine éolienne utilisée en simulation du système éolienne	59

# Table des figures

1.1	Éoliennes à axe vertical [Ker-13]	3
1.2	Eoliennes à axe horizontal [Ker-13]	4
1.3	Éléments constituant une éolienne [Ghe-11]	5
1.4	Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.[Ghe-11]	5
1.5	Eolienne à MAS pilotée au stator [Kel-11]	6
1.6	Éolienne à MADA pilotée au rotor[Kel-11]	7
1.7	L'écoulement d'air à travers la surface du rotor de la turbine éolienne [Ker-13]	9
1.8	Modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine	11
1.9	Les zones de fonctionnement [Che-15]	12
1.10	Variation de l'angle de calage d'une pale [Kra-13]	13
1.11	Schéma bloc de la commande sans asservissement de la vitesse	14
1.12	Schéma bloc de la commande avec asservissement de la vitesse	15
1.13	schéma fonctionnel du régulateur PI [Kel-11]	16
1.14	Résultat de la simulation de la turbine avec et sans asservissement de la vitesse	18
2.1	Caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [Dje,Mel-20]	21
2.2	Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants couple/vitesse [Lou-16]	22
2.3	Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA [Kra-13]	24
2.4	Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique	28
2.5	Modèle simplifié des courants rotoriques de la MADA	29
2.6	Modèle simplifié des puissances statoriques de la MADA	30
2.7	Modèle réduit du rotor de la MADA	30
2.8	Modèle de la commande directe des puissances de la MADA [Dje,Mel-20]	31
2.9	Schéma de régulation des puissances $P_s$ et $Q_s$	31
2.10	Schéma bloc de la régulation en cascade [Dje,Mel-20]	33
2.11	Boucle de régulation des courants $i_{rd}$ et $i_{rq}$ après découplage	33
2.12	Schéma de régulation des courants $i_{rd}$ et $i_{rq}$	33
2.13	Puissance statorique active avec la commande directe des puissances	35
2.14	Puissance statorique réactive avec la commande directe des puissances	35
2.15	Courants rotoriques avec la commande directe des puissances	36
2.16	Courant statorique réel $I_{abc}$ avec la commande directe des puissances	36
2.17	zoom sur Courant statorique réel $I_{abc}$	37
2.18	Courant rotorique réel $I_{abc}$ avec la commande directe des puissances	37
2.19	Vitesse électrique avec la commande directe des puissances	38

2.20	Puissance statorique active avec la commande indirecte des puissances	38
2.21	Puissance statorique réactive avec la commande indirecte des puissances	39
2.22	Courants rotoriques avec la commande indirecte des puissances	39
2.23	Courant statorique réel $I_{abc}$ avec la commande indirecte des puissances	40
2.24	zoom sur Courant statorique réel $I_{abc}$	40
2.25	Courant rotorique réel $I_{abc}$ avec la commande indirecte des puissances	41
2.26	Vitesse électrique avec la commande indirecte des puissances	41
3.1	Classification des différents dispositifs de stockage	44
3.2	Fonctionnement d'une batterie lithium-ion [Mar-19]	46
3.3	structure d'un super-condensateur [Bok-19]	48
3.4	Système de production éolien avec stockage [Boy-06]	49
3.5	structure générale du système de stockage	50
3.6	Tension, courant, SOC et puissance de la batterie Li-ion	50
3.7	Tension, courant, SOC et puissance du super-condensateur	51
3.8	Diagramme de la chaine éolienne	54
3.9	Diagramme de la turbine avec asservissement de vitesse	55
3.10	Diagramme de la turbine sans asservissement de vitesse	55
3.11	le diagramme de la génératrice à double alimentation	56
3.12	Diagramme de la commande de l'onduleur	56
3.13	Diagramme de la commande direct des puissances	57
3.14	Diagramme de la commande indirect des puissances	57
3.15	Diagramme du système de stockage	58
3.16	Diagramme de l'unité de controle	58

# Liste des tableaux

- 1.1 les valeurs des coefficients . . . . . 10
- 3.1 Grandeurs nominales . . . . . 59
- 3.2 Paramètres nominaux . . . . . 59
- 3.3 Paramètres nominaux . . . . . 60

# Nomenclature

Bat Batterie

FEM Force Electro-Motrice

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation

MAS Machine Asynchrone

MLI Modulation de Largeur d'Impulsions

MPPT Maximum Point Power Tracker

MS Machine Synchrone

PI Proportionnel-Integral

SC Super-condensateur

SOC State of charge

SOD State of discharge



# Introduction générale

L'homme utilise l'énergie sous forme de chaleur, de lumière ou de mouvement. La maîtrise de l'énergie est donc le moteur de l'activité humaine. Ainsi, elle est au cœur de l'avenir de notre société. Autant, elle fut un facteur de construction et de création de richesse.

D'une part, l'évolution démographique de la planète implique une progression durable des besoins énergétiques. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et rapproche l'échéance de leur épuisement.

Cette situation, ajoutée à la conviction grandissante que le changement climatique d'origine humaine est réel (l'été 2022 en était pour les populations riches et pauvres à travers le monde une démonstration flagrante des effets dévastateurs de ce phénomène naturel) et que les émissions de dioxyde de carbone à effet de serre y contribuent grandement. Cela suscite un nouvel intérêt envers les sources d'énergie renouvelables sans carbone. Ces dernières existent sous plusieurs formes : hydraulique, éolienne, solaire thermique et photovoltaïque, énergie produite par les vagues ainsi que les courants marins, géothermique et biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres.

L'énergie éolienne est, parmi toutes les énergies renouvelables, celle qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Elle est presque universellement reconnue comme la source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes. En plus, elle contribue à la préservation de l'environnement. Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne éolienne basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation.(problématique)

le présent document est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous passerons en revue les technologies et la composition des différents types d'éoliennes dans le cadre de la production d'énergie. D'autre part, nous présenterons la modélisation mathématique de la turbine éolienne avec et sans asservissement de sa vitesse mécanique, suivie d'une simulation sous MATLAB/SIMULINK.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation mathématique de la MADA dans le référentiel de Park et au développement d'une commande vectorielle directe en utilisant le régulateur type Proportionnel- Intégral pour commander indépendamment les puissances actives et réactives issues du système aérogénérateur associé à un convertisseur côté machine. Ce choix étant justifié par le fait que cette machine est actuellement le générateur électrique le plus répandu dans les systèmes éoliens à vitesse variable de forte puissance. Une deuxième partie sera consacrée au développement d'un algorithme d'une commande indirecte des puissances actives et réactives en fonction des courants rotoriques. Puis nous présenterons la simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation avec les deux stratégies de commande modélisées auparavant.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la simulation du système de stockage composé d'une unité de contrôle et unité de stockage par deux différents types de stockage : par batterie Li-ion et par super-condensateur.

# Chapitre 1

## Systeme éolien et commande de la turbine éolienne

### 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les différents types d'éoliennes et leurs structures ainsi que les technologies utilisées dans la production d'électricité. D'autre part, nous présenterons la modélisation mathématique de la turbine éolienne avec et sans asservissement de sa vitesse mécanique, suivie d'une simulation sous MATLAB/SIMULINK.

### 1.2 Technologie des éoliennes

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, elle tire son nom d'Éole (en grec ancien Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique .

L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières [Ghe-11] :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.
- Transformation en énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Nous nous intéressons par la suite aux éoliennes pour la production de l'énergie électrique .

### 1.3 Types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées, selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal.

#### 1.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristiques aérodynamiques en deux familles ; les

aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la trainée (Aérogénérateur à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924). [Ghe-11]

### 1.3.1.1 Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.[Ghe-11]

### 1.3.1.2 Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la trainée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure. [Ghe-11]

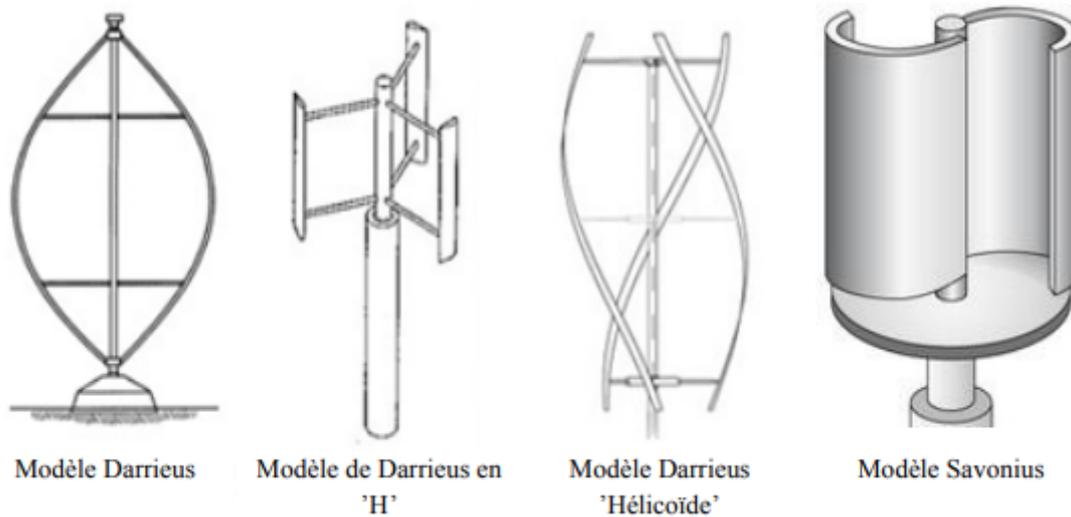


FIGURE 1.1 – Éoliennes à axe vertical [Ker-13]

### 1.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisqu'elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales varie entre 1 et 3 : le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent [Ghe-11].

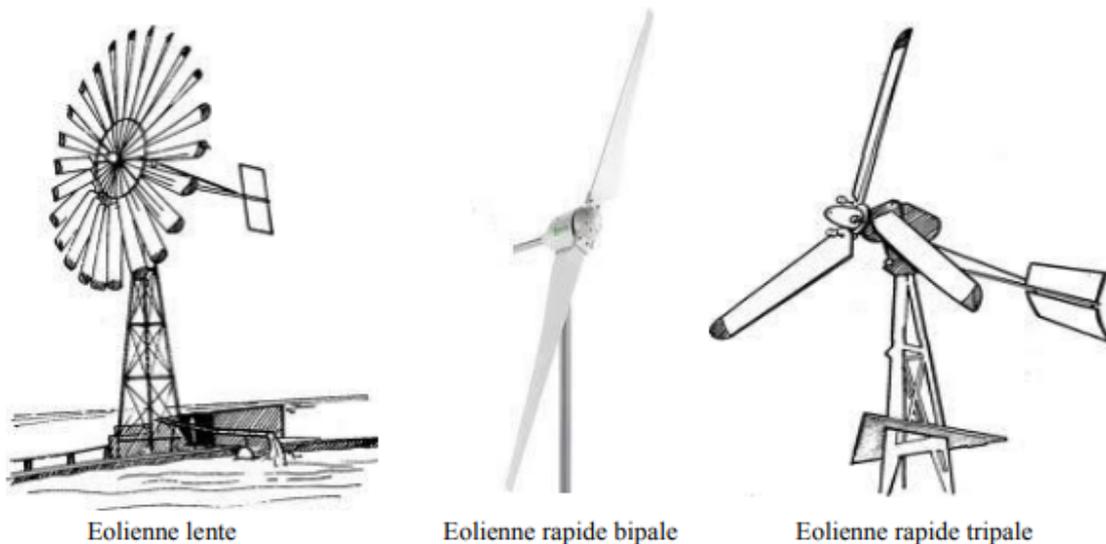


FIGURE 1.2 – Eoliennes à axe horizontal [Ker-13]

## 1.4 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure (L.3) [Ghe-11]

**Mat (tour) :** c'est un tube d'acier ; il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

**Nacelle :** Elle regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

**Multiplicateur :** Il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

**Système de refroidissement :** Il se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

**Génératrice électrique :** c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelques kW à 10 MW

**Système de commande :** Il contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et intervient automatiquement, en cas de défaillance, pour l'arrêter.

**Arbre :** Il relie le moyeu au multiplicateur, et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

**Système d'orientation des pales :** Il sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pales fixes ou orientables qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

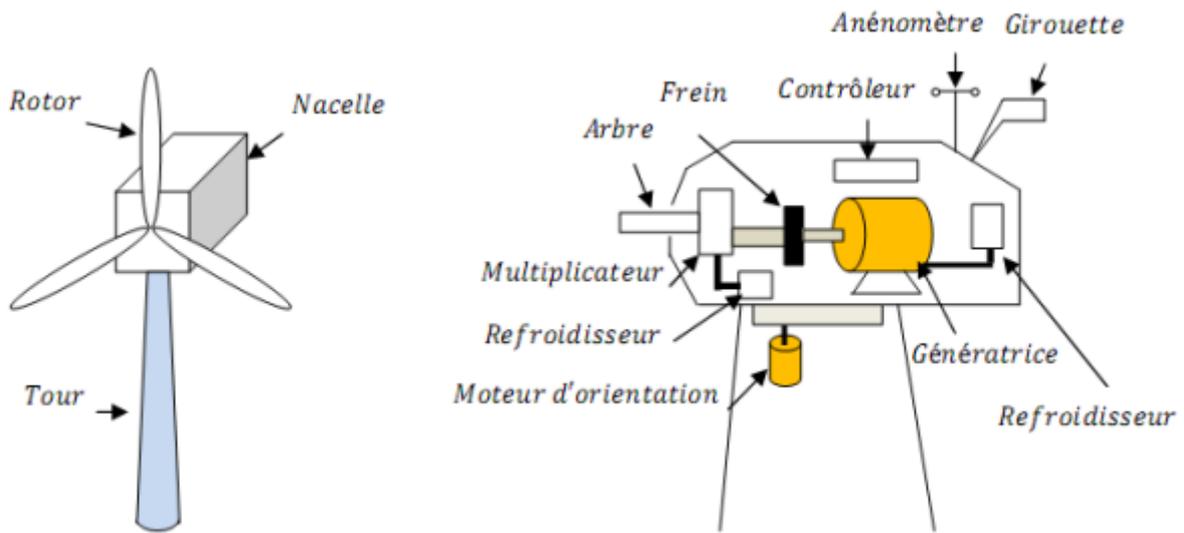


FIGURE 1.3 – Eléments constituant une éolienne [Ghe-11] .

## 1.5 Structures des systèmes éoliens :

### 1.5.1 Eoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée au réseau électrique (Fig. (1.4)). Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui sera maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.[Ghe-11]

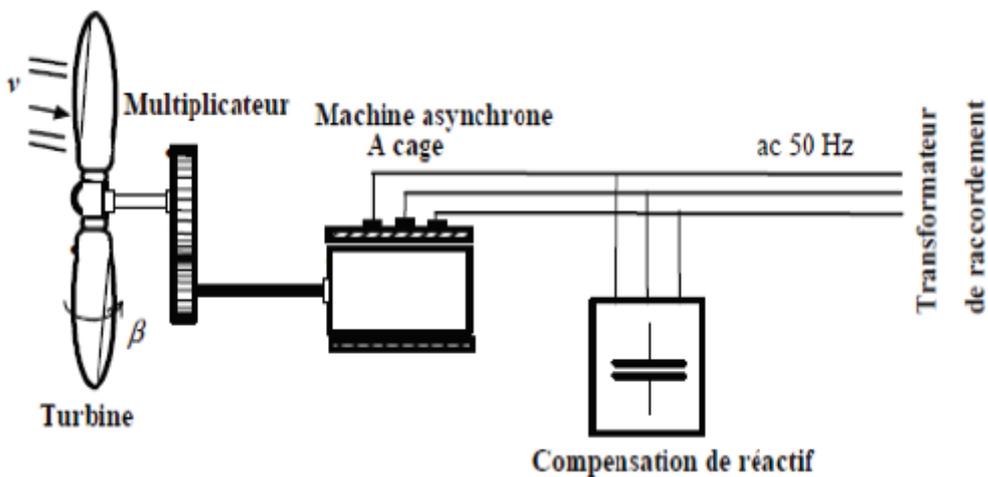


FIGURE 1.4 – Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.[Ghe-11]

#### Avantages :

- Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
- Elles ont une très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Moins chères.[Kel-11]

## 1.5.2 Eoliennes à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine, d'un multiplicateur, d'un générateur et d'un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique synchrone ou asynchrone [Kel-11] .

**Les machines synchrones :** elles sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [Kel-11] .

**Les machines asynchrones :** elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuse. Ces machines tournent à une vitesse beaucoup plus importante que celle de la turbine éolienne d'où la nécessité d'utiliser un multiplicateur de vitesse. Cette technologie est utilisée pour les fortes puissances. La machine asynchrone peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné) [Kel-11].

**Principaux avantages des éoliennes à vitesse variable comparées aux éoliennes à vitesse fixe :**

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent (augmentation du rendement énergétique) .
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés .En conséquence, pour de faibles vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente .
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Elles sont les moins exigeantes en terme d'entretien.[Kel-11]

### 1.5.2.1 Eolienne à machine asynchrone à cage :

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone (MAS) à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au niveau du circuit statorique, voir la figure (1.5) .

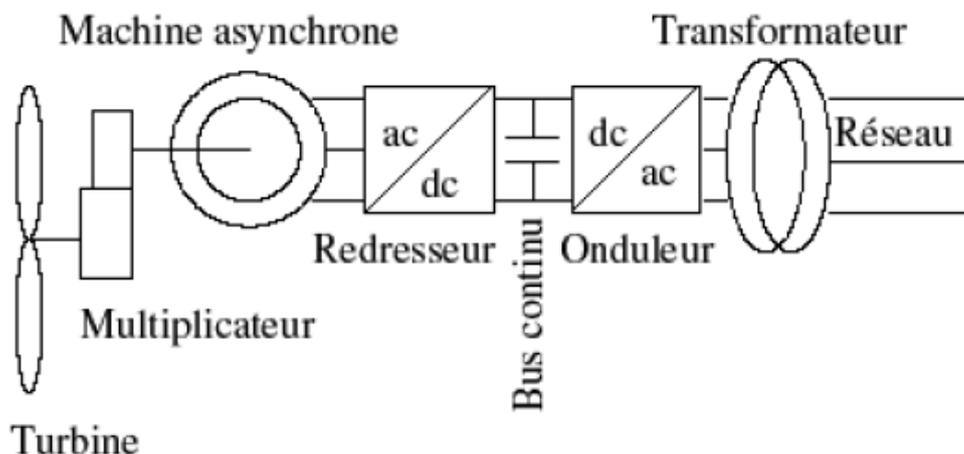


FIGURE 1.5 – Eolienne à MAS pilotée au stator [Kel-11]

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur, ce qui permet de contrôler la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité sur la figure (1.5)). Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes [kel-11].

### 1.5.2.2 Eolienne à machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

Dans cette conception le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique (figure (1.6)). Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la première configuration [Kel-11][Ghe-11].

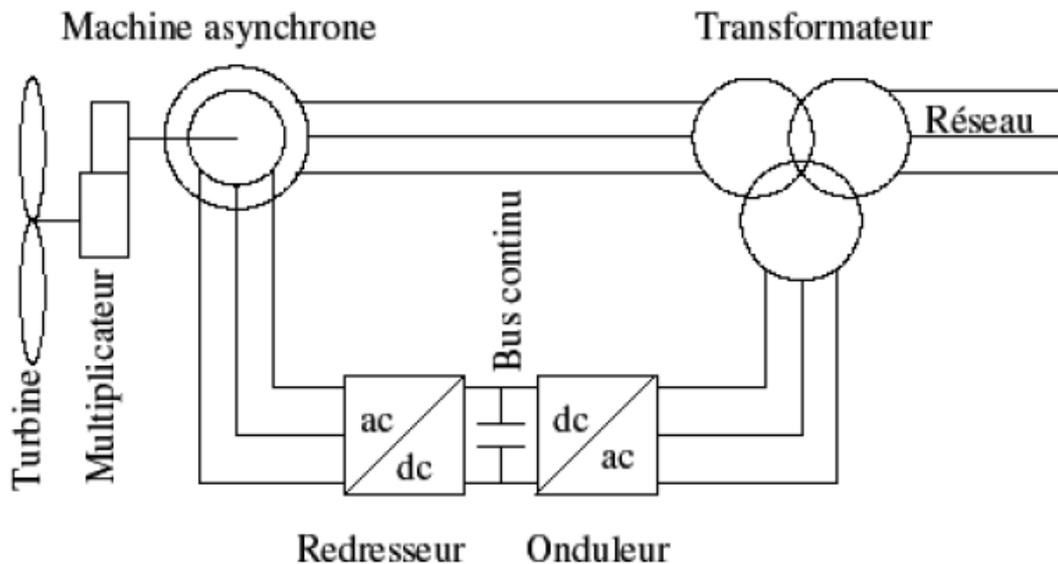


FIGURE 1.6 – Éolienne à MADA pilotée au rotor[Kel-11]

### 1.5.2.3 Autres machines :

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées, notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Ainsi, les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids. Aussi, les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple, mais la puissance produite par ces éoliennes est généralement faible. Ce type de machine pourrait être un candidat de futures éoliennes [Kel-11].

## 1.6 Type d'éolienne étudié :

La technologie des éoliennes s'est diversifiée en même temps qu'elle progressait. Ainsi, de nos jours, il existe de nombreux types. Dans ce qui suit, nous donnons les arguments pour notre choix du type d'éolienne étudié dans ce travail d'après [Kel-11][Lou-16].

En effet, la machine asynchrone à cage d'écureuil, par ses qualités de robustesse, de coût et de simplicité, semble bien adaptée à l'utilisation dans un système éolien. Lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme.

Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses du vent élevées. Une solution consiste à insérer un convertisseur entre la machine et le réseau. Ce dispositif peut alors fonctionner à vitesse variable puisque la tension sera redressée quelle que soit la vitesse de rotation de la machine. Ensuite, un onduleur du côté réseau est chargé d'assurer la cohérence entre la fréquence du réseau et celle délivrée par le dispositif; ce qui permet d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite et de son rendement énergétique.

L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépend de la taille du convertisseur .

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des générateurs asynchrones doublement alimentés (à rotor bobiné). C'est ce type de machine qui est choisi pour l'étude de recherche menée dans ce travail.

## 1.7 Modélisation de la turbine

### 1.7.1 Modélisation du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La définition du modèle du vent dépend des grandeurs caractéristiques du site et la nature du vent (des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'année concernée par l'étude). Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent par une somme de plusieurs harmoniques comme suit [Lou-16][Dje-20] :

$$V_{vent}(t) = A + \sum_{k=0}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (1.1)$$

où  $A$  est La valeur moyenne de la vitesse du vent,  $a_k$  l'amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k$ ,  $\omega_k$  la pulsation de l'harmonique de l'ordre  $k$  et  $i$  le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

### 1.7.2 Conversion de l'énergie éolienne cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. En effet, l'énergie cinétique d'une colonne d'air de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $V$  – vent, de longueur  $dx$ , de section  $S$  est donnée par [Lou-16] :

$$dE = \frac{1}{2} \rho s v_{vent}^3 dt \quad (1.2)$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'air (mesurée en  $kg/m^3$ ),  $V$  – vent la vitesse instantanée du vent (mesurée en  $m/s$ ) et  $R$  le rayon de la pale (mesuré en  $m$ ).

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ( $S = \pi R^2$ ). La puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{vent}^3 \quad (1.3)$$

### 1.7.3 Théorie de Betz

La théorie de Betz stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de  $16/27$  (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, pour la première fois en 1929, formula la loi qui porte son nom. Pour démontrer le résultat obtenu par Betz, nous considérons le système de la figure (1.7) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal.  $V_1$  représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et  $V_2$  la vitesse en aval. [Gho,Dib-19]

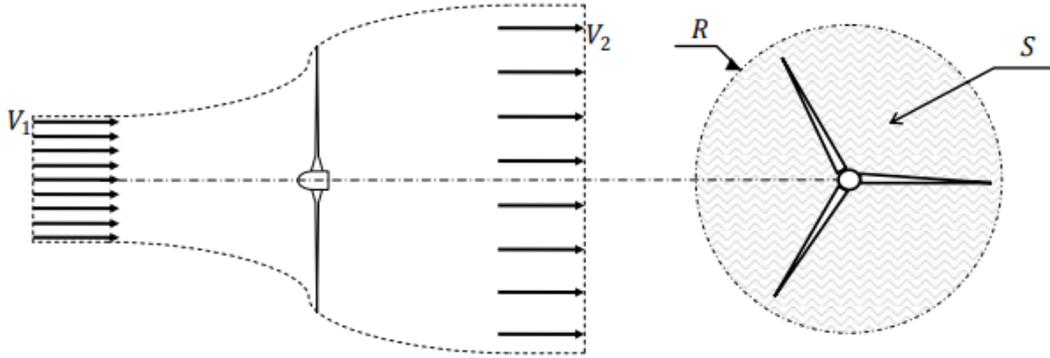


FIGURE 1.7 – L'écoulement d'air à travers la surface du rotor de la turbine éolienne [Ker-13]

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor soit égale à la moyenne entre les vitesses  $V_1$  et  $V_2$ , la masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par :

$$m_0 = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.4)$$

La puissance  $P_m$  alors extraite par le rotor est la différence des puissances du vent en amont et en aval, s'exprime :

$$P_m = \frac{1}{2} m_0 (V_1^2 + V_2^2) \quad (1.5)$$

En remplaçant  $m_0$  par son expression dans l'équation (1.5)

$$P_m = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 + V_2^2) \quad (1.6)$$

Supposons maintenant qu'un vent théoriquement non perturbé traverse la même surface  $S$  sans diminution de vitesse, la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (1.7)$$

où  $S$  est la surface d'aire balayée par les pales ( mesurée en  $m^2$ ),  $\rho$  la masse volumique d'air et  $V_1$  la vitesse du vent ( mesurée en  $m/s$  ) .

### 1.7.4 Modélisation de la turbine

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente l'efficacité aérodynamique de la turbine éolienne, L'évolution du coefficient de puissance dépend des caractéristiques aérodynamiques de la turbine ainsi que des conditions de fonctionnement. Ce coefficient  $C_p$ , lui-même, dépend de deux paramètres techniques, à savoir :

L'angle de calage  $\beta$  qui donne l'orientation des pales par rapport au plan de la turbine et un rapport de vitesse  $\lambda$  défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [Lou-16][Kel-11].

Pour un angle de calage variable, le coefficient de puissance peut être exprimé en fonction de  $\lambda$  et  $\beta$  comme :

$$C_p = c_1 - c_2(\beta - c_3) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)}\right) - c_4(\lambda - c_5)(\beta - c_3) \quad (1.8)$$

Tel que selon [Lou-16] :

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
0.35	0.00167	2	0.00184	3

TABLE 1.1 – les valeurs des coefficients

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} R}{v_{vent}} \quad (1.9)$$

où  $\Omega_{turb}$  est la Vitesse angulaire mécanique de la turbine (mesurée en  $rad/s$ ),  $V$  la vitesse du vent (mesurée en  $m/s$ ) et  $R$  le rayon de la turbine (longueur de la pale, mesurée en  $m$ ).

L'aérogénérateur ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance. C'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission calculée selon la relation

$$P_m = \frac{1}{2} c_p(\lambda) \rho s v_1^3 \quad (1.10)$$

où  $\rho$  est la densité d'air égale à  $1.225 kg/m^3$  à la pression atmosphérique à 15C.

Le couple  $C_{aer}$  produit par cette éolienne est alors déduit :

$$C_{aer} = \frac{P_m}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2\Omega_{turb}} c_p(\lambda) \rho s v_1^3 \quad (1.11)$$

### 1.7.5 Modélisation du multiplicateur

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/mn). Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr/ mn) [Gho,Dib-19]

$$\Omega_{mec} = G\Omega_{turb} \rightarrow G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turb}} \quad (1.12)$$

où  $\Omega_{mec}$  est la vitesse angulaire de rotation de la génératrice (mesurée en  $rad/s$  ou  $tr/mn$ ).

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{aer} \rightarrow G = \frac{C_{aer}}{C_{mec}} \quad (1.13)$$

où  $G$  est le rapport de multiplication,  $C_{mec}$  le couple mécanique sur l'axe du générateur (mesuré en  $N.m$ ).

### 1.7.6 Modélisation de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique exercé sur l'arbre du rotor de l'éolienne  $C_m$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  [Lou-16] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - B\Omega \quad (1.14)$$

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_t$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. L'inertie totale  $J$  est constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice  $J_g$ .

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (1.15)$$

Finalement, de l'association des équations précédentes, on établit le schéma bloc de cette modélisation qui est montré dans la figure (1.8) :

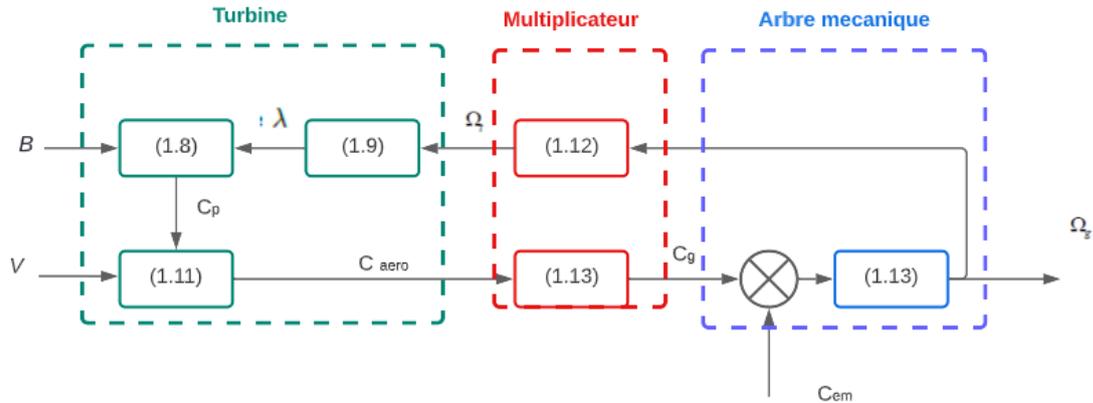


FIGURE 1.8 – Modélisation aérodynamique et mécanique de la turbine

## 1.8 Stratégie de la commande d'une éolienne à vitesse variable

Pour extraire de manière efficace la puissance du vent, l'éolienne doit être exploitée selon 4 zones différentes comme le montre la figure (1.9) [Che-15] :

**Zone 1 :** Elle correspond aux vitesses très faibles du vent, donc insuffisantes pour faire tourner la turbine.

**Zone 2 :** Dans cette zone, l'angle de calage est maintenu constant, et c'est le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice qui va être mis en œuvre afin de capter le maximum de puissance pour chaque vitesse de vent (principe de la MPPT). Dans cette zone, la courbe de puissance de la génératrice suit une progression rapide.

**Zone 3 :** Dans cette zone, la vitesse de la génératrice est maintenue constante à son maximum par opposition d'un couple moteur approprié. L'augmentation de la vitesse du vent va donc s'accompagner d'une décroissance du coefficient  $C_p$  et d'une augmentation moins rapide de la puissance récupérée. Lorsque la puissance maximum de la génératrice est atteinte, l'angle des pales (pitch) est modifié (exemple : Passage de (1 à 2) afin de dégrader encore plus le coefficient  $C_p$ .

**Zone 4 :** Dans cette zone, lorsque la vitesse du vent devient trop élevée ( $V_M$ ), un dispositif d'urgence permet d'arrêter l'éolienne (production d'énergie électrique nulle) et de la mettre en sécurité pour éviter tout dégât. Pour contrôler la puissance aérodynamique capturée et la limiter lorsque la vitesse du vent est très élevée, on peut utiliser l'une des deux techniques de contrôle connues surtout dans les grandes turbines : le système d'orientation des pales (Pitch Control) et le système à décrochage aérodynamique (Stall Control). Dans ce qui suit, nous nous sommes intéressés à la zone 2, où la maximisation de l'énergie électrique extraite est appliquée

### 1.8.1 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

#### 1.8.1.1 Système d'orientation des pales (Pitch Control)

Le système d'orientation des pales sert à limiter la puissance générée. Les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (pitch angle control) (système de contrôle d'angle des pales), pour des vitesses du vent au delà de la vitesse du vent nominale en réglant l'angle d'orientation des pales  $\beta$  pour dégrader le coefficient de puissance [Dje,Mel-20][Kra-13]

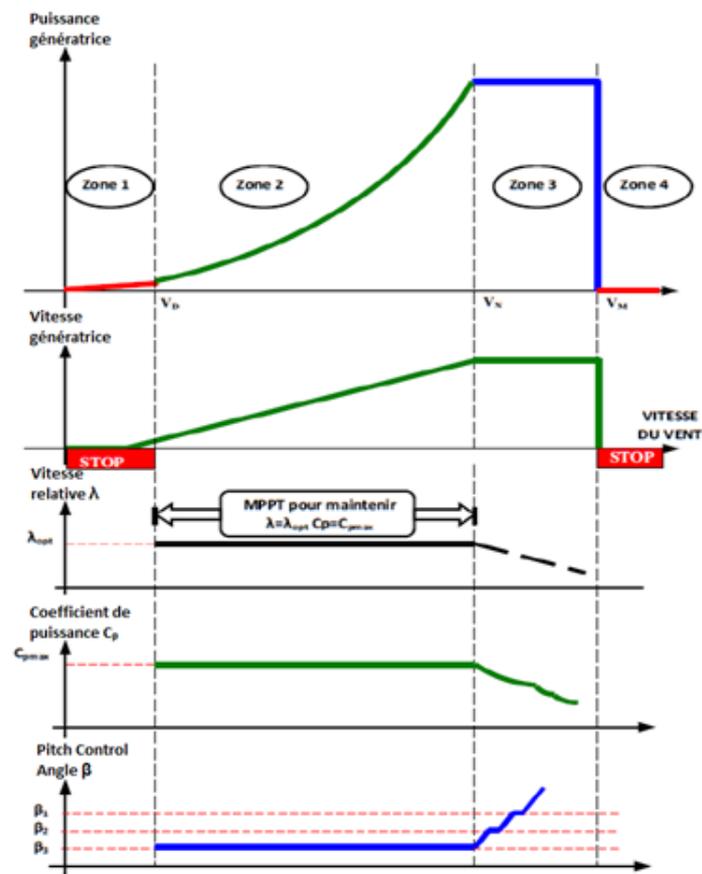


FIGURE 1.9 – Les zones de fonctionnement [Che-15]

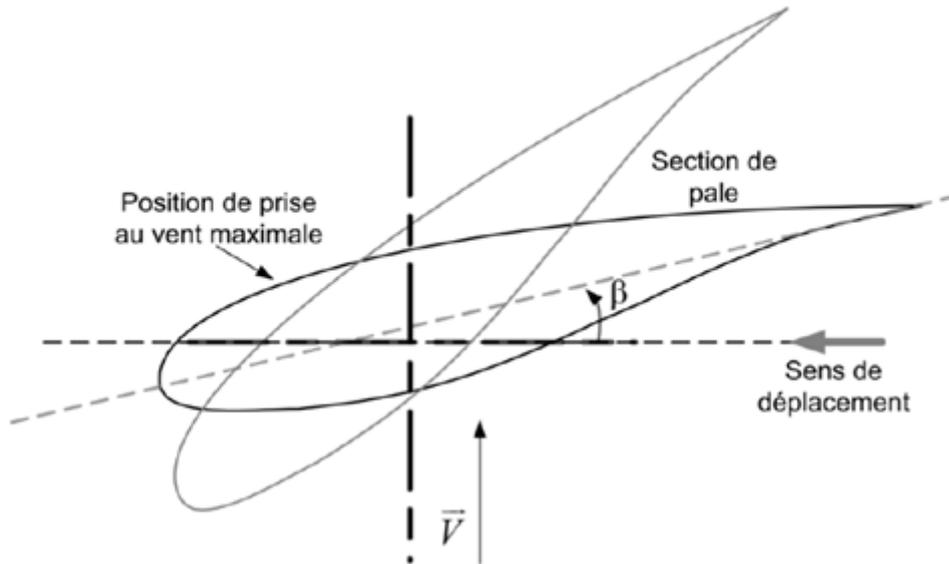


FIGURE 1.10 – Variation de l’angle de calage d’une pale [Kra-13]

### 1.8.2 Système à décrochage aérodynamique (Stall)

C’est un régulateur par décrochage aérodynamique, autrement dit le comportement géométrique des pales peut évoluer selon le rapport entre les deux vitesses du vent et de la turbine, ce qui permet le décrochage à partir d’une certaine vitesse du vent. Ce décrochage dépend notamment de l’angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout. Afin d’améliorer le degré de captage d’énergie par le (Stall Control), on peut combiner ce dispositif à une machine à deux vitesses de rotation, ce qui permet d’étendre la plage de production et la rendre comparable avec celle obtenue dans le cas du Pitch Control.

Certains aérogénérateurs utilisent un système hybride nommé le Stall Actif qui combine les avantages des deux systèmes où le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minimale des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le cas du système de Pitch Control [Dje,Mel-20]

## 1.9 Technique d’extraction du maximum de puissance

Notre but est d’exploiter le mieux l’énergie disponible dans le vent afin d’extraire le maximum de puissance de l’éolienne. Pour cela, nous allons développer une stratégie de commande nommée la MPPT (maximum power point tracker). On distingue deux familles de structure :

- La commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.
- La commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

### 1.9.1 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique

La MPPT sans asservissement est utilisée quand la vitesse du vent varie très peu en régime permanent, car il est difficile de mesurer cette dernière avec précision à cause de la position de l’anémomètre (il est situé derrière le rotor de la turbine) qui rend la vitesse mesurée erronée et l’utilisation d’un seul anémomètre pour une éolienne est insuffisante pour représenter la valeur moyenne de la vitesse du vent qui apparaît sur l’ensemble des pales [Mas-18] [Lou-16].

Une fausse mesure de la vitesse conduit donc à imposer une consigne non appropriée, qui implique une dégradation de la puissance captée. Pour cela, il est nécessaire de supposer que le système soit dans le régime permanent [Lou-16].

Dans ce cas, on obtient l'équation dynamique suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - C_{visq} = 0 \quad (1.16)$$

On suppose que le couple des frottements visqueux est négligeable ( $C_{visq} = 0$ ), on obtient :

$$C_g = C_{em} \quad (1.17)$$

Une estimation du couple aérogénérateur est nécessaire pour la détermination du couple électromagnétique de réglage

$$C_{em}^* = \frac{C_{aer_{est}}}{G} \quad (1.18)$$

Où  $C_{em}^*$  est le couple électromagnétique de réglage et  $C_{aer_{est}}$  le couple d'aérogénérateur estimé dont :

$$C_{aer_{est}} = c_p \frac{\rho S}{2\Omega_{est}^3} v_{vent_{est}}^3 \quad (1.19)$$

avec

$$\Omega_{est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (1.20)$$

et

$$v_{vent_{est}} = \frac{\Omega_{est} R}{\lambda} \quad (1.21)$$

En combinant ces équations on obtient :

$$C_{em}^* = \frac{c_p \rho R^5 \Omega_{mec}^3}{2G^3 \lambda^3} \quad (1.22)$$

Pour extraire le maximum de la puissance, on doit fixer la valeur de la vitesse relative à une valeur optimale qui correspond au coefficient de puissance maximum, tel que :

$$C_{em}^* = \frac{c_p \rho R^5 \Omega_{mec}^3}{2G^3 \lambda_{opt}^3} \quad (1.23)$$

Le schéma bloc du dispositif de la commande est représenté dans la figure (1.11) :

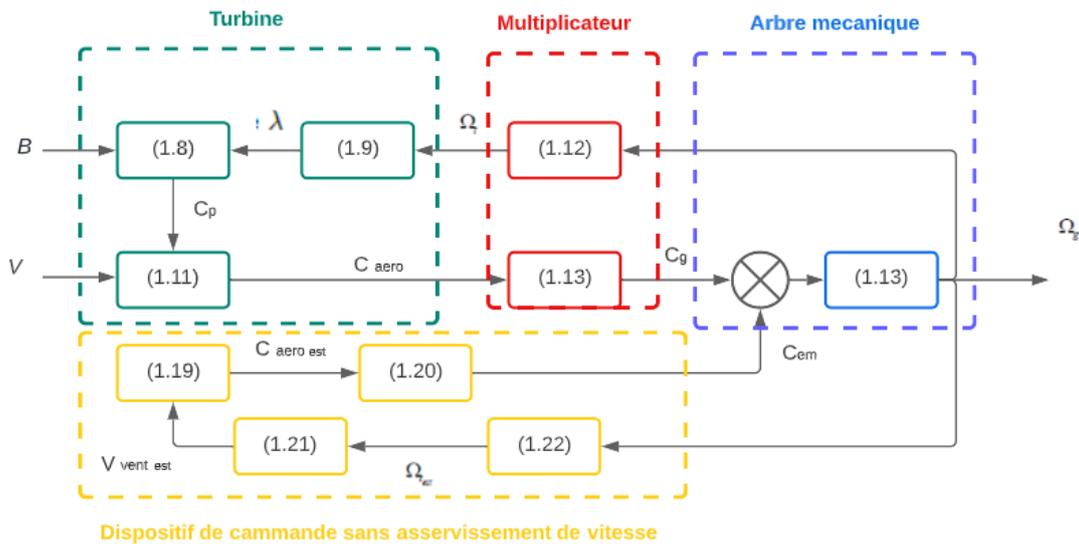


FIGURE 1.11 – Schéma bloc de la commande sans asservissement de la vitesse

## 1.9.2 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse

Cette stratégie consiste à maintenir la vitesse de rotation de la génératrice à une valeur de consigne, laquelle sera maximale si le coefficient de puissance était maximum. Pour cela, il faut optimiser la vitesse relative  $\lambda$  [Mas-18].

On utilisera la loi linéaire pour la régulation de la vitesse mécanique qu, selon [Lou-16], s'écrit comme :

$$C^*_{em} = Reg(\Omega^*_{mec} - \Omega_{mec}) \quad (1.24)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{opt}$  (on fixe l'angle de calage  $\beta = 2$ ).

où  $Reg$  est le régulateur de vitesse et  $\Omega_{mec}$  la vitesse mécanique de référence.

La vitesse mécanique de référence  $\Omega^*_{mec}$  peut être égale à la vitesse de la turbine de référence si le gain du multiplicateur était pris en compte [Mas-18] [Lou-16] :

$$\Omega^*_{mec} = G\Omega^*_t \text{ Avec : } \Omega^*_t = \frac{\lambda_{opt} V_{vent}}{R} \quad (1.25)$$

On représente alors le schéma bloc de cette commande dans la figure (1.12) : **Régulateur PI** :

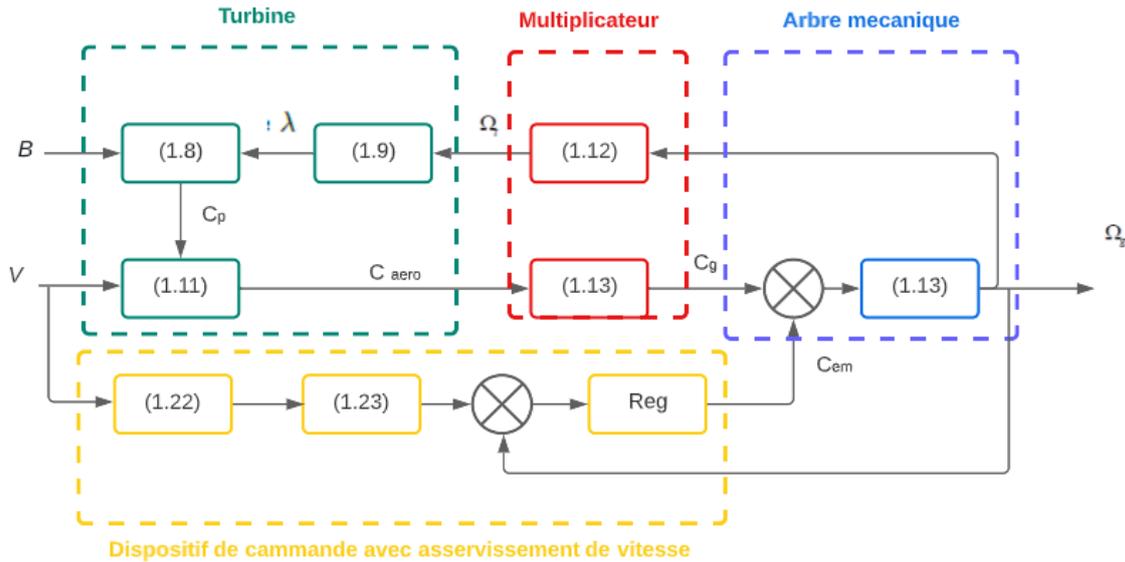


FIGURE 1.12 – Schéma bloc de la commande avec asservissement de la vitesse

La fonction du transfert liant la vitesse au couple s'écrit comme suit :

$$\frac{\Omega}{C_{em} - C_{mec}} = \frac{1}{Js + f_v} \quad (1.26)$$

Le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse est illustré dans la figure (1.13) : La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$F_{BO}(s) = \frac{K_p s + K_i}{Js^2 + f_v s} \quad (1.27)$$

et en boucle fermée :

$$F_{BF}(s) = \frac{\frac{K_p s + K_i}{J}}{s^2 + \frac{k_p f}{J} + \frac{K_i}{J}} \quad (1.28)$$

Connaissant la forme canonique suivante :

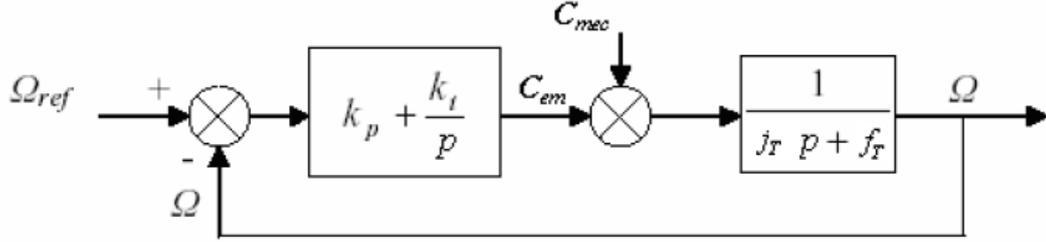


FIGURE 1.13 – schéma fonctionnel du régulateur PI [Kel-11]

$$F(s) = \frac{2\xi\omega_n + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.29)$$

et par identification de (1.28) avec l'équation (1.29) :

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = \frac{K_p s + f}{J} \\ \omega_n^2 = \frac{K_i}{J} \end{cases} \quad (1.30)$$

nous obtenons alors les relations de  $K_p$  et  $K_i$  :

$$\begin{cases} K_p = 2\xi\omega_n J - f \\ k_i = \omega_n^2 J \end{cases} \quad (1.31)$$

On prend la valeur du coefficient d'amortissement  $\xi = 0.7$  afin d'optimiser les performances dynamiques et la stabilité du système [Lou-16].

## 1.10 Résultats de la simulation :

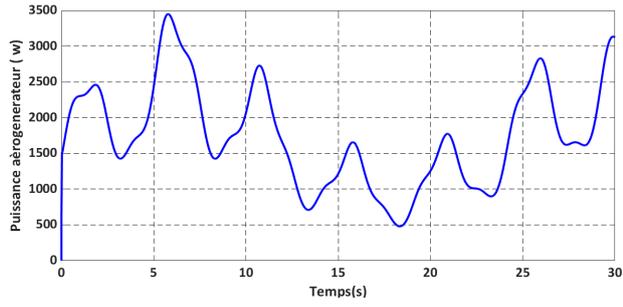
Pour effectuer la simulation de la turbine, nous prenons un profil de vent donné par la relation suivante [Lou-16] :

$$V_{vent} = 7.5 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (1.32)$$

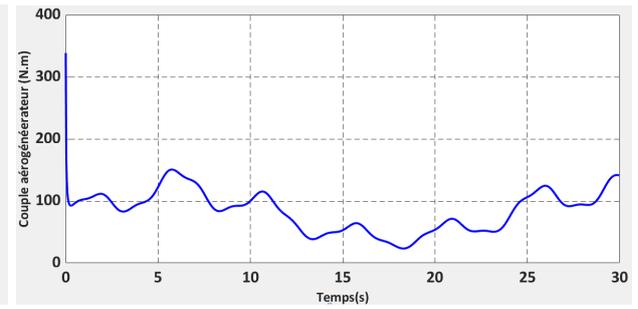
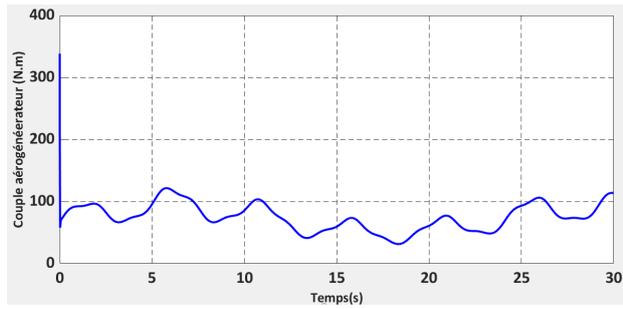
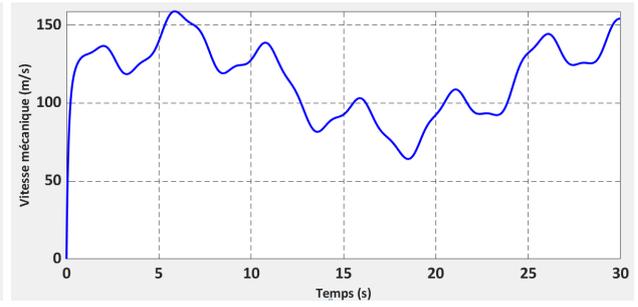
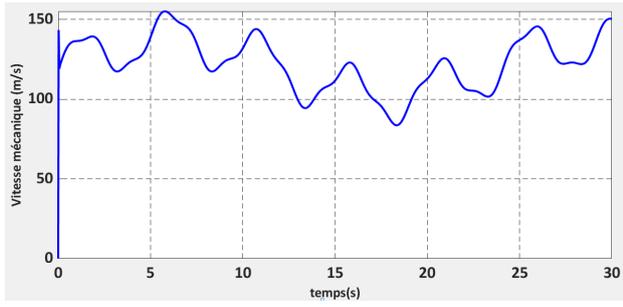
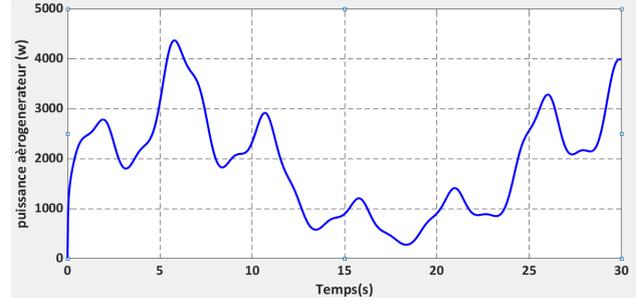
D'autre part, nous avons considéré que l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur nominale  $\beta = 2$  et un coefficient de puissance  $C_{p_{max}} = 0.36$  qui correspond au ratio de vitesse fixé à la valeur  $\lambda = 7$ .

La figure (1.14) illustre les résultats de simulation de la turbine avec deux stratégies de contrôle MPPT (sans asservissement de la vitesse mécanique et avec asservissement de la vitesse mécanique par un régulateur PI) en utilisant MATLAB/Simulink.

Avec asservissement de vitesse



Sans asservissement de vitesse



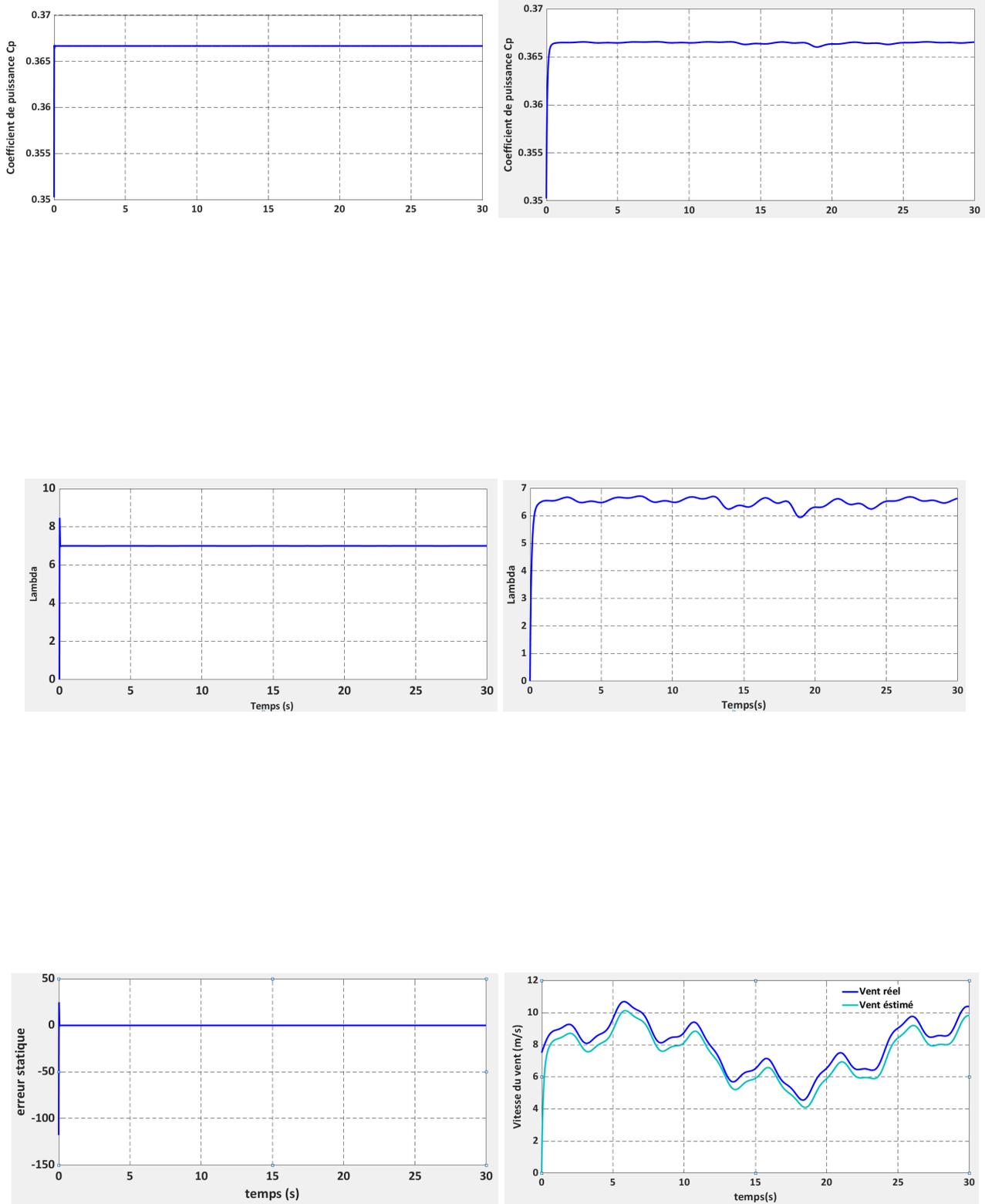


FIGURE 1.14 – Résultat de la simulation de la turbine avec et sans asservissement de la vitesse

### 1.10.1 Interprétation des résultats

Ces deux structures de commande ont été simulées en considérant un profil de vent autour d'une moyenne de 10,37 m/s.

En observant les résultats pour les deux stratégies de commande, nous remarquons que la puissance et le couple aérodynamique varient proportionnellement avec la variation du profil du vent.

Concernant les résultats de simulation de la régulation sans asservissement de la vitesse mécanique, nous notons que  $\lambda$  et le coefficient de puissance  $C_p$  suivent leurs références, sauf que le temps de réponse est important au démarrage et l'erreur statique dans le régime permanent est non nulle. Ceci à pour cause l'absence de régulation de la vitesse de la turbine.

Pour la correction des erreurs statiques et pour réduire le temps de réponse, il est indispensable d'ajouter un système d'asservissement de la vitesse mécanique, en prenant le coefficient de puissance à une valeur maximale de 0.37 tout en fixant l'angle de calage à 2. Nous observons que la vitesse relative et le coefficient de puissance suivent la référence sans aucun dépassement au régime transitoire ni au régime permanent malgré l'existence d'une légère fluctuation.

## 1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de la turbine éolienne et les techniques de commande d'extraction du maximum de puissance ont été présentées.

Nous avons modélisé la turbine ainsi que le multiplicateur au premier lieu, puis nous avons développé une stratégie de maximisation de puissance en utilisant un MPPT sans et avec asservissement de la vitesse mécanique. Les résultats obtenus pour les deux cas sont discutés.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la génératrice à double alimentation et à sa commande vectorielle directe et indirecte en adoptant la stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

## Chapitre 2

# Modélisation de la MADA et sa stratégie de commande

### 2.1 Introduction

La chaîne de conversion électrique privilégiée dans ce travail est basée sur l'utilisation d'une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, couramment appelée Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), associée à un convertisseur côté machine. Ce choix étant justifié par le fait que cette machine est actuellement le générateur électrique le plus répandu dans les systèmes éoliens à vitesse variable de forte puissance [Lou-16].

La première partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation mathématique de la MADA dans le référentiel de Park et au développement d'une commande vectorielle directe en utilisant le régulateur type Proportionnel-Intégral pour commander indépendamment les puissances actives et réactives issues du système aérogénérateur.

La deuxième partie est consacrée au développement d'un algorithme d'une commande indirecte des puissances actives et réactives en fonction des courants rotoriques.

### 2.2 Présentation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux cotés de la machine ; ce qui constitue un avantage principal, surtout dans les domaines de l'entraînement et de la génération à vitesse variable et où le glissement de la machine à double alimentation peut être modifié au moyen de l'association de convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois.[Kel-11][Gho,Dib-19]

### 2.3 Principe de fonctionnement de la MADA

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique, mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [Gho,Dib-19].

Effectivement, la machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en mode moteur et en dessus pour être en mode générateur. Dans ce type de machine, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hyposynchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [Dje,Mel-20 ]

La figure (2.1) montre l'allure de la caractéristique mécanique couple/vitesse de la machine asynchrone à double alimentation

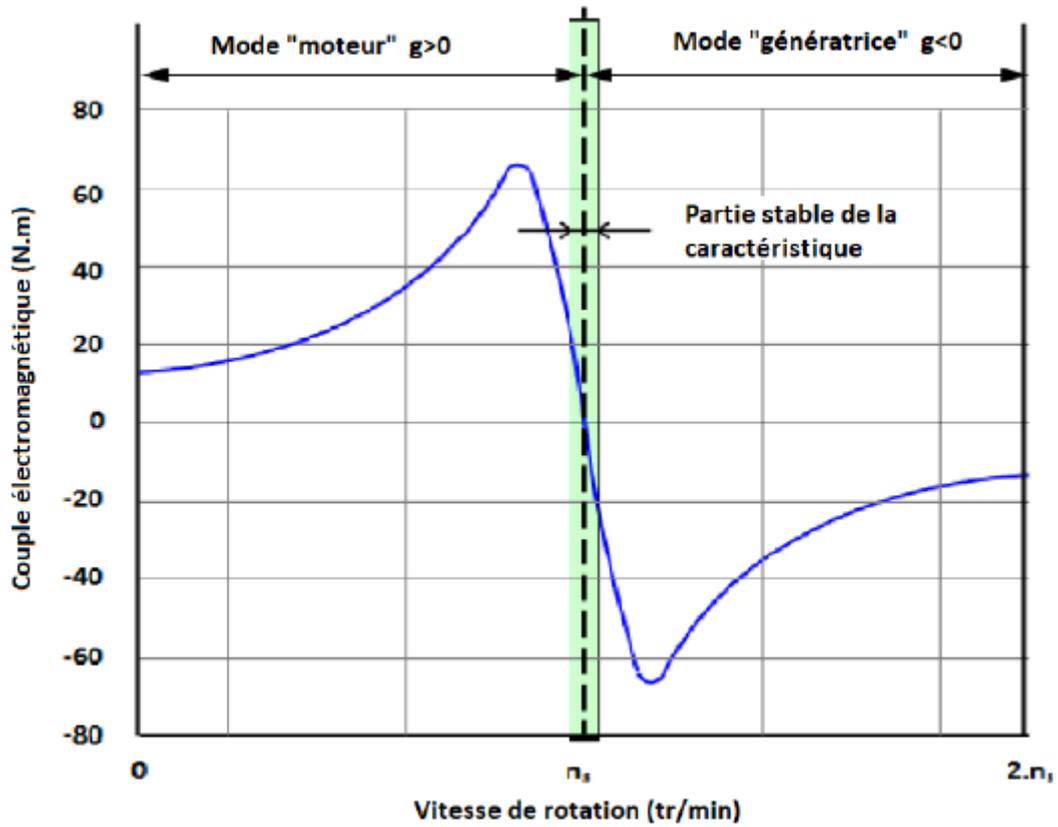


FIGURE 2.1 – Caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [Dje,Mel-20]

D'après la figure (2.1), on constate que la génératrice asynchrone à double alimentation peut fonctionner dans différents régimes, selon la valeur du glissement :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s} \tag{2.1}$$

tel que :  $f_s = f_r + f_m$  où  $f_m$  est la fréquence de rotation du rotor .

Nous allons présenter par la suite ces différents modes de fonctionnement.

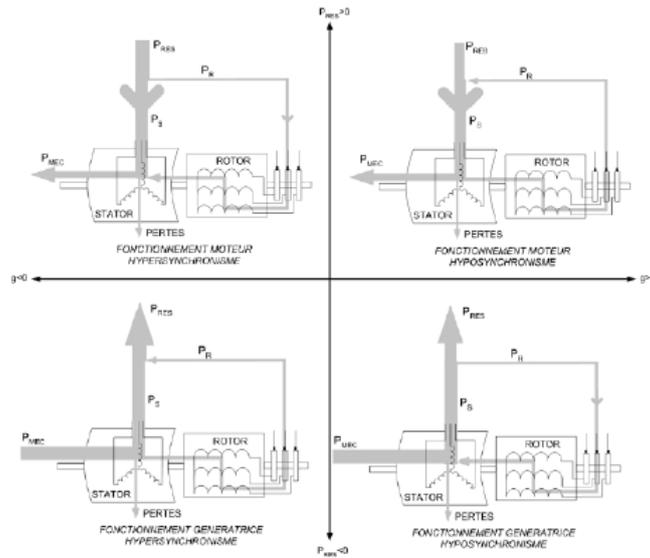


FIGURE 2.2 – Fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants couple/vitesse [Lou-16]

## 2.4 Avantages et inconvénients de la MADA

### 2.4.1 Avantages

Comme avantages de la MADA, on peut citer [Kel-11] :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesses.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même en être fournisseur.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.

### 2.4.2 Inconvénients

On peut citer les inconvénients suivants [Kel-11] :

- La MADA est une machine asynchrone, donc de structure non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande.
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue ; la nouveauté peut effrayer.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multiconvertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Son fonctionnement nécessite un nombre de convertisseurs (parfois on utilise deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus important que la machine à cage (toujours un seul redresseur et un onduleur).

- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, qui est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle, la stabilité est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité de la machine

## 2.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Avant d'aborder la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il faut réaliser sa modélisation. Cette dernière va nous permettre de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande vectorielle ainsi que sa simulation.

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices. Celles-ci sont indispensables pour une réalisation technologique de la commande, mais elles écartent le modèle obtenu de la réalité du processus à représenter [Kel-11].

### 2.5.1 Hypothèses simplificatrices

Afin d'avoir des résultats précis et des calculs simplifiés, on propose les hypothèses simplificatrices suivantes [Kel-11] [Lou-16] :

- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Les pertes fer dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligées.
- La machine présente une parfaite symétrie, tant au stator qu'au rotor.
- On suppose que les circuits magnétiques sont non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

Pour modéliser la machine représentée dans la figure (2.3) nous allons écrire les équations en triphasé des différentes grandeurs, puis nous appliquerons la transformation de Park pour passer en biphasé.

Finalement, on développe un algorithme de commande de la machine par un onduleur.

### 2.5.2 Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s[I_s] + \frac{d\phi_s}{dt} \\ [V_r] = R_r[I_r] + \frac{d\phi_r}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants en faisant intervenir les différentes inductances :

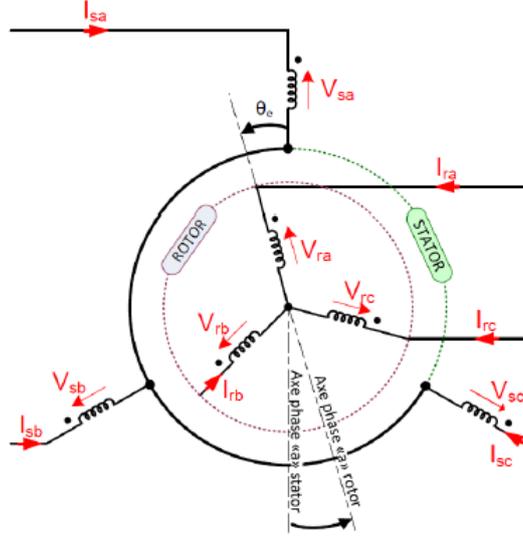


FIGURE 2.3 – Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA [Kra-13]

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{rs}][I_r] \\ [\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (2.3)$$

où  $R_s$  et  $R_r$  sont, respectivement, les résistances statorique et rotorique par phase,  $[l_s]$  et  $[l_r]$  les matrices d'inductance du stator et du rotor respectivement,  $I_s$  et  $I_r$  les courants dans les enroulements du stator et du rotor respectivement, et  $[M_{sr}]$  les matrices des inductances mutuelles entre une phase d'une armature et une phase de l'autre armature.

### 2.5.3 Modèle de la MADA dans le référentiel de Park

Afin de faciliter la commande d'une machine asynchrone, on doit réduire le nombre de grandeurs à contrôler et limiter les variations temporelles. Pour y arriver, on fait appel à la transformation de Park [Par-29]; cette dernière est une opération mathématique qui permet de passer d'un repère triphasé ( $ABC$ ) de la machine à un repère biphasé ( $dq$ ) : l'axe direct  $d$  et l'axe de quadrature arrière  $q$ , mutuellement couplés et l'angle entre eux est appelé angle de Park.

La matrice de Park et son inverse s'écrivent comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

où  $\theta$  est l'angle entre l'axe de la phase  $A$  et l'axe  $d$ , Le facteur  $\frac{2}{3}$  permet la conservation des amplitudes des courants, tensions et flux. Par contre, il faut introduire le facteur  $\frac{3}{2}$  pour conserver les puissances et les couples [Dje,Mel-20].

La relation entre les angles statoriques  $\theta_s$  et les angles rotoriques  $\theta_r$  est :

$$\theta_s = \theta_r - \theta \quad (2.6)$$

Après dérivation, on obtient :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \quad (2.7)$$

### 2.5.3.1 Équation de la machine asynchrone dans le référentiel $dq$

Après l'utilisation de la transformation de PARK nous allons présenter les équations de la MADA exprimées dans le repère  $dq$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \phi_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_r \phi_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

- L'équation mécanique s'écrit :

$$C_{em} = C_r + j \frac{d\omega}{dt} + f\omega \quad (2.10)$$

avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (i_{rq} \cdot \phi_{sd} - i_{dr} \cdot \phi_{sq}) \quad (2.11)$$

$$C_{em} = -\frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (i_{rq} \cdot \phi_{sd} - i_{dr} \cdot \phi_{sq}) \quad (2.12)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{qs} - V_{ds} I_{ds} \end{array} \right. \quad (2.13)$$

## 2.5.4 Association de la MADA avec un onduleur MLI

### 2.5.4.1 Onduleur de tension :

L'onduleur de tension est un convertisseur qui permet d'obtenir une tension alternative de fréquence et valeur efficace fixe ou réglable à partir d'une source de tension continue. Il est constitué d'une cellule de commutation, généralement à transistor ou à thyristor pour les grandes puissances. Pour sa commande, on utilise la commande par modulation de Largeur d'impulsions (MLI). [Kra-13]

Nous associons notre génératrice du côté rotor à un onduleur à trois bras, chaque bras contient deux interrupteurs du type MOSFET commandés à l'amorçage et au blocage.

### 2.5.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

La technique de modulation de largeur d'impulsion, dite sinus – triangle, consiste à comparer un signal triphasé sinusoïdal de référence appelé modulatrice avec un déphasage de 120 entre ses phases à une porteuse triangulaire de fréquence  $F_p$  et d'amplitude  $V_p$ . Notons que  $F_p$  doit être largement supérieure à la fréquence du signal sinusoïdal [Dje,Mel-20] [Sef,Bel-20].

La tension de référence  $V_{ra}^*$  est obtenue par les courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  après l'application de la transformation inverse de Park, puis comparée avec la porteuse triangulaire [Kra-13].

$$\begin{cases} Si & V_{ra}^* > V_p \Rightarrow V_{aN} = U \\ Si & V_{ra}^* < V_p \Rightarrow V_{aN} = -U \end{cases} \quad (2.14)$$

La relation entre les tensions de références et les tensions de sortie de l'onduleur est [Kra-13] :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Il existe deux paramètres caractérisant la commande [Dje,Mel-20] [Lou-16] :

**Indice de modulation  $m$**  : qui représente le rapport entre la fréquence de modulation et la fréquence de référence.

$$m = \frac{F_p}{F} \quad (2.16)$$

**Coefficient de réglage  $r$**  qui représente le rapport entre l'amplitude du signal de référence et la valeur crête de la porteuse.

$$r = \frac{V_N}{V_p} \quad (2.17)$$

## 2.5.5 Commande vectorielle

### 2.5.5.1 Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle permet un contrôle indépendant des puissances actives et réactives délivrées par la MADA, en commandant séparément le couple électromagnétique et le flux de la machine asynchrone. Son principe est basé sur le choix d'un repère de référence lié aux flux que l'on désire orienter.[Dje,Mel-20]

En effet, le référentiel lié au champ tournant peut être orienté de telle sorte que l'axe  $d$  de ce référentiel coïncide avec un des flux de la machine (statorique, rotorique ou d'entrefer). Ces différentes orientations nous permettent d'obtenir plusieurs manières de contrôler la machine asynchrone via les convertisseurs.

Selon le choix du référentiel, les conditions d'orientation sont exprimées par :

— Orientation du flux rotorique suivant l'axe  $d$  :

$$\varphi_{rq} = 0 \Rightarrow \varphi_r = \varphi_{rq} \quad (2.18)$$

— Orientation du flux statorique suivant l'axe  $d$  :

$$\varphi_{sq} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sd} \quad (2.19)$$

— Orientation du flux statorique suivant l'axe  $q$  :

$$\varphi_{sd} = 0 \Rightarrow \varphi_s = \varphi_{sq} \quad (2.20)$$

Cela permet de simplifier les équations des flux et du couple électromagnétique de la MADA en changeant de repère.

### 2.5.5.2 Orientation du flux statorique

L'orientation du flux statorique sert à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine asynchrone identique à celui d'une machine à courant continu où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Le flux statorique tourne à la vitesse de synchronisme. Il est visualisé par le vecteur flux statorique qui donne une idée visuelle de la phase et de l'amplitude du flux .

Dans le cas de la MADA, nous avons envisagé d'établir une commande vectorielle par orientation du flux statorique sur l'axe  $d$ . [ker-13]

En tenant compte de la relation (2.20), l'équation (2.11) devient :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (i_{rq} \varphi_{sd}) \quad (2.21)$$

On constate que le problème du couplage entre les deux axes direct et en quadrature est éliminé et le couple électromagnétique ne dépend que de la composante directe du flux statorique.

La tension aux bornes d'une phase  $i$  du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{si} = R_s i_{si} + \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.22)$$

tel que  $i = 1, 2, 3 \dots$

En négligeant la résistance du bobinage statorique  $R_s$  pour le cas des machines de moyenne et forte puissance généralement employées dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne, cette relation peut être réécrite sous la forme :

$$V_{si} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.23)$$

On suppose que les tensions du réseau soient stables, ce qui implique que le flux statorique est constant, on peut écrire alors [Lou-16] :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (2.24)$$

La figure (2.4) explique le principe de l'orientation du flux statorique.

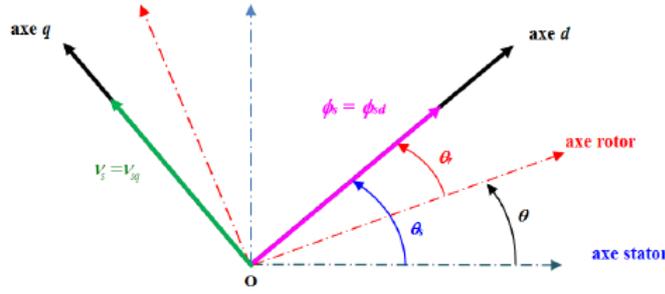


FIGURE 2.4 – Principe de la commande vectorielle par orientation du flux statorique

## 2.5.6 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

### A. Tension rotorique

$$\begin{cases} V_{rd} = \sigma.L_r.\frac{di_{rd}}{dt} + R_r.i_{rd} - \sigma.L_r.\omega.i_{rq} + \frac{M_{sr}}{L_s}\frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{rq} = \sigma.L_r.\frac{di_{rq}}{dt} + R_r.i_{rq} - \sigma.L_r.\omega.i_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_s}\omega_r\frac{d\phi_{sd}}{dt} \end{cases} \quad (2.25)$$

où  $\sigma$  est le coefficient de dispersion.

On a :

$$\begin{cases} fem_d = -\sigma.L_r.\omega.i_{rq} + \frac{M_{sr}}{L_s}\frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ fem_q = -\sigma.L_r.\omega.i_{rd} + \frac{M_{sr}}{L_s}\omega_r\frac{d\phi_{sd}}{dt} \end{cases} \quad (2.26)$$

Ce qui rend l'équation (2.25) :

$$\begin{cases} V_{rd} = \sigma.L_r.\frac{di_{rd}}{dt} + R_r.i_{rd} + fem_d \\ V_{rq} = \sigma.L_r.\frac{di_{rq}}{dt} + R_r.i_{rq} + fem_q \end{cases} \quad (2.27)$$

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$\begin{cases} (\sigma.L_r.P + R_r).i_{rd} = V_{rd} - fem_d \\ (\sigma.L_r.P + R_r).i_{rq} = V_{rq} - fem_q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{\sigma.L_r.P + R_r}(V_{rd} - fem_d) \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma.L_r.P + R_r}(V_{rq} - fem_q) \end{cases} \quad (2.28)$$

La figure (2.5) illustre le schéma bloc simplifié du modèle des courants statoriques :

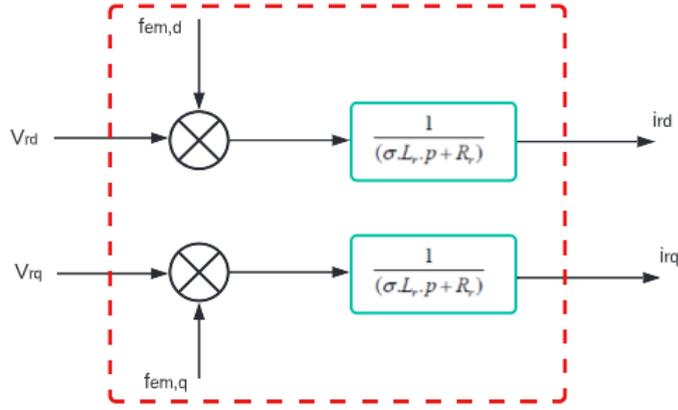


FIGURE 2.5 – Modèle simplifié des courants rotoriques de la MADA

### B. Puissance statorique

Les puissances active et réactive statoriques de la MADA sont données par :

$$\begin{cases} P_s = v_s \cdot i_{sq} \\ Q_s = v_s \cdot i_{sd} \end{cases} \quad (2.29)$$

D'après les relations du flux et l'orientation du flux statorique, on écrit :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ 0 = L_s \cdot i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \end{cases} \quad (2.30)$$

Donc :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd} - M_{sr} i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr} i_{rq}}{L_s} \end{cases} \quad (2.31)$$

En remplaçant (2.31) dans (2.29), on obtient les puissances en fonction des courants rotoriques :

$$\begin{cases} P_s = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -v_s \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} \left( i_{rd} - \frac{\phi_{sd}}{M_{sr}} \right) \end{cases} \quad (2.32)$$

La figure (2.6) illustre le modèle simplifié des puissances statoriques de la MADA exprimé en schéma bloc :

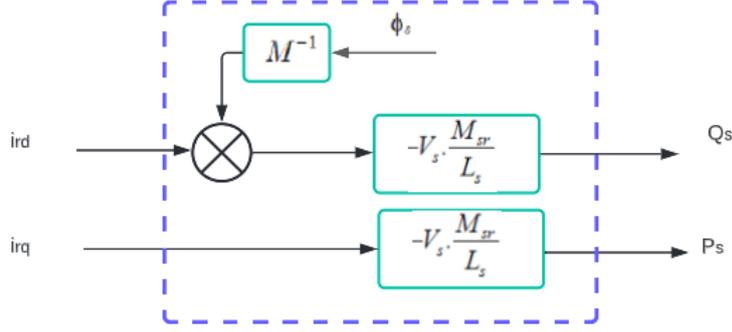


FIGURE 2.6 – Modèle simplifié des puissances statoriques de la MADA

### C. Modèle simplifié de la MADA avec orientation du flux statorique

D'après les modèles illustrés précédemment dans les figures (2.5) et (2.6) on obtient le modèle simplifié de la MADA concernant les enroulements rotoriques :

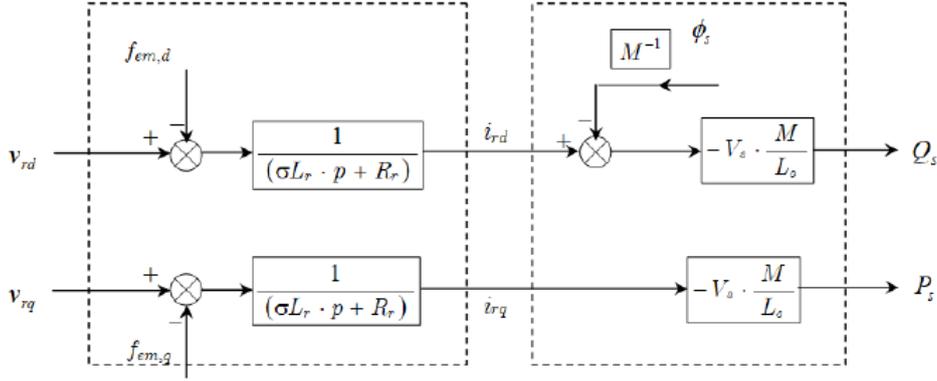


FIGURE 2.7 – Modèle réduit du rotor de la MADA

### D. Termes de couplage

Comme cela est indiqué précédemment, le flux statorique est constant, car les tensions du réseau sont supposées stables, donc :

$$\frac{d\phi_{sd}}{dt} = 0 \quad \text{avec} \quad \phi_{sd} = \frac{v_s}{\omega_s} \quad (2.33)$$

Les termes de couplage deviennent :

$$\begin{cases} fem_d = -g\sigma l_r \omega_s i_{rq} \\ fem_q = +g\sigma l_r \omega_s i_{rd} + g \frac{M_{sr}}{L_s} V_{sq} \end{cases} \quad (2.34)$$

## 2.5.7 Commande directe des puissances active et réactive

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. L'intérêt que présente cette méthode est sa mise en œuvre simple, en plus, elle consiste à placer une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur *PI*, tout en compensant les termes de perturbation et en négligeant les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur de glissement.[Gho,Dib-19]

La figure (2.8) représente le schéma bloc de la commande directe des puissances de la MADA :

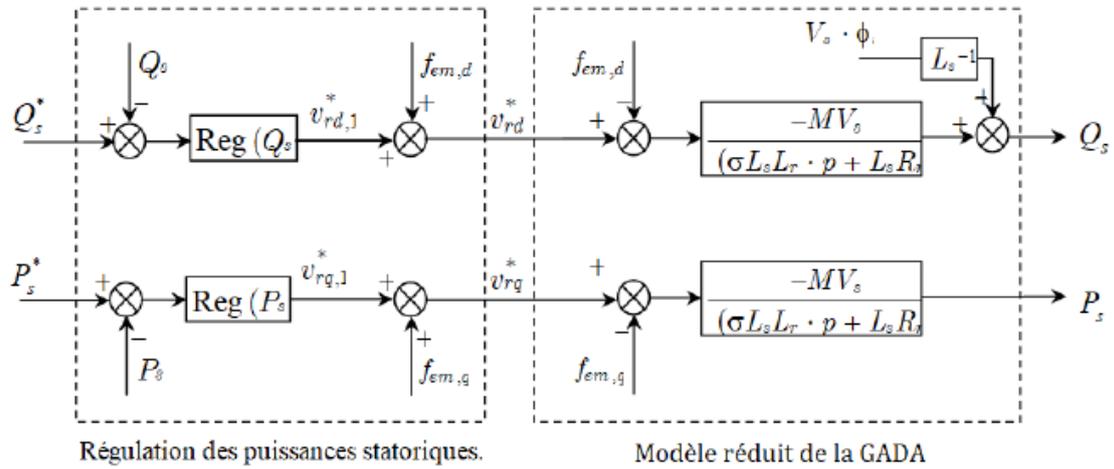


FIGURE 2.8 – Modèle de la commande directe des puissances de la MADA [Dje,Mel-20]

### 2.5.7.1 Dimensionnement du régulateur PI

Le correcteur *PI* (proportionnel-intégral) est une combinaison des deux actions : proportionnel et intégral. Il a pour effet d'assurer la rapidité du système à régler et d'éliminer l'erreur statique entre la valeur mesurée et la valeur de référence [Kel-11]

La figure (2.9) représente la boucle de régulation utilisée pour le contrôle des puissances actives et réactives [Bek-14] : Soit la fonction de transfert du régulateur PI :



FIGURE 2.9 – Schéma de régulation des puissances  $P_s$  et  $Q_s$

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (2.35)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte FTBO de la figure (2.9) est :

$$FTBO(p) = (k_p + \frac{k_i}{p}) \frac{M_{sr} \cdot V_s}{L_s \cdot (R_r + p \sigma \cdot T_r)} \quad (2.36)$$

Nous faisons sortir  $\frac{k_i}{p}$  comme facteur commun pour obtenir :

$$FTBO(p) = \frac{k_i}{p} (p \cdot \frac{k_p}{k_i} + 1) \cdot \frac{M_{sr} \cdot V_s / L_s \cdot R_r}{p \cdot \sigma \cdot T_r + 1} \quad (2.37)$$

tel que :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

On applique la condition :

$$\frac{k_p}{k_i} = \sigma \cdot T_r \quad (2.38)$$

Après la compensation du pole, l'équation finale de la FTBO devient :

$$FTBO(p) = \frac{k_i M_{sr} \cdot V_s}{p L_s \cdot R_r} \quad (2.39)$$

Ensuite, pour avoir un comportement d'un système du premier ordre, la fonction de transfert s'écrit sous la forme [Bek-14] :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (2.40)$$

La fonction de transfert en boucle fermée FTBF de la figure (2.9) sera :

$$FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)} = \frac{1}{1 + p \frac{k_i M_{sr} V_s}{L_s R_r}} \quad (2.41)$$

Par analogie, nous trouvons que :

$$\tau = \frac{k_i M_{sr} V_s}{L_s R_r} \quad (2.42)$$

De l'expression (2.42) et l'expression (2.38), nous avons :

$$\begin{cases} K_p = k_i \cdot \sigma \cdot T_r = \frac{\sigma L_s L_r}{\tau M_{sr} V_s} \\ K_i = \frac{\sigma L_s R_r}{\tau M_{sr} V_s} \end{cases} \quad (2.43)$$

## 2.5.8 Commande indirecte des puissances active et réactive de la MADA

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser. Elle permet de contrôler les puissances actives et réactives en contrôlant les courants rotoriques, ce qui nous autorise à limiter le courant. La commande indirecte permet d'assurer la protection de la génératrice. C'est pour cette raison qu'elle est considérée comme une commande avantageuse [Tre-09] [Dje,Mel-20].

D'autre part, nous définissons les équations des courants rotoriques de référence à partir de l'expression (2.28) en tenant compte de la contrainte (2.33), nous obtenons :

$$\begin{cases} i_{rq} = \frac{-L_s}{M_{sr} V_s} P_s \\ i_{rd} = \frac{-L_s}{M_{sr} V_s} (Q_s - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s}) \end{cases} \quad (2.44)$$

La figure (2.10) représente le schéma bloc de la régulation indirecte :

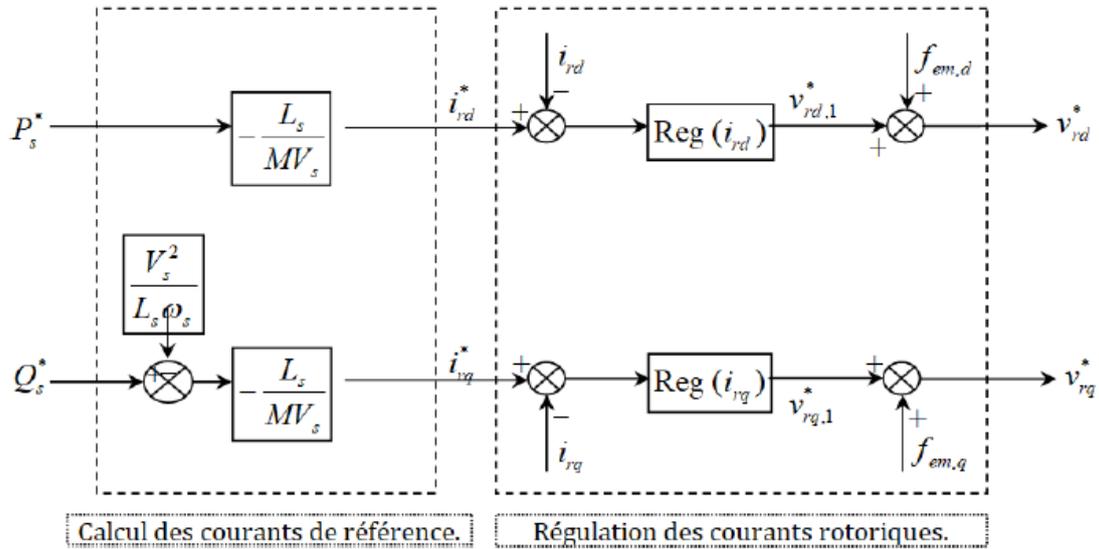


FIGURE 2.10 – Schéma bloc de la régulation en cascade [Dje,Mel-20]

### 2.5.8.1 Dimensionnement du régulateur PI

Soit la fonction de transfert des courants rotoriques direct et en quadrature [Bek-14] :

$$\begin{cases} \frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \\ \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \end{cases} \quad (2.45)$$

La figure (2.11) représente la boucle de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  :

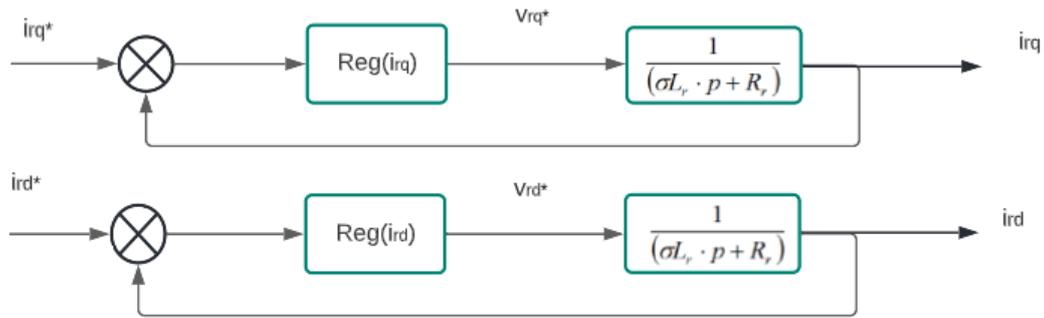


FIGURE 2.11 – Boucle de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  après découplage

On note que les gains des correcteurs  $PI$  sont identiques pour l'axe  $d$  et l'axe  $q$ .



FIGURE 2.12 – Schéma de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$

Soit la fonction de transfert du régulateur  $PI$  :

$$PI(p) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p} \quad (2.46)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte FTBO de la figure (2.12) est :

$$FTBO(p) = (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p}) \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad (2.47)$$

Nous faisons sortir  $\frac{K_{ic}}{p}$  comme facteur commun pour obtenir :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{p} (p \frac{k_{pc}}{k_i} + 1) \cdot \frac{1}{R_r (\frac{\sigma L_r}{R_r} p + 1)} \quad (2.48)$$

tel que :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

On applique la condition :

$$\frac{k_{pc}}{k_{ic}} = \sigma T_r \quad (2.49)$$

Pour obtenir l'équation finale de la FTBO ( compensation de pole ) :

$$FTBO(p) = \frac{k_{ic}}{p R_r} \quad (2.50)$$

Nous remplaçons l'expression (2.49) dans (2.50) pour obtenir :

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + p \frac{R_r}{K_{ic}}} \quad (2.51)$$

Par analogie de l'expression (2.50) par l'expression (2.40) nous trouvons :

$$\tau = \frac{R_r}{K_{ic}} \quad (2.52)$$

Des expressions (2.51) et (2.48), nous avons :

$$\left\{ K_{pc} = K_{ic} \sigma T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau} K_{ic} = \frac{R_r}{\tau} \right. \quad (2.53)$$

## 2.6 Résultat de la simulation

Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés pour la génératrice asynchrone à double alimentation et l'onduleur équipé de commandes directe et indirecte des puissances développées dans le chapitre précédent sont exposés respectivement sur les figures suivantes.

Les grandeurs nominales et les différents paramètres de la MADA sont données dans l'annexe ainsi que la représentation graphique des modèles sous forme de schéma-blocs implantés dans l'environnement logiciel MATLAB /Simulink/SimPowerSystem.

### 2.6.1 Commande directe des puissances active et réactive

a) Puissance statorique active (W)

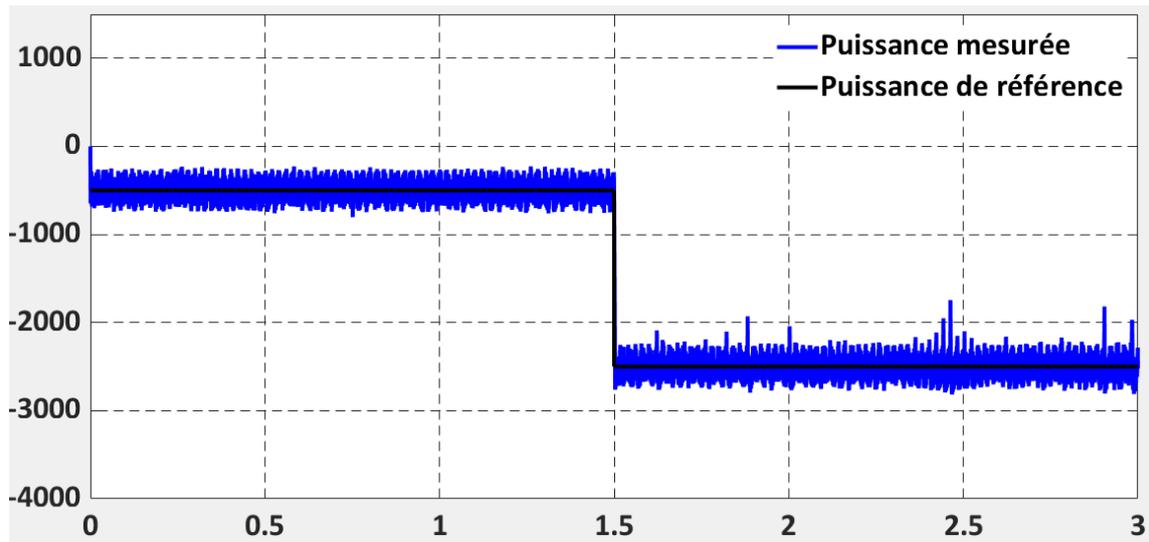


FIGURE 2.13 – Puissance statorique active avec la commande directe des puissances

b) Puissance statorique réactive (Var)

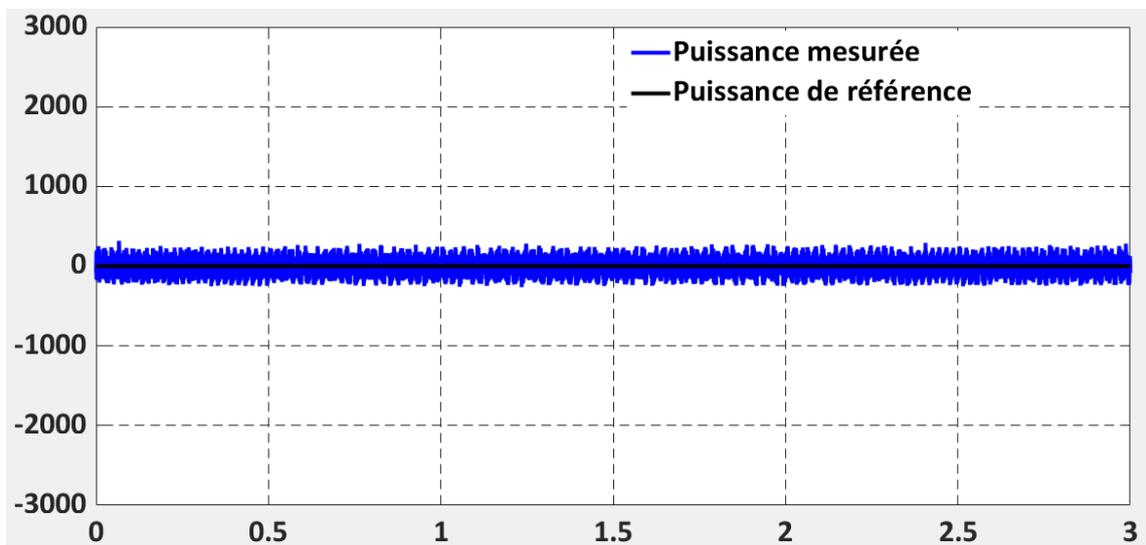


FIGURE 2.14 – Puissance statorique réactive avec la commande directe des puissances

c) Courants rotoriques (A)

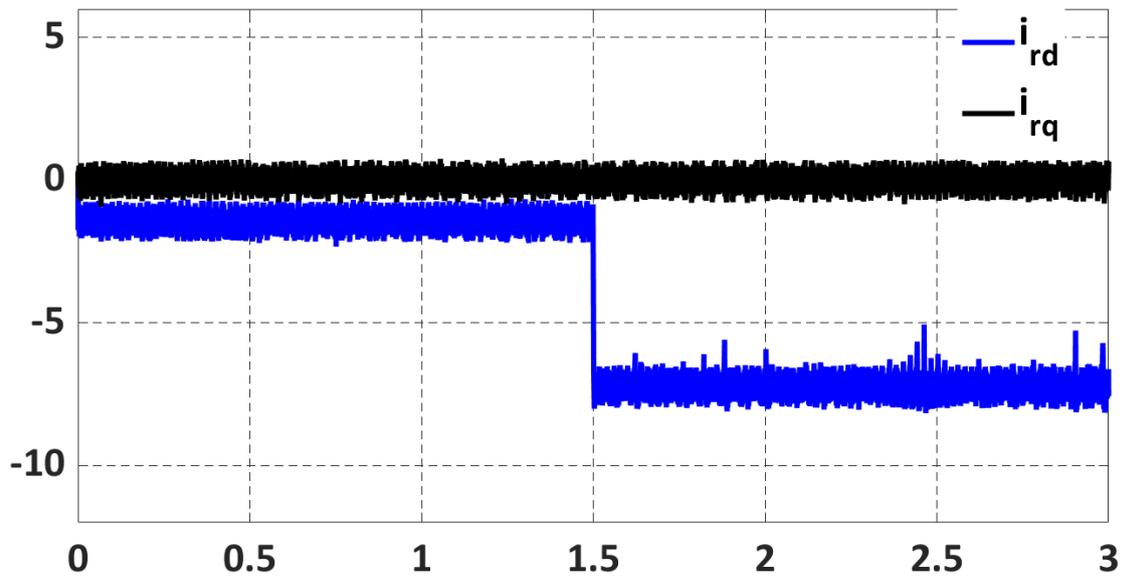


FIGURE 2.15 – Courants rotoriques avec la commande directe des puissances

d) Courant statorique réel  $I_{abc}$  (A)

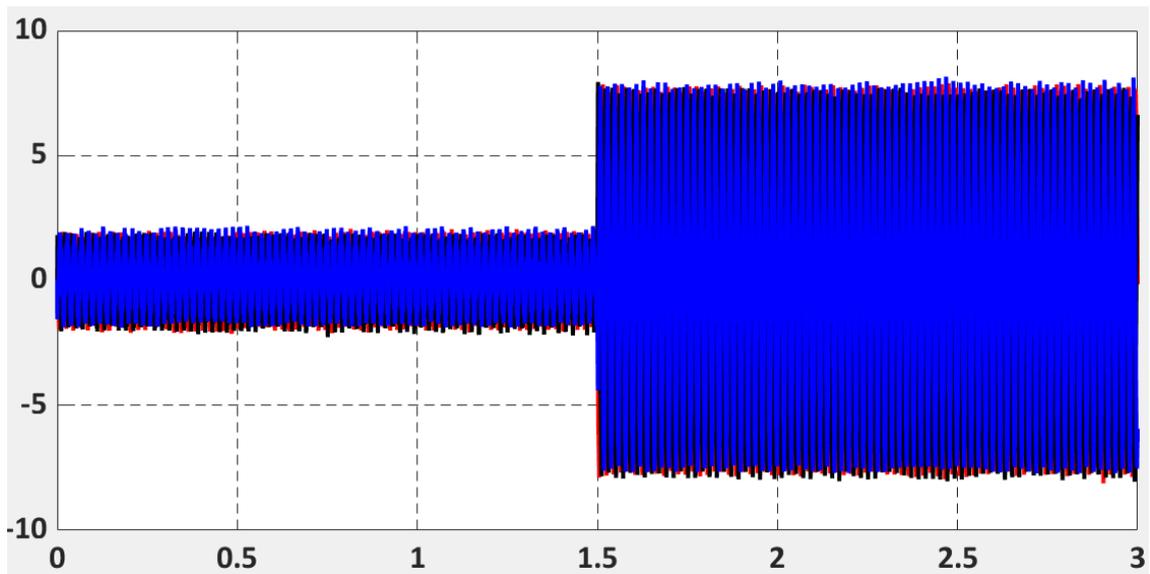


FIGURE 2.16 – Courant statorique réel  $I_{abc}$  avec la commande directe des puissances

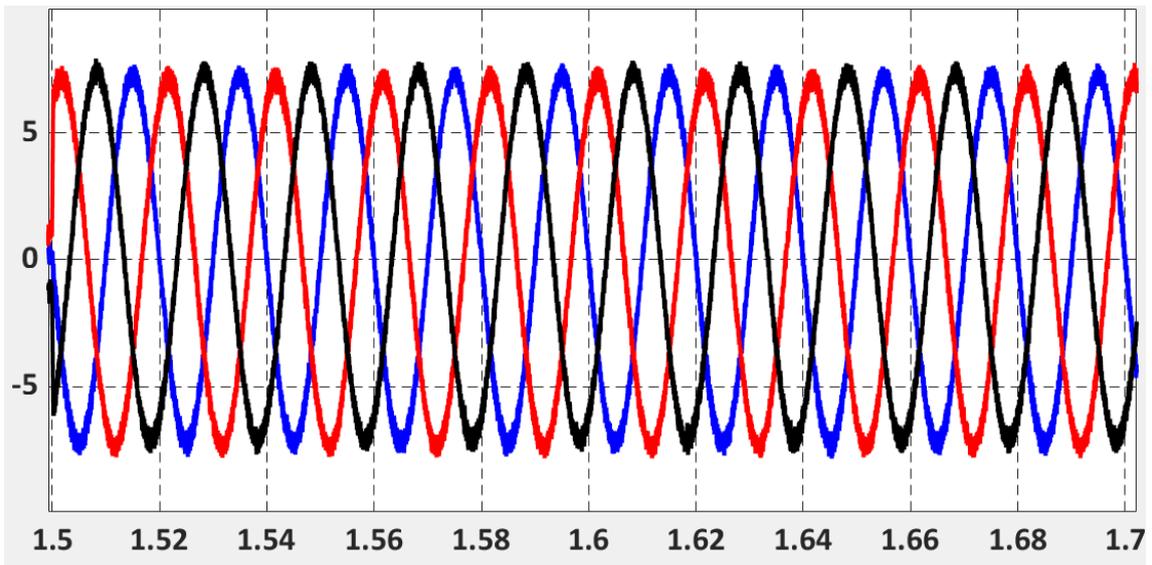


FIGURE 2.17 – zoom sur Courant statorique réel  $I_{abc}$

e) Courant rotorique réel  $I_{abc}$  (A)

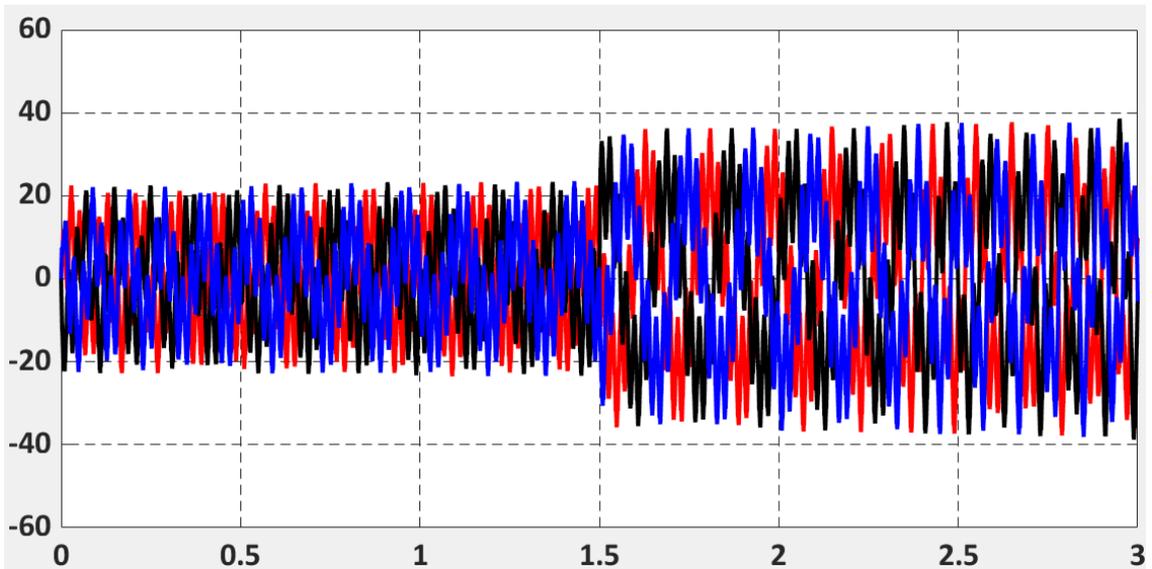


FIGURE 2.18 – Courant rotorique réel  $I_{abc}$  avec la commande directe des puissances

f) Vitesse mécanique (rad/s)

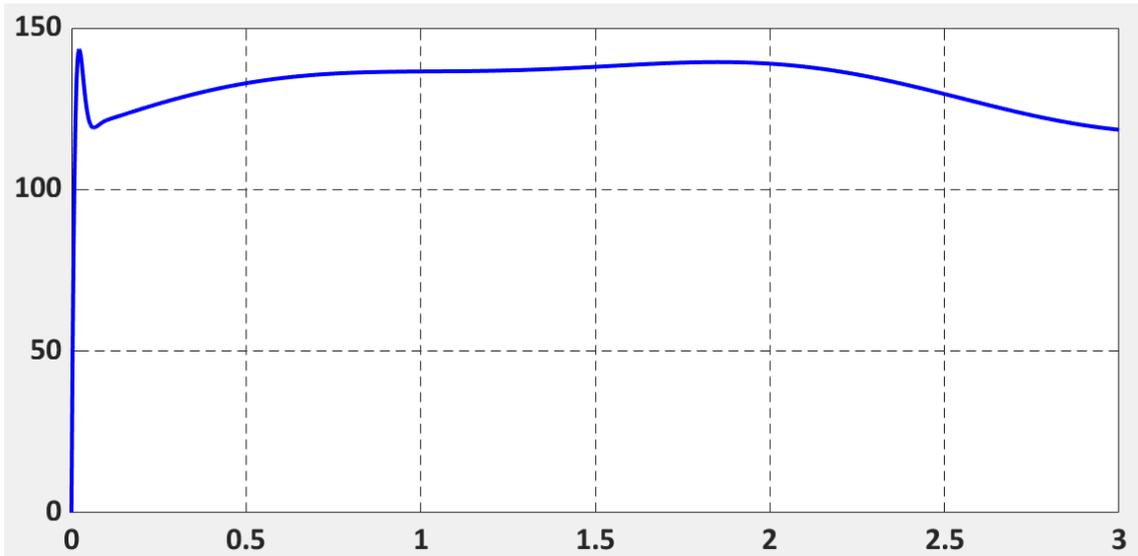


FIGURE 2.19 – Vitesse électrique avec la commande directe des puissances

## 2.6.2 Commande indirecte des puissances active et réactive

a) Puissance statorique active (W)

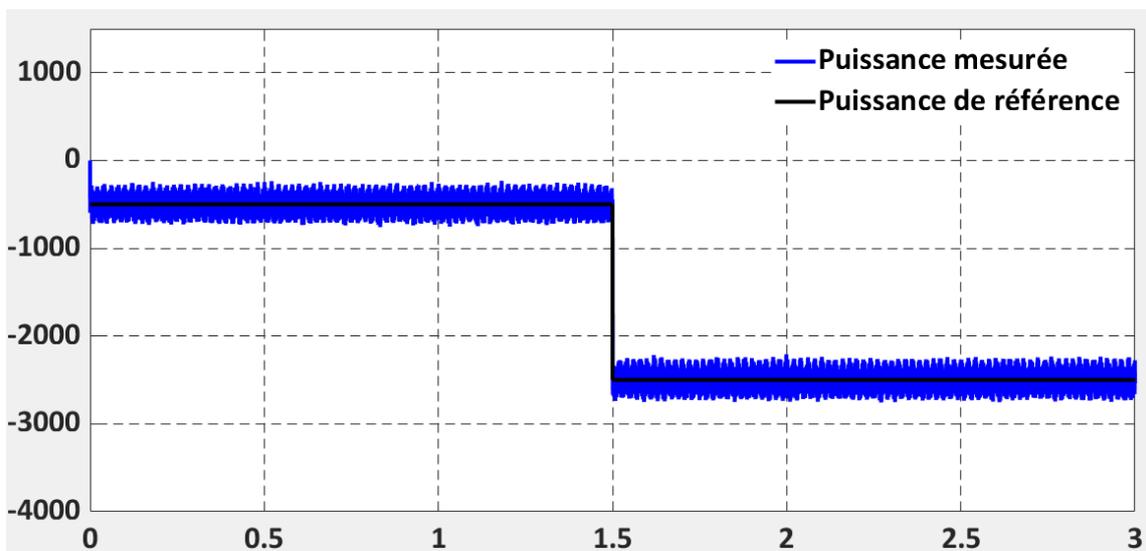


FIGURE 2.20 – Puissance statorique active avec la commande indirecte des puissances

b) Puissance statorique réactive (Var)

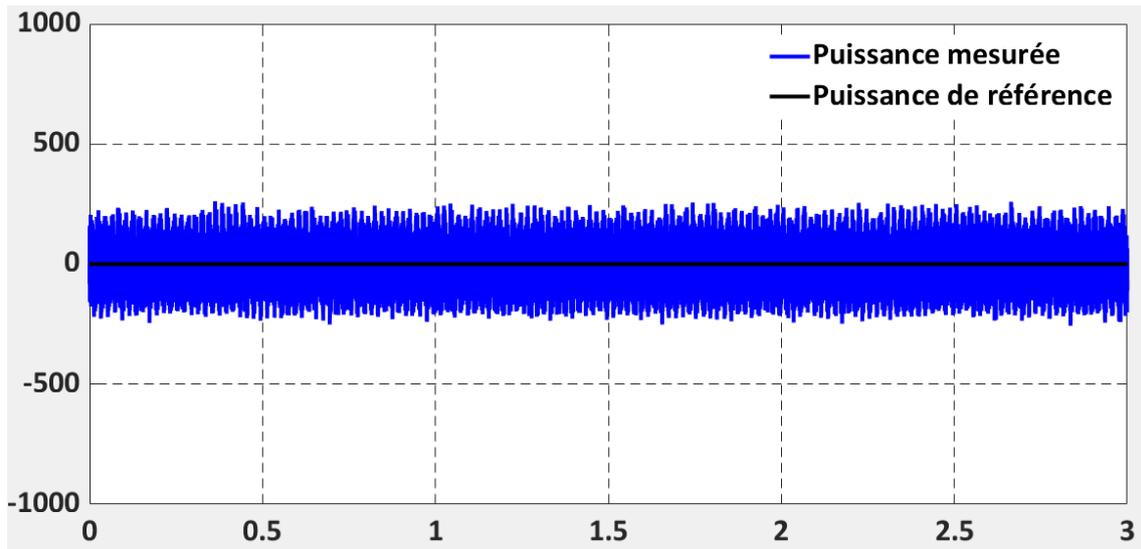


FIGURE 2.21 – Puissance statorique réactive avec la commande indirecte des puissances

c) Courants rotoriques (A)

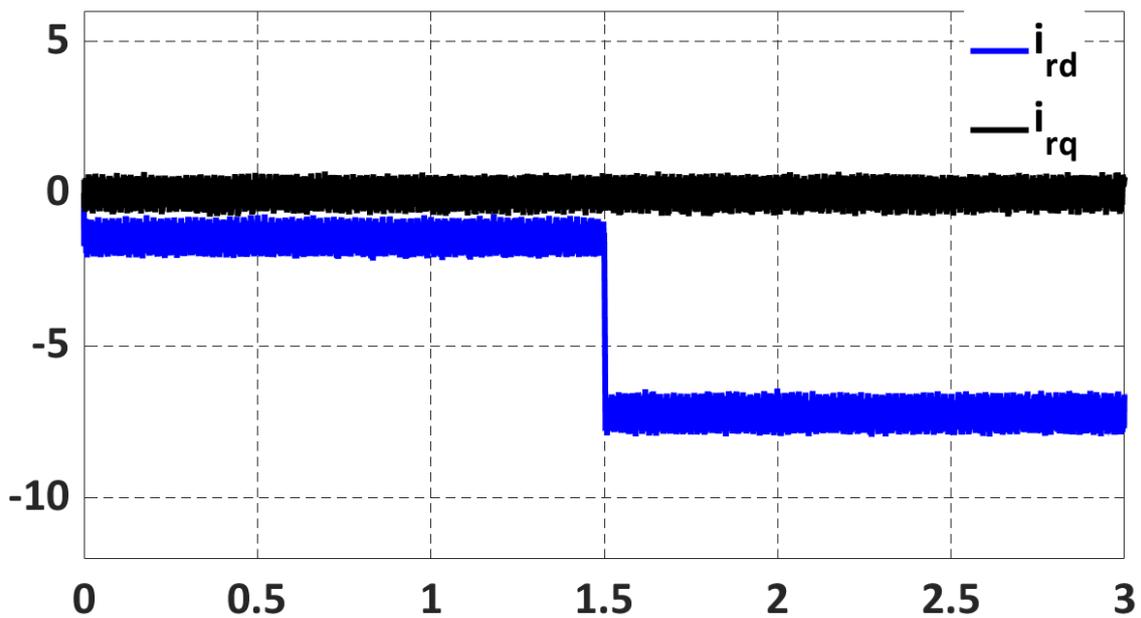


FIGURE 2.22 – Courants rotoriques avec la commande indirecte des puissances

d) Courant statorique réel  $I_{abc}$  (A)

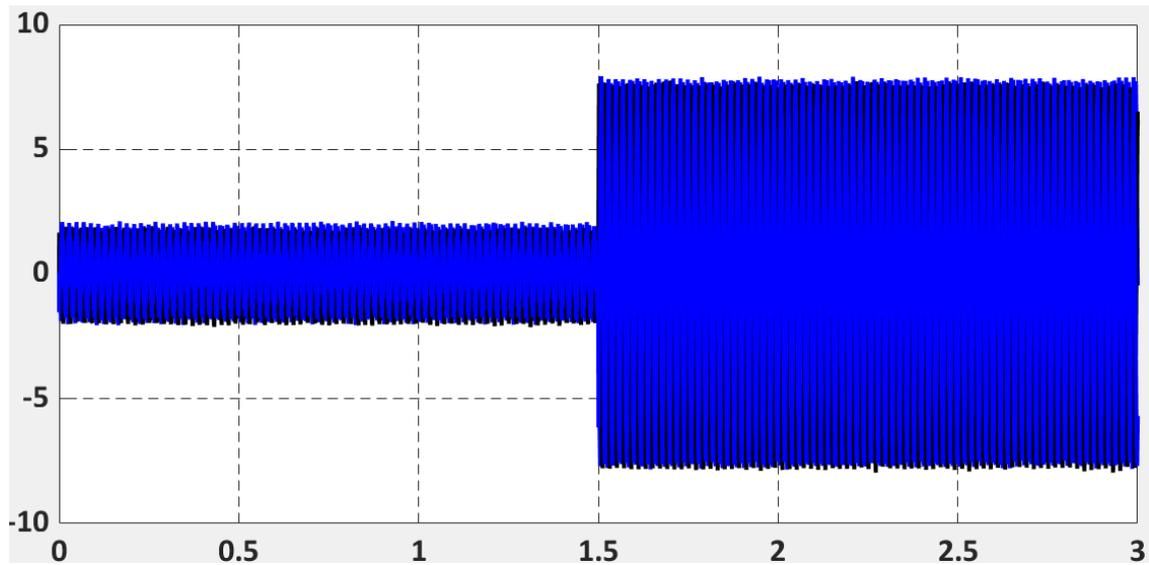


FIGURE 2.23 – Courant statorique réel  $I_{abc}$  avec la commande indirecte des puissances

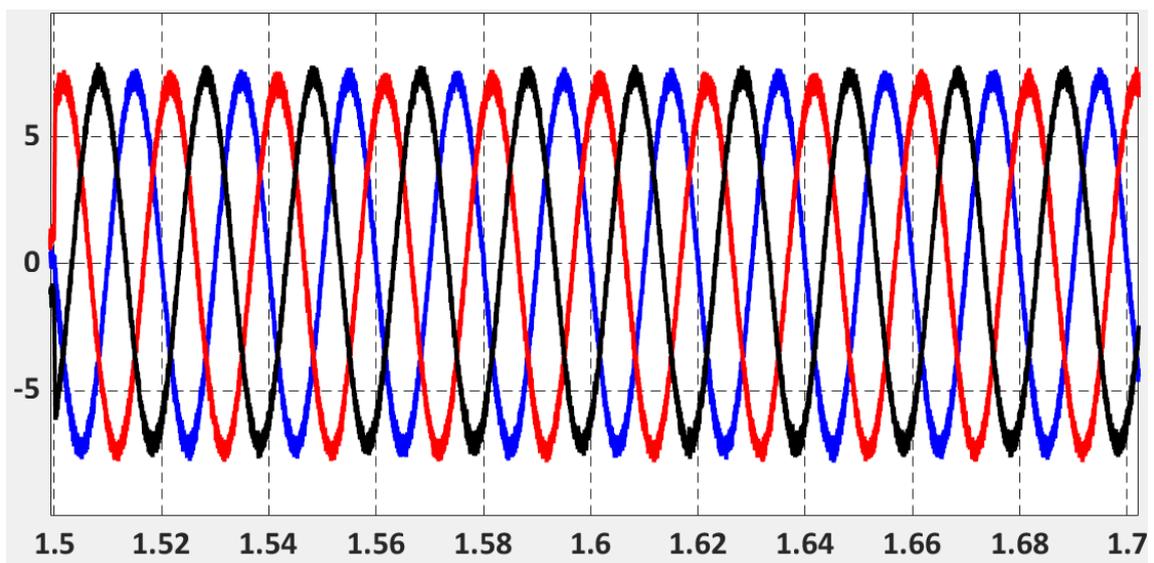


FIGURE 2.24 – zoom sur Courant statorique réel  $I_{abc}$

e) Courant rotorique réel  $I_{abc}$  (A)

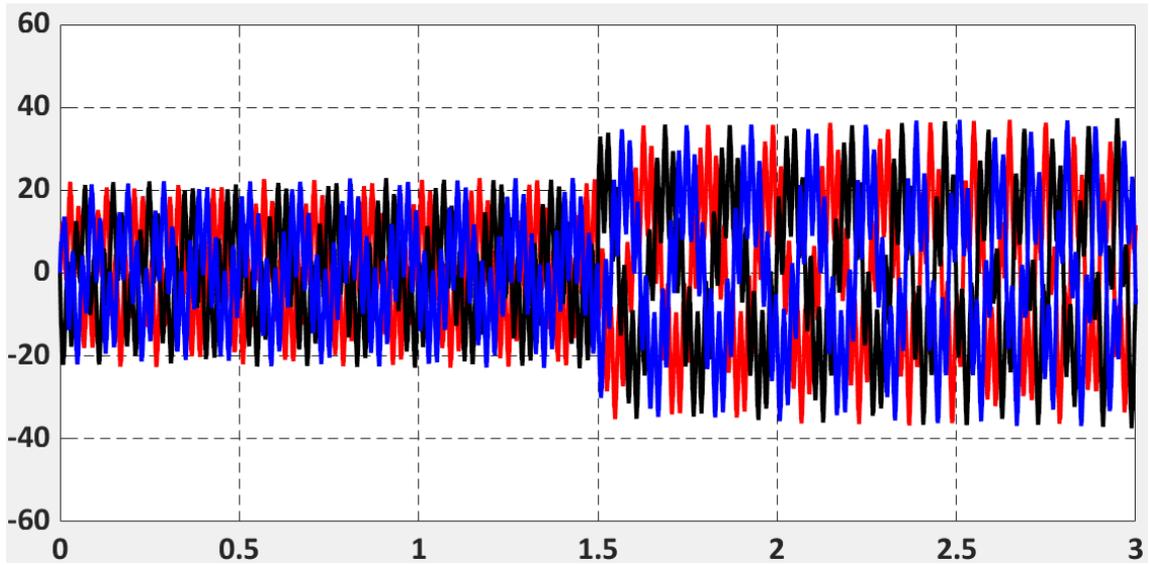


FIGURE 2.25 – Courant rotorique réel  $I_{abc}$  avec la commande indirecte des puissances

f) Vitesse mécanique (rad/s)

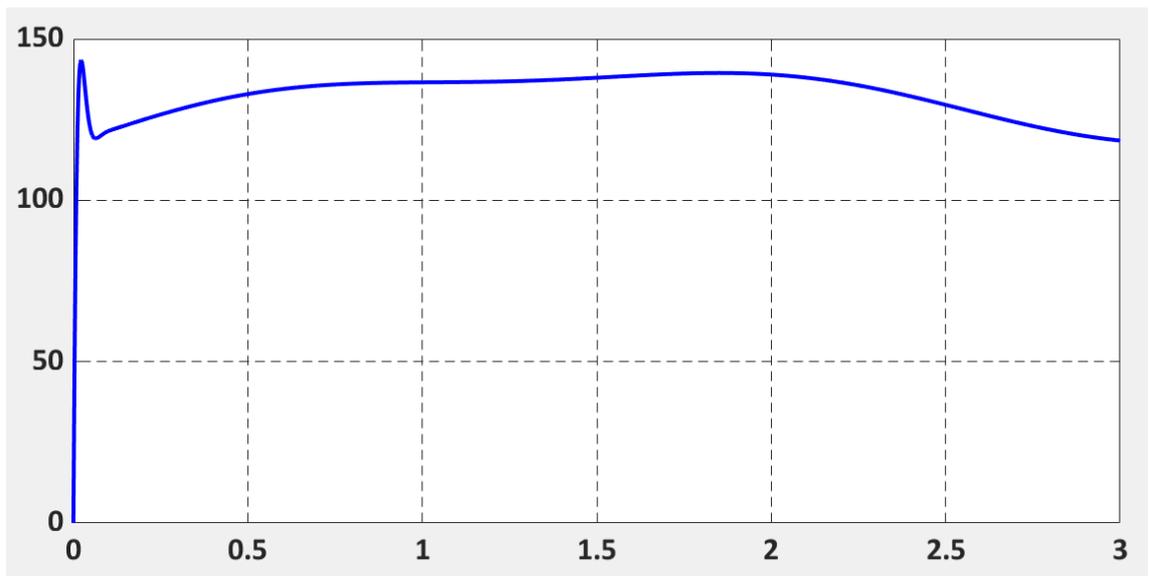


FIGURE 2.26 – Vitesse électrique avec la commande indirecte des puissances

## 2.7 Interprétation des résultats

### 2.7.1 Interprétation des résultats des commandes directe et indirecte

L'observation des graphes de la commande directe ainsi que la commande indirecte nous permet de remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive avec un temps de réponse relativement faible. On voit bien aussi que la puissance réactive statorique  $Q_s$  dépend du courant rotorique direct  $I_{dr}$  et que la puissance active statorique  $P_s$  dépend du courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$  et là également on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande d et q.

La puissance du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA, La puissance.

Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte nous permet, avec le bouclage en cascade, d'avoir un système un peu performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre par rapport à la commande directe, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations paramétriques de la GADA.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons représenté le principe de fonctionnement et le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement génératrice, en se basant sur les transformations triphasées-biphasées de Park avec un ensemble d'hypothèses simplificatrices aboutissant à des modèles simplifiés. La modélisation du convertisseur continu-alternatif et de la commande MLI de type sinus-triangle a été aussi présentée.

Enfin, nous avons développé deux méthodes de contrôle de cette génératrice, la commande vectorielle directe dans laquelle la puissance active et la puissance réactive sont mesurées et comparées à leurs consignes, et la commande vectorielle indirecte où les courants rotoriques sont utilisés pour réguler les puissances. Ces deux méthodes sont basées sur l'orientation du flux statorique. Nous notons aussi que les régulateurs utilisés sont du type PI.

D'après une étude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte on peut dire que La commande indirecte des puissances active et réactive est plus performante que la commande directe, mais cette dernière est plus simple à mettre en œuvre.

## Chapitre 3

# Étude, modélisation et simulation du système de stockage

### 3.1 Introduction

Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une croissance rapide au cours des dernières années. Au cours des prochaines années, tous les systèmes d'énergie durable devront reposer sur l'utilisation rationnelle des ressources traditionnelles et une utilisation accrue des énergies renouvelables. La production électrique décentralisée à partir de sources d'énergie renouvelable permet aux consommateurs de disposer d'un approvisionnement plus sûr, tout en réduisant les risques pour l'environnement. Cependant, le caractère imprévisible de ces sources nécessite que des règles d'approvisionnement et/ou de réseau soient établies pour un fonctionnement optimal du système. Les ressources renouvelables ont un inconvénient majeur : elles fluctuent indépendamment de la demande. Pourtant, ils sont nombreux et les systèmes de conversion deviennent de plus en plus abordables. Leur contribution importante à l'utilisation durable de l'énergie nécessitera toutefois un développement considérable des méthodes de stockage. Cela ouvrira un nouveau champ d'application, notamment en raison de la croissance de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, ainsi que de la production décentralisée.

Dans ce chapitre, on va intégrer un système de stockage qui sert à charger une batterie Li-ion et un super condensateur de la bonne manière.

### 3.2 Avantage technique et économique

Le stockage d'énergie présente de nombreux avantages. C'est important dans la gestion de l'énergie. Il contribue à réduire le gaspillage d'énergie et à augmenter l'efficacité d'utilisation de l'énergie des systèmes de traitement.

Le stockage de formes d'énergie secondaire telles que la chaleur et l'électricité contribue à réduire la quantité d'énergie primaire consommée (combustibles fossiles) pour les générer. Cela, non seulement, réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre ainsi que le réchauffement planétaire associé, mais contribue également à la préservation des combustibles fossiles considérés comme étant épuisables. Il peut également jouer un rôle crucial dans l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelables, propres et intermittentes.

Des ressources énergétiques telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et les courants de marée marins menant au réseau et facilitent le transfert de charge. Le stockage d'énergie aide à la planification, à l'exploitation et à la régulation de la fréquence du réseau électrique. Il contribue à maintenir la stabilité des systèmes énergétiques, à améliorer la qualité de l'énergie dans les systèmes de micro-réseaux et à faire correspondre la demande à l'offre [Mar-19].

### 3.3 Différents types de systèmes de stockage

#### 3.3.1 Systèmes directs

Certains systèmes de stockage permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Ces techniques de stockage sont considérées comme source de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et leur faible densité [Mar-19]. il s'agit de :

- **Condensateur**
- **Super-condensateur**
- **Inductance super-conductrice** (ou SMES pour « Superconductor Magnetic Energy Storage »)

#### 3.3.2 Systèmes indirects

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est souvent nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique). Nous citons ci-dessous quelques types de stockage indirect [Mar-19].

- **Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) hydroélectrique.**
- **Stockage d'énergie par air comprimé ou CAES (Compressed Air Energy Storage)**
- **Volant d'inertie**
- **Stockage électrochimique** (Batteries)
- **Stockage à Hydrogène**
- **Stockage thermique** (centrale thermodynamique)

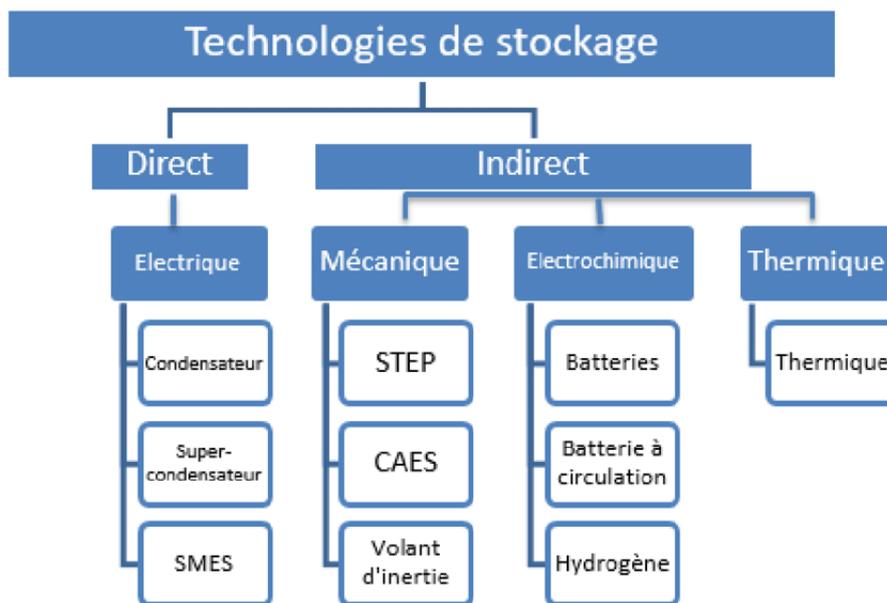


FIGURE 3.1 – Classification des différents dispositifs de stockage

### 3.4 Choix du système de stockage

Le système de stockage a pour rôle d'assurer une permanence de production dans un réseau électrique (Système hybride) et d'absorber les pics de consommation afin d'éviter les déséquilibres énergétiques. La sélection d'un mode de stockage dépend de plusieurs critères parmi lesquels on cite [Mar-19] :

- **Densité de puissance et densité d'énergie**

En termes de densité de puissance, le stockage d'énergie par batterie Lithium-ion occupe la seconde place comparativement aux autres types de stockage, excepté le super-condensateur. Le stockage par batterie Lithium-ion présente une performance remarquable après le stockage par hydrogène, surclassant de ce fait les autres technologies concernant la densité d'énergie

— **Coûts d'investissement**

Le coût d'investissement du stockage par batterie lithium-ion reste plus élevé comparé à la plupart des technologies de stockage. Néanmoins, en termes de coût d'amortissement et d'efficacité à long terme, la baisse sans cesse des prix des batteries au lithium leur permettra de concurrencer les autres systèmes dans l'avenir.

— **Rendement**

Les batteries lithium-ion occupent quasiment la première place en termes de rendement énergétique ; c'est ce qui les rend plus attractifs dans les micro-réseaux

— **Cycle de vie**

En termes de cycle de vie, les batteries aux lithium-ion sont d'une durée de vie moyenne comparée au volant d'inertie, au super-condensateur, etc., mais largement supérieure aux batteries à plombs, très répandues dans les micro-réseaux autonomes.

— **Taille d'application**

La taille d'application des systèmes de stockage se mesure par famille. Les stockages par batteries, par volant d'inertie ou encore par les super-condensateurs ont une puissance nominale allant de quelques kW à 1 MW pour une durée de décharge de quelques secondes à quelques heures ou plus, selon l'utilisation. Cependant, c'est le stockage par pompage-turbinage qui occupe une place incontestable à ce sujet avec près de 1 TW de puissance délivrée pour plusieurs jours (voire des mois) de temps de décharge.

— **Maturité technologique et adaptation à l'environnement**

Le stockage par hydrogène, par air comprimé, par volant d'inertie ou encore par super-condensateur sont les plus respectueux de l'environnement comparativement aux autres technologies de stockage d'énergie. Heureusement, des études poussées sont en train de se faire par beaucoup de chercheurs afin de réduire considérablement l'impact des batteries lithium-ion sur l'environnement.

Pour notre étude, nous avons choisi comme vecteurs de stockage : l'accumulateur au lithium-ion (Li-ion) et le super-condensateur.

### 3.5 Accumulateur au lithium-ion (Li-ion)

La batterie au lithium-ion (Li-Ion) comme toute batterie est un accumulateur électrochimique qui utilise le lithium sous une forme ionique. Elle libère de l'électricité par échange réversible des ions lithium entre deux électrodes : une anode en graphite et une cathode en oxyde métallique généralement. Cet échange se fait au sein d'un électrolyte liquide.

Une batterie Li-Ion est constituée de plusieurs cellules reliées les unes aux autres par des configurations séries et parallèles selon la tension nécessaire et les besoins énergétiques de l'appareil ou de la charge à laquelle est destinée à alimenter.

Commercialisée pour la première fois par Sony Energitech en 1991, la batterie lithium-ion occupe aujourd'hui une place prédominante sur le marché de l'électronique portable. Ses principaux avantages sont une densité d'énergie spécifique et volumique élevée (4 à 5 fois plus que le Ni-MH par exemple) ainsi que l'absence d'effet mémoire (aucun ou presque). Enfin, l'auto-décharge est relativement faible par rapport à d'autres accumulateurs. Cependant, le coût reste important et cantonne le lithium aux systèmes de petite taille[Mar-19].

### 3.5.1 Principe de fonctionnement

Le « Lithium » est un métal dont les atomes sont composés, entre autres éléments, d'électrons et de protons. Il possède la caractéristique de céder facilement un électron. Il devient alors un ion, d'où le terme « Lithium-Ion ». Dans de nombreux modèles, la cathode est faite d'oxyde de Cobalt ( $\text{CoO}_2$ ), avec un peu de lithium, tandis que l'anode est faite de graphite. L'électrolyte contient pour sa part des ions lithium en grande quantité. La première charge des cellules est réalisée par le fabricant de la batterie, car elle amorce le processus et fait accumuler les ions lithium dans l'anode, créant ainsi une différence de potentiel entre la cathode et l'anode. Lorsqu'on branche la batterie sur un appareil, cela entraîne un déplacement des électrons à cause de la différence de potentiel. Les électrons passent de l'anode (électrode négative) à la cathode (électrode positive) par le circuit externe, comme le montre la figure 3.2. De leur côté, les ions de lithium chargés positivement quittent l'anode pour retourner à la cathode, car attirés par les charges négatives des électrons. L'opération de charge consiste à faire répartir les électrons dans le sens inverse, c'est-à-dire de la cathode vers l'anode. On utilise pour cela un chargeur extérieur qui est connecté à la batterie. En conséquence, les ions de lithium passent de la cathode vers l'anode pour équilibrer la charge électrique. Quand tous les ions sont passés, la batterie est complètement chargée.

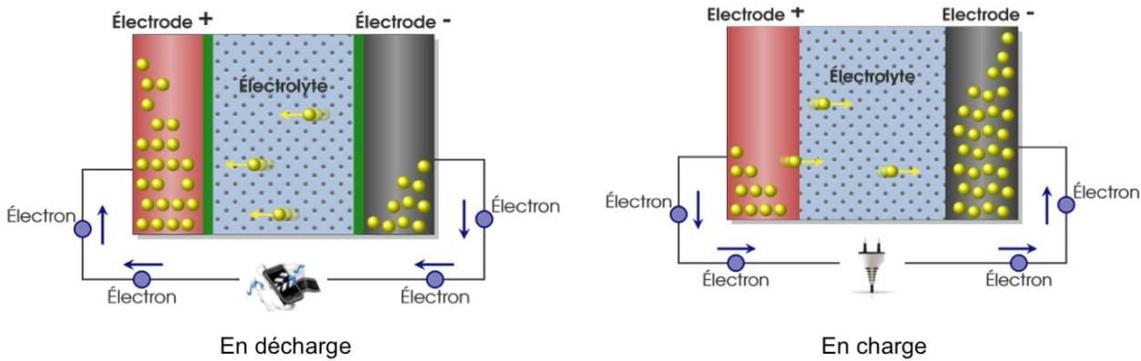


FIGURE 3.2 – Fonctionnement d'une batterie lithium-ion [Mar-19]

### 3.5.2 Modélisation de la batterie

Les principales propriétés d'une batterie sont sa tension  $V$  et sa capacité  $C$  ou  $Q$  en (Ah). Le produit de ces deux valeurs est une mesure de la quantité d'énergie contenue dans la batterie. Dans une source de tension idéale, la tension devrait demeurer constante à tout instant, jusqu'à ce que la batterie soit complètement déchargée, et ce, peu importe la demande de courant. Ainsi l'autonomie d'une batterie devrait pouvoir se calculer directement par l'équation [Mar-19] 3.1 où  $t_{auto}$  est le temps de décharge et  $I$  est le courant demandé.

$$t_{auto} = \frac{Q_{cell}}{I} \quad (3.1)$$

L'équation du potentiel cellulaire  $E$  d'une batterie représentée par l'équation :

$$E = E_0 - K\left(\frac{Q}{Q - it}\right)i + A \exp(BQ^{-1}it) - Ri \quad (3.2)$$

L'équation de la tension de la batterie en charge et en décharge est donnée par :

**en décharge :** ( $i^* > 0$ )

$$E_{bat}(it, i^*, i) = E_0 - k \frac{Q}{Q - it}(it + i^*) + A \exp(-B.it) \quad (3.3)$$

Où  $E$  : Potentiel de la batterie (V),  $E_0$  : Tension constante de la batterie (V),  $K$  : Constante de polarisation (V/Ah)  $Q$  : Capacité de la batterie (Ah),  $i$  : Courant de la batterie (A),  $it = \int idt$  : Capacité actuelle de la

batterie ( $A_b$ )  $R$  : Résistance interne par unité de surface de la cellule ( $\Omega$ ),  $A$  : Amplitude de la zone exponentielle ( $V$ ),  $B$  : Inverse de la constante de temps de la zone exponentielle ( $Ah^{-1}$ ) **en charge** : ( $i^* < 0$ )

$$E_{bat}(it, i^*, i) = E_0 - Ri - k \frac{Q}{it - 0,1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} i + A \exp(-B.it) \quad (3.4)$$

**État de charge SOC** : Des pertes d'énergie surviennent lors du chargement d'une batterie. L'efficacité de la batterie diminue encore lorsque la batterie vieillit ou si elle n'est pas entretenue correctement. L'état de charge de la batterie en Wh est classiquement calculé par l'intégration de la puissance à l'aide de :

$$SOC(t) = \int_{t-1}^t i_{bat}(t) \cdot v_{bat}(t) dt \quad (3.5)$$

**État de décharge SOD** : L'état de décharge est donné par l'équation 3.6 où  $i$  est le courant de la batterie et  $Q_{max}$  sa capacité maximale :

$$SOD(t) = \frac{\int_0^t i(t) dt}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

**Profondeur de décharge DOD** : La profondeur de décharge d'une batterie DOD (depth of discharge, en anglais) est donnée, en fonction de l'État de charge SOC, par

$$DOD = 1 - SOC \quad (3.7)$$

## 3.6 Super-condensateur

Les super-condensateurs, moyens de stockage direct, électrostatique (et électrochimique), sont considérés comme des sources de puissance grâce à leur grande densité de puissance. On distingue plusieurs technologies de super-condensateurs, dont certaines sont proches des technologies d'accumulateurs.

Il existe différentes technologies d'électrodes, elles peuvent être :

- En matériaux à base de charbon actif.
- En matériaux inorganiques : à base d'oxyde de métaux de transition ( $MnO_2$ ,  $V_2O_5$ , ...) ou d'oxyde de métaux nobles (ex :  $RuO_2$ , ...).
- En matériaux organiques : polymères à conduction électronique Les super-condensateurs les plus répandus sont à électrodes en charbon actif. [Boc-21][Bok-19]

### 3.6.1 Principe de fonctionnement

Un super condensateur se compose de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), deux électrodes carbonées poreuses imprégnées d'électrolyte et d'une membrane poreuse isolante (pour assurer la conduction ionique et séparer électriquement les électrodes).

Le stockage d'énergie dans un super-condensateur est fait sous forme de champ électrostatique entre deux électrodes. Il ne s'agit donc pas d'un stockage électrochimique comme pour un accumulateur, mais bien d'un stockage électrostatique, comme pour un condensateur, à ceci près que l'isolant diélectrique est remplacé par un électrolyte conducteur d'ions. Un super-condensateur n'est pas basé sur le principe de la polarisation diélectrique (condensateur) pour le stockage de l'énergie, mais sur le principe de la double couche électrique : lorsque l'on applique une tension entre deux électrodes immergées dans une solution électrolytique (l'électrolyte étant conducteur ionique et isolant électronique), une double couche électrique se forme à l'interface séparant les deux corps. La dissymétrie moléculaire de l'électrolyte et de l'électrode conduit à l'apparition de charges à l'interface électrolyte / électrode (effet de Helmholtz). Ainsi les charges accumulées à la surface de l'électrode sont équilibrées par celles, de nature ionique, qui s'accumulent dans l'électrolyte. On a alors des charges opposées, séparées par une distance infinitésimale, que l'on appelle, double couche électrique. Les deux couches électriques ainsi formées se comportent comme un condensateur dont la capacité dépend de

la surface effective de contact.[Boc-21]

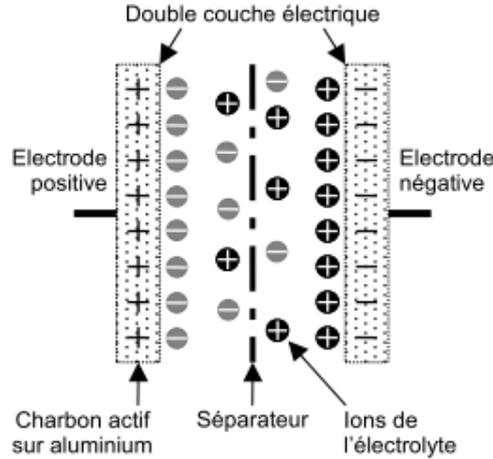


FIGURE 3.3 – structure d'un super-condensateur [Bok-19]

### 3.6.2 Modélisation du super condensateur

Les caractéristiques d'un super-condensateur définies ci-après sont relatives à leurs performances électriques. La charge d'un super-condensateur,  $Q_{sc}$ , est donnée par la relation 3.8 :

$$Q_{sc} = \int i dt \quad (3.8)$$

où  $i$  est l'intensité de courant dans le super-condensateur [A].

Aussi, la capacité d'un super-condensateur,  $C_{sc}$  [F], est donnée par la relation 3.9 :

$$C_{sc} = \frac{Q_{sc}}{U} \quad (3.9)$$

où  $U$  est la tension aux bornes du super-condensateur [V].

D'autre part, l'énergie stockée dans un super-condensateur,  $W_{sc}$  [J], est proportionnelle à sa capacité, suivant la relation 3.10 :

$$W_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} U^2 \quad (3.10)$$

où  $C_{sc}$  est la capacité [F] du super-condensateur et  $U$  [V] la tension à ses bornes.

Finalement, la puissance maximale restituée par un super-condensateur,  $P_{sc_{max}}$  [W], est donnée par la relation 3.11 :

$$P_{sc_{max}} = \frac{U^2}{4} ESR \quad (3.11)$$

où  $ESR$  est la résistance interne du super-condensateur [ $\Omega$ ] et  $U$  [V] la tension à ses bornes.

## 3.7 Comparaison batterie/super-condensateur

Les avantages des super-condensateurs sur les batteries Lithium-Ion tiennent également à leur efficacité (98% contre entre 75 et 90%, grâce à une perte par chaleur minime), leur cyclabilité (nombre de cycles charge-décharge, compris entre 500 000 et 20 millions, contre environ 1 000 pour une batterie Lithium-Ion), une plus grande amplitude de température pour la charge et la décharge (de -40 °C à +65 °C), et leur sûreté. Avec un super-condensateur, aucun problème de décharge profonde, de risque de surcharge, d'emballement thermique ou d'explosion – contrairement à une batterie Lithium-Ion.

Mais les super-condensateurs ne sont pas encore la panacée du stockage. D'une part à cause de leur coût :

même s'il a été divisé par 15 en 10 ans, le coût de stockage du kWh est environ 10 fois plus élevé que celui d'une batterie Lithium-Ion.

Mais leur principal défaut est leur faible capacité : à volume et masse égale, une batterie stocke 25 fois plus d'électricité qu'un super-condensateur classique. Pour autant, la recherche progresse, et la densité énergétique des derniers super-condensateurs commercialisés a été multipliée par 3, réduisant l'écart avec les batteries Lithium-Ion.

### 3.8 Structure Générale du système de conversion d'énergie

Nous allons maintenant pouvoir assembler les différents modèles développés précédemment afin d'obtenir le système de conversion présenté à la figure (3.4) notre but est de modéliser puis simuler le système constitué de la partie mécanique de l'éolienne (chapitre 1), la génératrice ainsi que sa commande décrite dans le (chapitre 2) le tout associé à une unité de stockage et sa commande en se basant sur deux types de système de stockage (batterie Li-ion et super-condensateur).

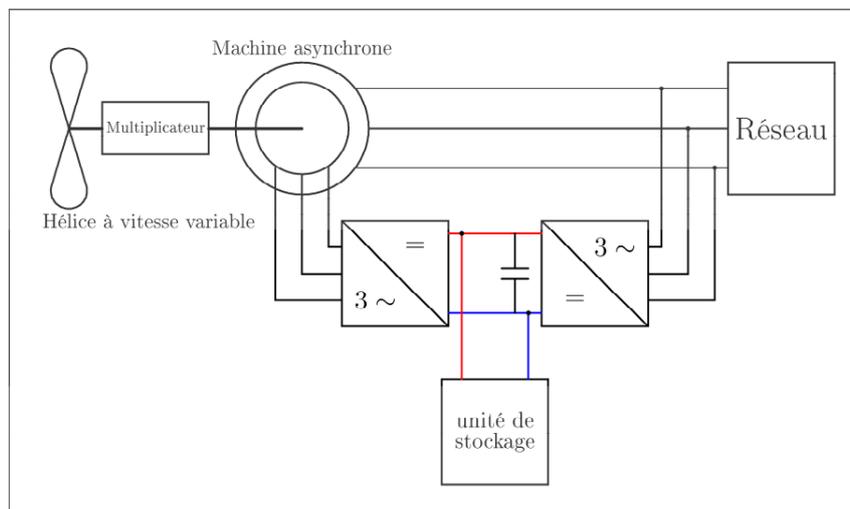


FIGURE 3.4 – Système de production éolien avec stockage [Boy-06]

### 3.9 Contrôle de l'unité de stockage

Pour la gestion de l'énergie, on se fixe un seuil maximal et un seuil minimal à ne pas dépasser, dans le cas de la batterie, il ne faut pas faire des décharges profondes, car elle entraîne des dégradations des plaques internes des éléments.

La stratégie de puissance va donc dépendre du niveau d'énergie dans l'unité - Si la limite maximale est atteinte, l'unité de stockage est chargée complètement et l'on autorise seulement la décharge de l'unité. La puissance de l'unité de stockage peut être nulle ou négative - Si la limite minimale est atteinte, l'unité de stockage est déchargée et l'on autorise seulement la charge de l'unité. La puissance de l'unité de stockage peut être nulle ou positive.

Le contrôle de cette unité se fait à base d'un régulateur PI est un MLI (PWM générateur) afin de pouvoir contrôler la gâchette du convertisseur DC-DC

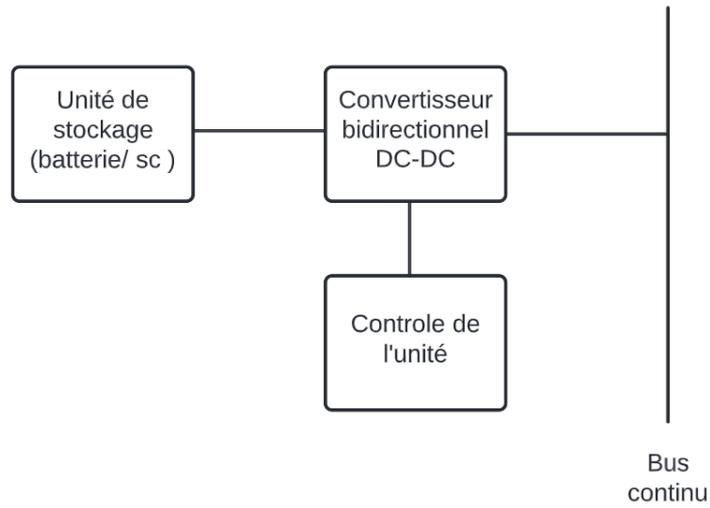


FIGURE 3.5 – structure générale du système de stockage

## 3.10 Résultat de la simulation

Nous présentons par la suite les résultats de la simulation de l'unité de stockage et du contrôle

### 3.10.1 Batterie Li-ion

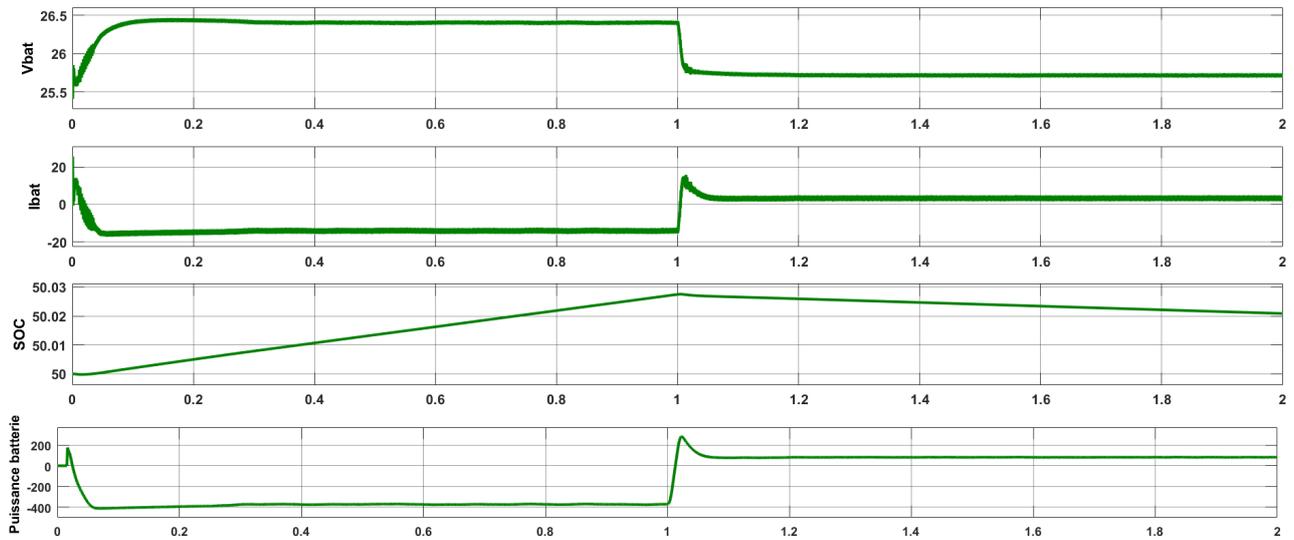


FIGURE 3.6 – Tension, courant, SOC et puissance de la batterie Li-ion

### 3.10.2 Super-condensateur

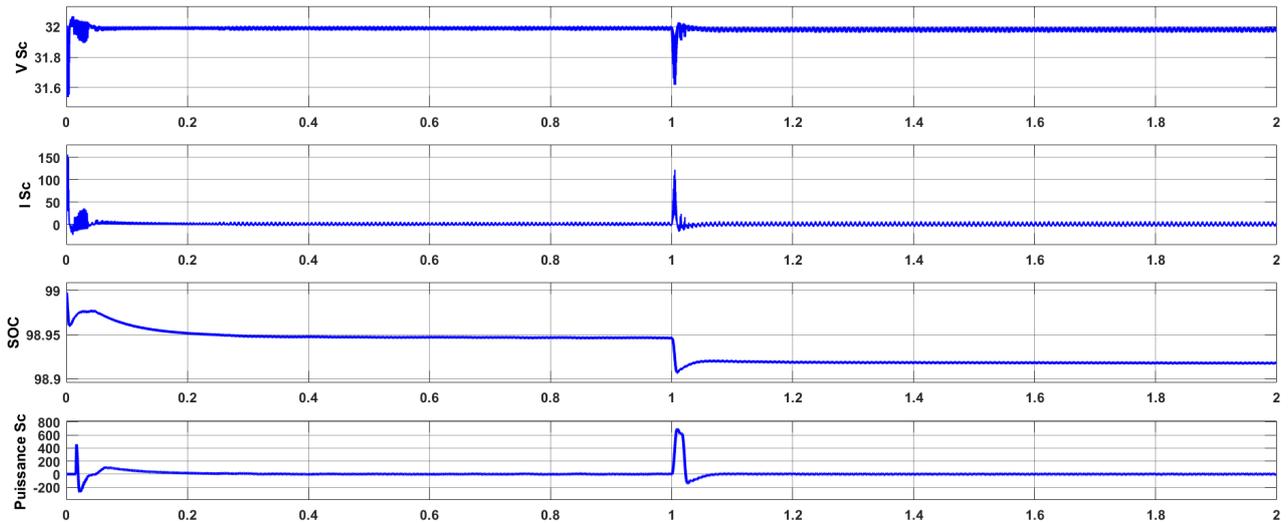


FIGURE 3.7 – Tension, courant, SOC et puissance du super-condensateur

### 3.11 Interprétation

D'après les résultats présentés dans les figures (3.7) (3.6) on remarque le bon fonctionnement de l'unité de contrôle du système de stockage a base des régulateurs Pi. lorsque la limite maximale est atteinte, l'unité de stockage est chargée et l'unité de contrôle à basculer au mode de décharge automatiquement ( $t = 1$  s) et lorsque le seuil minimal est atteint l'unité de contrôle bascule une autre fois vers le mode de charge. cette hybridation entre la batterie et le super-condensateur sert à la base de produire le plus longtemps possible une puissance constante au réseau et afin de lisser au mieux la puissance produite en fonction des fluctuations rapides du vent. ce résultat n'a pas été présenté. Ceci est dû au fait que la simulation de cette dernière n'était pas parfaitement réalisée.

### 3.12 Conclusion

Dans ce chapitre, on a simulé un système de stockage qui se devise en deux unités : unité de contrôle a base des régulateurs pi et unité de stockage qui est la combinaison des convertisseurs DC-DC bidirectionnel et batterie/super-condensateur

# Conclusion générale et perspectives

Ce travail a traité la problématique de commande d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation. L'étude a été faite en deux parties principales : la turbine éolienne (partie mécanique) et la MADA (partie électrique).

Dans ce travail, nous avons donné une vision générale sur les systèmes éoliens, puis entamé la modélisation de la turbine ainsi que le multiplicateur. Nous avons développé une stratégie de maximisation de puissance MPPT sans et avec asservissement de la vitesse mécanique avec simulation et comparaison. Ce qui nous a donnée la possibilité d'adopter la stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique pour ensuite coupler la turbine à la MADA.

La deuxième partie a été consacrée à la représentation de la génératrice à double alimentation en décrivant son principe de fonctionnement et le modèle mathématique en se fondant sur les transformations de park à l'aide de quelque hypothèses simplificatrices.

Ensuite, nous avons développé deux principales méthodes de contrôle de cette génératrice, à savoir la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte. Ces deux méthodes sont basées sur l'orientation du flux statorique. Nous notons aussi que les régulateurs utilisés sont de type PI.

Une troisième partie a traité le système de stockage intégré à notre système de production divisé en deux principales parties : unité de contrôle à base des régulateurs pi et unité de stockage qui est la combinaison des convertisseurs DC-DC bidirectionnel et batterie/super-condensateur.

Sur la base des résultats obtenus, et comme perspective, nous citons les points suivants :

- Étudier d'autres types de stratégies et méthodes dans les autres zones de fonctionnement de l'éolienne.(1, 3 et 4)
- Utilisation des onduleurs multi-niveaux et des convertisseurs matriciels.
- Utilisation les différents régulateurs associés aux autres commandes, tels que, le réseau neuronal, l'intelligence artificielle et le régulateur par méthode floue.
- l'utilisation du système de stockage pour améliorer la qualité de la puissance délivrée au réseau.

# Annexes

# Annexe 1

## 1 La chaîne éolienne

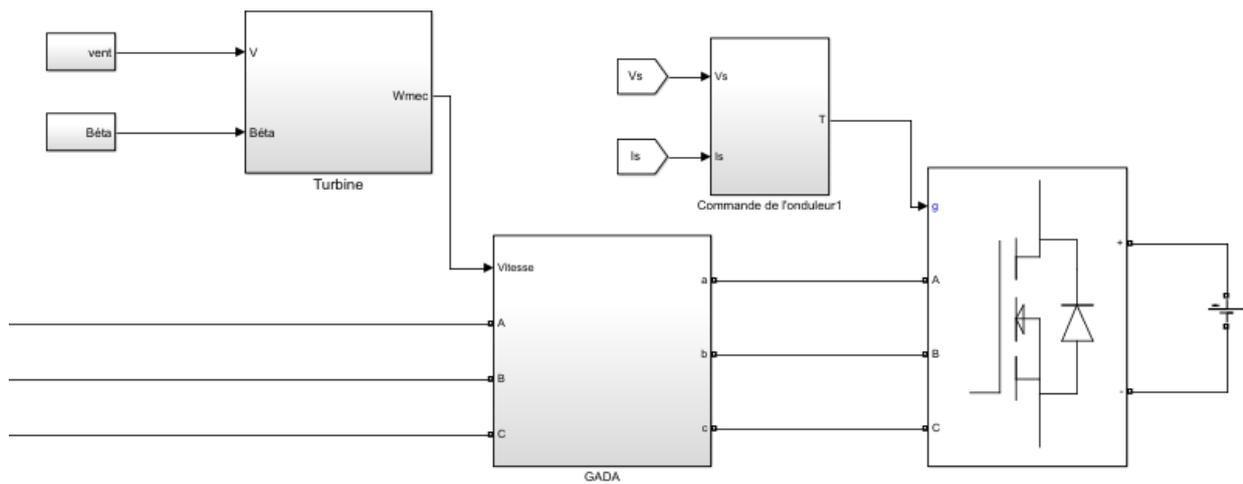


FIGURE 3.8 – Diagramme de la chaîne éolienne

### 1.1 La turbine éolienne

#### 1.1.1 MPPT avec asservissement de vitesse

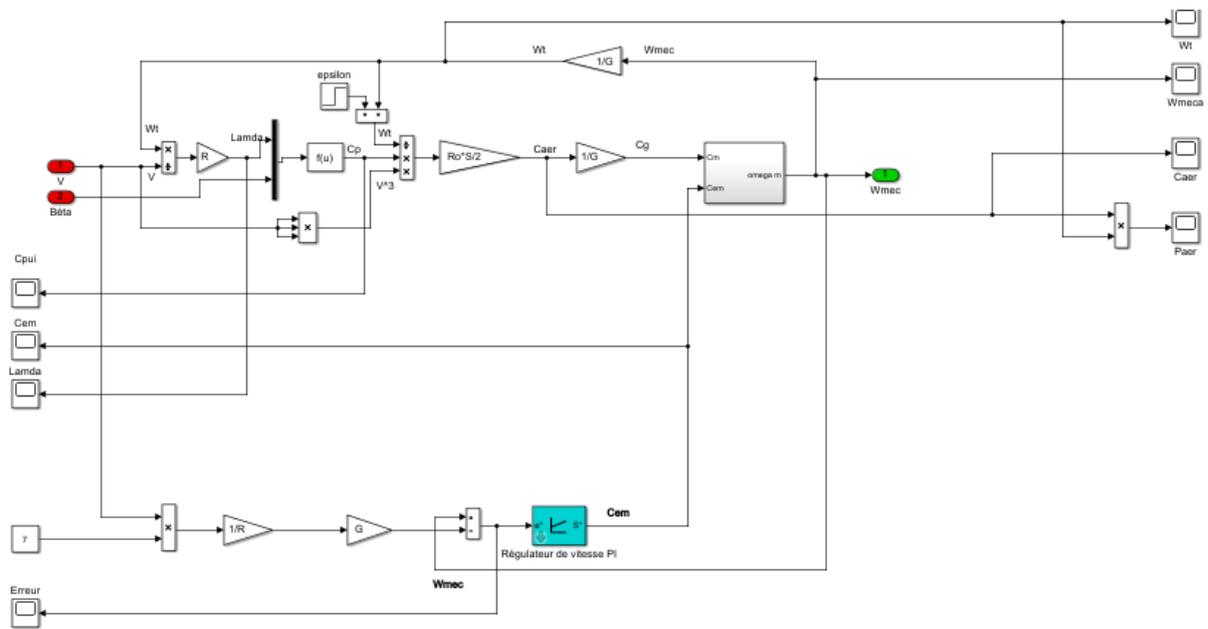


FIGURE 3.9 – Diagramme de la turbine avec asservissement de vitesse

### 1.1.2 MPPT sans asservissement de vitesse

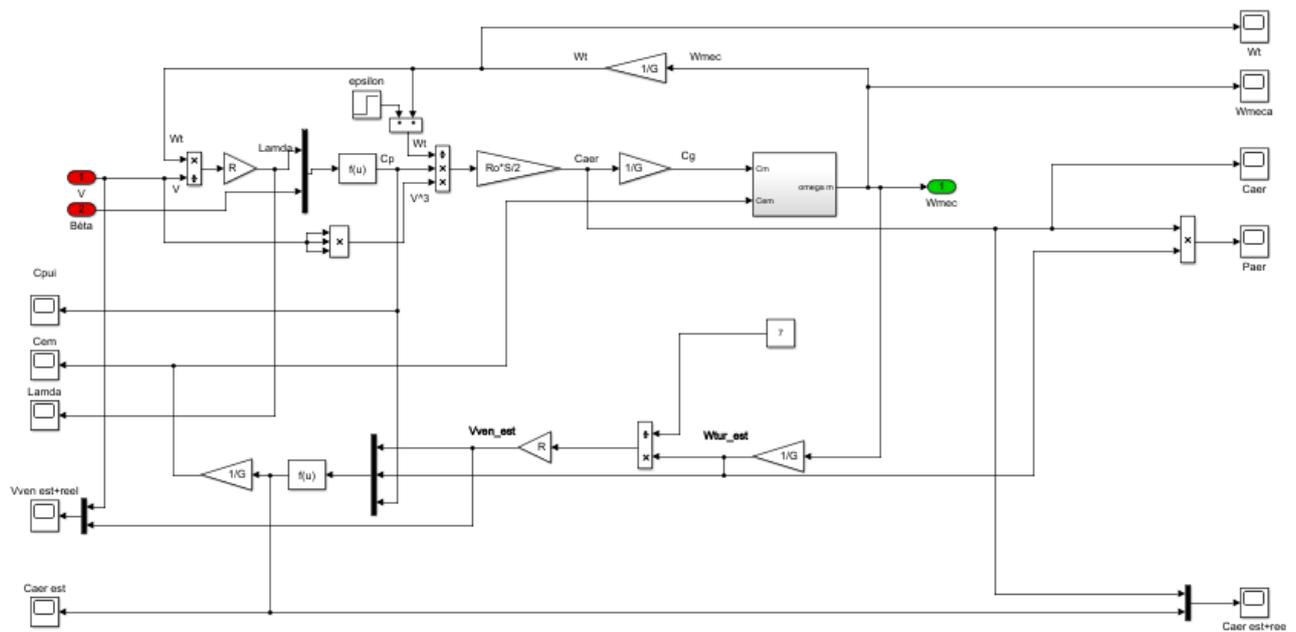


FIGURE 3.10 – Diagramme de la turbine sans asservissement de vitesse

## 1.2 La génératrice à double alimentation

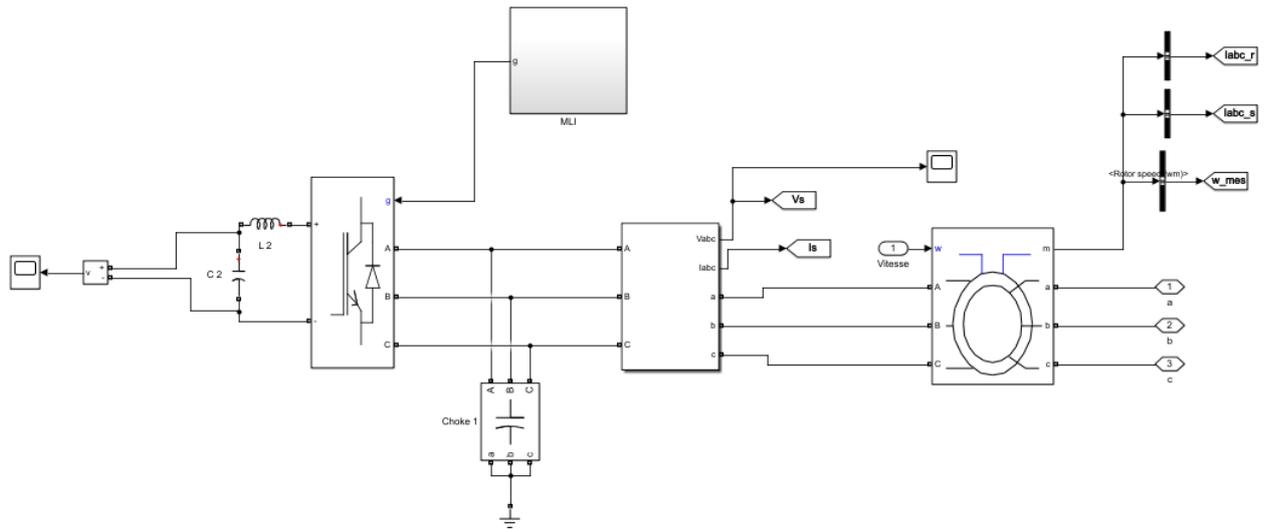


FIGURE 3.11 – le diagramme de la génératrice à double alimentation

### 1.3 Commande de l'onduleur

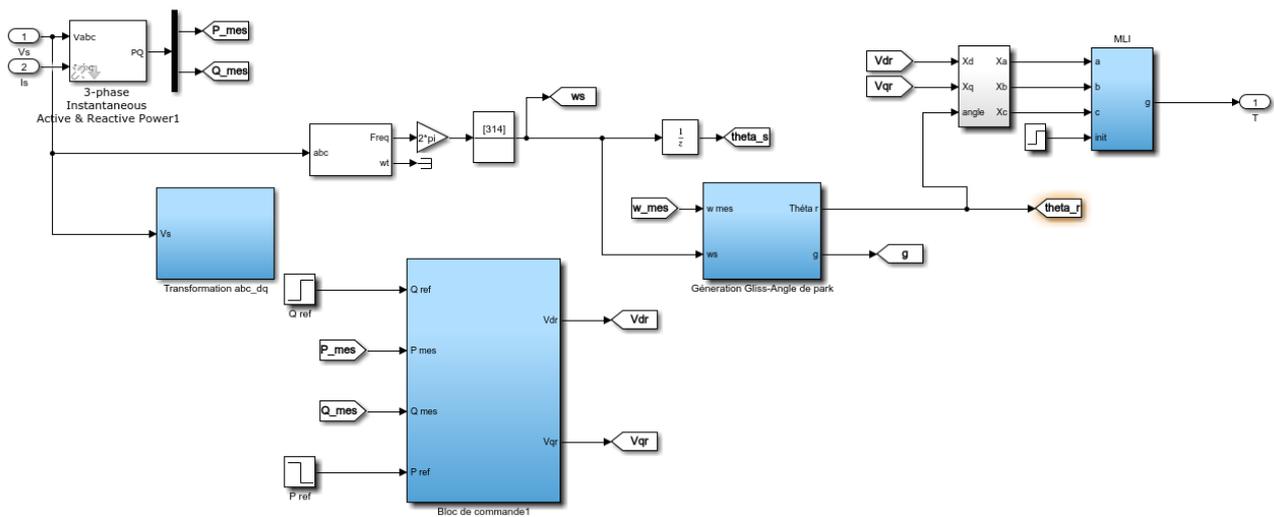


FIGURE 3.12 – Diagramme de la commande de l'onduleur

#### 1.3.1 La commande directe des puissances

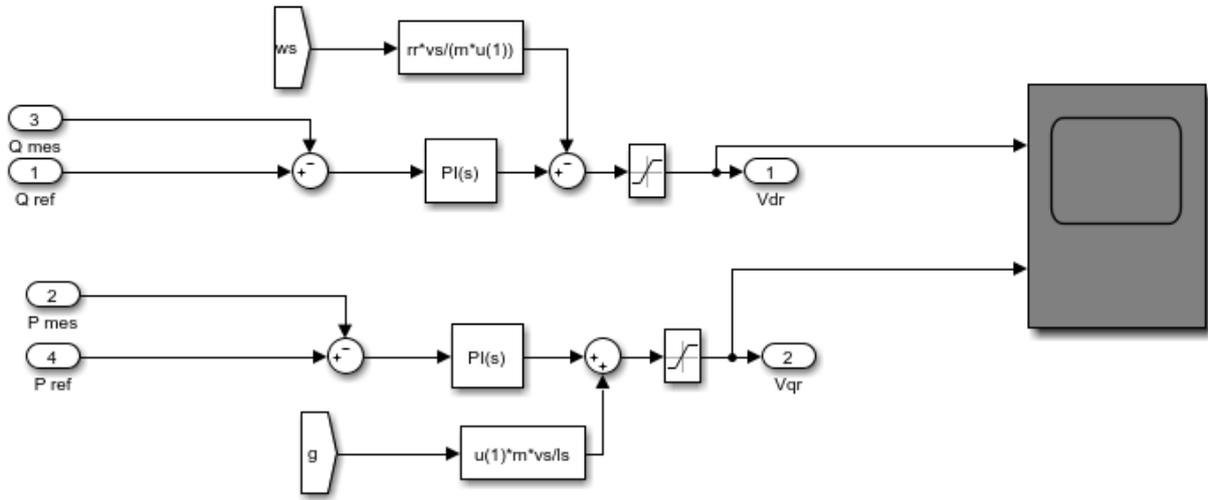


FIGURE 3.13 – Diagramme de la commande direct des puissances

### 1.3.2 La commande indirecte des puissances

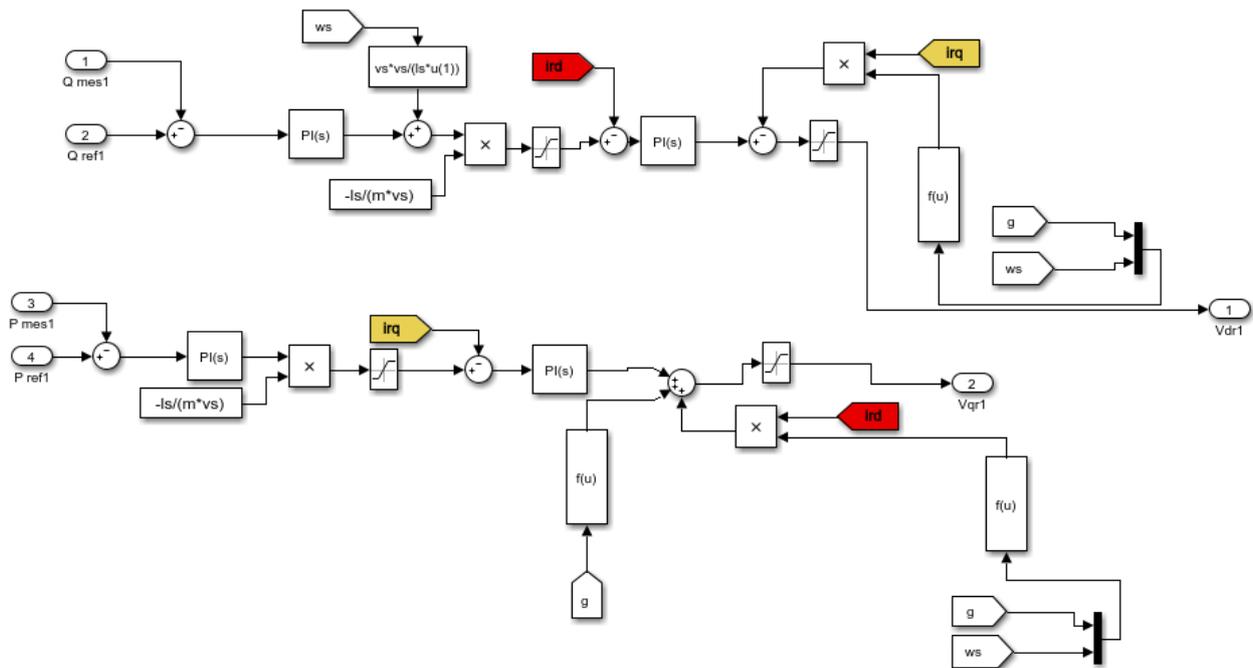


FIGURE 3.14 – Diagramme de la commande indirect des puissances

## 2 Système de stockage

### 2.1 Unité de contrôle

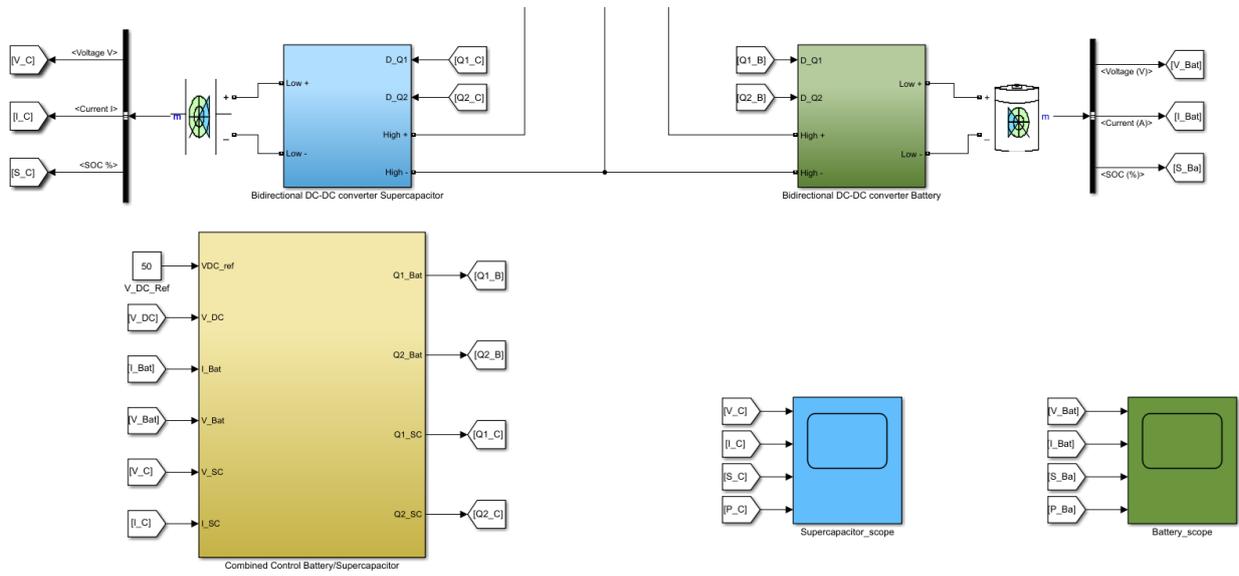


FIGURE 3.15 – Diagramme du système de stockage

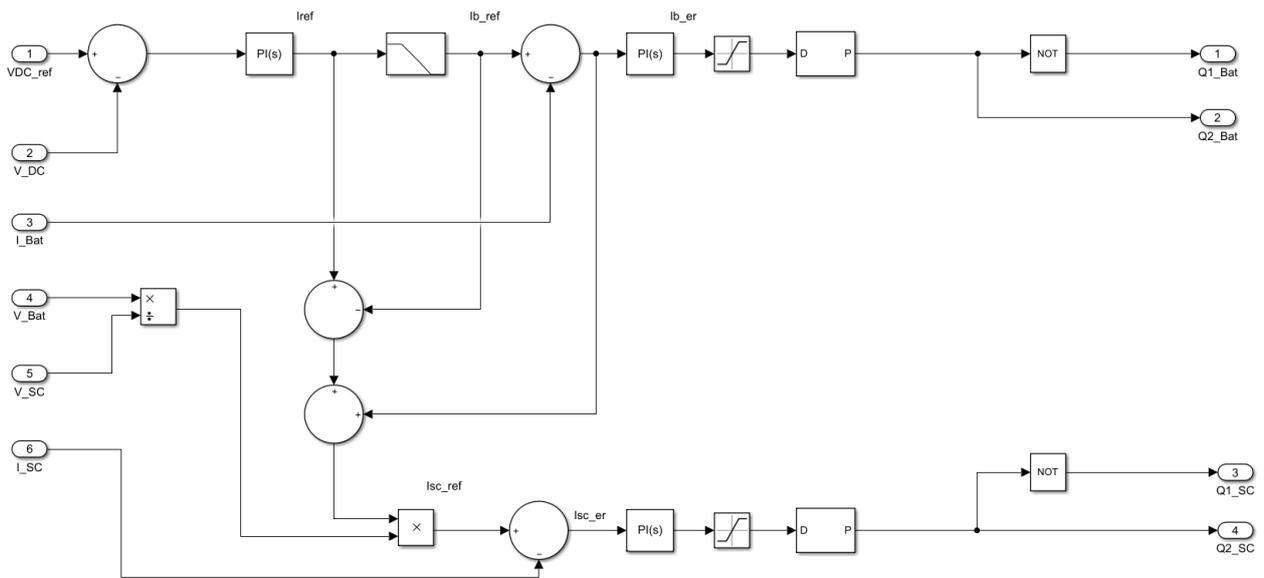


FIGURE 3.16 – Diagramme de l'unité de contrôle

# Annexe 2

## Caractéristiques nominales du système éolien a base de la MADA

### 1 Machine asynchrone à double alimentation utilisée en simulation du système éolien

<b>Grandeurs nominales</b>	tension nominale	230/400	V
	puissance nominale	3	KW
	fréquence nominale	50	Hz
	nombre de paire de poles	2	/
	vitesse nominale	1500	tr/min
	courant nominale	8.1	A

TABLE 3.1 – Grandeurs nominales

<b>Paramètres nominaux</b>	Résistance statorique	1.940	$\Omega$
	Résistance rotorique	0.3	$\Omega$
	Coefficient d'inductance statorique	0.20151	H
	Coefficient d'inductance rotorique	0.0191	H
	Coefficient d'inductance mutuelle	0.05971	H
	Coefficient de frottement	0.002	N.m
	Moment d'inertie total	0.03615	$kg/m^2$

TABLE 3.2 – Paramètres nominaux

### 2 La turbine éolienne utilisée en simulation du système éolienne

<b>Paramètres nominaux</b>	Puissance nominale	3	Kw
	Moment d'inertie	0.00184	/
	Coefficient de frottement	0.0002	$kg/m^2$
	Densité de l'air	1.225	$kg/m^3$
	Rapport du multiplicateur	5.4711	/
	Rayon de la turbine	2.392	m
	Vitesse du vent	9.33	m/s
	Coefficient de puissance maximal	0.35	/
	Vitesse relative de référence	7	H

TABLE 3.3 – Paramètres nominaux

# Bibliographie

- [**Abd-11**] R.Abdessamed, « Modelisation et simulation des machines electrique » ellipses edition, 2011
- [**Bek-14**] Y. Bekakra, « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat en réseaux électrique, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2014.
- [**Boc-21**] O. Bocoum, « Stratégie de gestion de la centrale PV de EL Abiodh Sid Cheick avec un stockage hybride batteries/supercondensateurs », Mémoire de master en Électrotechnique, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.
- [**Bok-19**] Y. Bokhari, « Un Système Hybride Pv - Pàc -Sc Pour Une Application Embarquée », Mémoire de master en Électromécanique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [**Boy-06**] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, NancyI, France, 2006.
- [**Che-15**] A.Chemidi, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Mémoire de doctorat en électrotechnique commande des machines électrique, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 2015.
- [**Dje,Mel-20**] S.Djeraba , N.Melfi, « Etude et contrôle d'un système énergétique hybride éolien-photovoltaïque » Mémoire d'ingéniorat en électrotechnique, Ecole Supérieure de l'Energie Electrique et Energétique Oran, Algerie, 2020.
- [**Ghe-11**] T.Ghennam « Supervision d'une ferme éolienne pour son integration dans la gestion de réseau électrique, Apports des convertisseurs multi-niveaux au réglage des éoliennes à base de mada » these de doctorat, ecole militaire polytechnique d'alger, 2011.
- [**Gho,Dib-19**] S.Ghoudelbourk , D.Dib « Convertisseurs statiques dans une chaine eolienne » Editions universitaires européennes, 2019 .
- [**Kel-11**] B.Kelkoul « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Mémoire de magister en API, Université de TLEMCEM ,Algerie, 2011.
- [**Ker-13**] A.Kerboua « Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique » , UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Algerie, 2013
- [**Kra-13**] P. Krafczyk, « Modélisation et mise en oeuvre d'une chaine de production éolienne à base de la MADA », Thèse de d'ingéniorat en Electrotechnique, Ecole d'ingénieurs C.N.A.M, France, 2013.

- [Lou-16]** M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat en Modélisation et commande, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.
- [Mas-18]** S. Massoum, « contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat en commande électrique, université DJILLALI LIABES de Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2018.
- [Mar-19]** T. Martin, « MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE INTÉGRÉ DANS UN MICRO-RÉSEAU AUTONOME SOLAIRE-ÉOLIEN », Mémoire d'ingénieur, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE , 2019.
- [Par-29]** R.H. Park, «Two-reaction theory of synchronous machines-generalized method of Analysis» AIEE Transactions, Vol 48, 3 July 1929.
- [Sef,Bel-20]** A. Sefsaf,I. Beldjerba « Modélisation et contrôle d'un aérogénérateur connecté au réseau» mémoire d'ingénieur en électrotechnique, école supérieur en science appliquée Tlemcen, Algérie,2020 .
- [You-12]** A.A. Benabdellah, Y. Youbi, « Etude et réalisation d'un banc de simulation d'éolienne à base de MADA commandé et couplé au réseau triphasé », Mémoire de fin d'étude en électrotechnique, Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2012.

## Résumé

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique fait appel à de nombreuses disciplines scientifiques (météorologie pour l'étude du comportement du vent, mécanique et chimie pour les contraintes et la composition des divers matériaux utilisés dans l'aérogénérateur, mécanique des fluides pour l'effet des masses d'air en mouvement sur les pales, électrotechnique pour la conversion électromécanique et l'adaptation de l'énergie électrique et automatique pour la commande de la turbine et de génératrice liée à cette dernière). C'est à la partie Automatique de cette chaîne de conversion qu'est consacré ce mémoire. Après un bref rappel des concepts et équations régissant le fonctionnement d'un système éolien, ce document dresse une étude sur deux stratégies de commande de la vitesse mécanique des turbines éoliennes en zone 2 afin de maximiser la puissance produite. Une autre partie présente une étude sur la génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation de cette dernière et sa stratégie linéaire de commande (commande vectorielle) sont détaillées, ainsi que la présentation des stratégies de commande directe et indirecte des puissances active et réactives. L'objectif étant de modéliser et concevoir un modèle de simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne.

**Mots clefs :** Éolienne, modélisation, machine asynchrone à double alimentation, Maximisation de puissance, MPPT, Régulation, commande directe des puissances, commande indirecte des puissances.

## Abstract

The conversion of wind energy into electrical energy calls upon many scientific disciplines (meteorology for the study of wind behavior, mechanics and chemistry for the constraints and composition of the various materials used in the wind generator, fluid mechanics for the effect of air masses in motion on the blades on the blades, electrical engineering for the electromechanical conversion and adaptation of electrical energy and automatic control of the turbine and the generator linked to it). It is to The automatic part of this conversion chain is the subject of this thesis. After a brief reminder of the concepts and equations governing the operation of a wind power system, this After a brief review of the concepts and equations governing the operation of a wind turbine system, this document presents a study of two strategies for controlling the mechanical speed of wind turbines in zone 2 in order to maximize the power produced. Another part presents a study on the double-fed asynchronous generator. The Another part presents a study on the double-fed asynchronous generator. The modeling of the latter and its linear control strategy (vector control) are detailed, as well as the presentation of the direct and indirect control strategies of active and reactive powers. The objective is to model and design a simulation model of a wind energy conversion system. of wind energy.

**keywords :** Wind turbine, modeling, double-fed asynchronous machine, power maximization, MPPT, regulation, direct power control, indirect power control.

## المخلص

يتضمن تحويل الرياح إلى طاقة كهربائية الحديد من التخصصات العلمية (الأرصاء الجوية لدراسة سلوك الرياح والميكانيك والكيمياء لمختلف المواد المستخدمة في مولد الرياح، وميكانيك الموائع لتأثير كتل الهواء المتحرك على السفرات، والتقنيات الكهربائية لتحويل الكهروميكانيكي وتكييف الطاقة الكهربائية والآلية للتحكم في التوربين والمولد الموصولين به). الجزء الاتوماتيكي من سلسلة التحويل هذه المكرسة لهذه الأطروحة. بعد استعراض موجز للمفاهيم والمعادلات التي تحكم عمل نظام الرياح، تطرقنا إلى إستراتيجيتين للتحكم في السرعة الميكانيكية لتوربينات الرياح في. يقدم جزء آخر دراسة عن مولد الطاقة المزدوج غير المتزامن. وتورد تفاصيل نموذج هذه الإستراتيجية وإستراتيجيتها للتحكم الخطي، فضلا عن عرض استراتيجيات للمراقبة المباشرة وغير المباشرة. الهدف هو تصميم نموذج محاكاة لنظام التحويل طاقة الرياح.

## الكلمات المفتاحية :

الرياح، النمذجة، الآلة غير المتزامنة مع إمدادات الطاقة المزدوجة، تعظيم الطاقة، التحكم المباشر في الطاقة، التحكم غير المباشر في الطاقة.