

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen

Faculté de Technologie



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU

DIPLOME DE MASTER

Filière : *Electrotechnique*

Spécialité : *Réseaux Electriques Et Réseaux Electriques Intelligents*

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par

***Rabia MAMMAD***

Intitulé du Mémoire

**Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique**

Soutenu publiquement le 29 Juin 2017 devant les membres de jury composé de

S. M. MELIANI	Président	MCA	U.A.B - Tlemcen
A. GORINE	Examinateur	MCB	U.A.B – Tlemcen
B. YACOUBI	Examinateur	MAA	U.A.B – Tlemcen
M. C. BENHABIB	Encadrant	MCA	U.A.B - Tlemcen
M. A. BRIKCI NIGASSA	Co-Encadreur	MAA	U.A.B - Tlemcen

Année Universitaire : 2016 – 2017

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage et la santé durant toutes ces années d'étude, pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je remercie mon encadrant **Monsieur Benhabib Mohammed Choukri**, pour son soutien tout au long de cette thèse.*

*Je remercie aussi mon Co-encadreur **Monsieur Briki Nigassa Mohammed Amine**, pour son précieux aide dans le cheminement de cette étude.*

*Je remercie **Monsieur Sidi Mohammed MELIANI**, pour avoir bien voulu accepter de présider le jury.*

*Je tiens également à remercier tous les membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail **Monsieur Ali Gorine** et **Monsieur Boumediene Yacoubi***

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes très chers parents mon père Ahmed et ma mère Yamina pour leurs patiences, leurs amours, leurs soutiens et leurs encouragements.*

*A mes chères sœurs : Malika et son marie, Sara et son marie, Kenza et Aicha.*

*Mes chers frères : Ali et Mohamed.*

*A mes petits neveux : Noujoud et Adam Joud.*

*A tout mes amis surtout hamida et Yousef*

*Mammad rabia*

## Listes de notations et symboles

MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation.
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion.
CCM	: Convertisseur coté machine.
CCR	: Convertisseur coté réseau.
PI	: Régulateur proportionnel intégral.
$K_p, K_i$	: Gains proportionnel et intégral du régulateur PI.
PLL	: Boucle à verrouillage de phase.
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion.
FTBO	: Fonction de Transfer eu boucle ouverte.
FTBF	: Fonction de Transfer eu boucle fermée.
A, B, C	: Indices des phases rotorique.
a, b, c	: Indices des phases statorique.
$[V_{abc}]$	: Vecteur de la tension statorique.
$[\varphi_{abc}]$	: Vecteur de flux statorique.
$[i_{abc}]$	: Vecteur de courant statorique.
$s, r$	: Indice relatif au stator et rotor respectivement.
$R_s$	: Résistance par phase statorique.
$R_r$	: Résistance par phase rotorique.
$L_s$	: Inductances cycliques statorique.
$L_r$	: Inductances cycliques rotorique.
$M_s$	: Mutuelle statorique.
$M_r$	: Mutuelle rotorique.
$[P(\theta)]$	: Matrice de Park.
$M_{rs}$	: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.
$\theta_s$	: Angle statorique.
$\theta_r$	: Angle rotorique.
$\theta$	: Angle électrique.
$p$	: Nombre de pair de pôles.
$N_s$	: Nombre de spires des bobinages statorique.
$N_r$	: Nombre de spires des bobinages rotoriques.

$\omega_s$	: Pulsation électrique statorique.
$\omega_r$	: Pulsation électrique rotorique.
$g$	: Glissement.
$P_s$	: Puissance active statorique.
$P_r$	: Puissance active rotorique.
$Q_s$	: Puissance réactive statorique
$P_{mec}$	: Puissance mécanique.
$P_{res}$	: Puissance du réseau.

## Listes des figures et des tableaux

### Listes des figures

#### Chapitre I

Figure (I.1) : Conversion de l'énergie cinétique du vent	05
Figure (I.2) : Schéma d'une éolienne	07
Figure (I.3) : Différents types de tours	08
Figure (I.4) : Deux types des éoliennes	09
Figure (I.5) : Eoliennes à axe horizontal	10
Figure (I.6) : Eoliennes à axe vertical de type Savonius	10
Figure (I.7) : Eoliennes à axe vertical de type Darrieus	11
Figure (I.8) : Principe de la conversion de l'énergie éolienne	13

#### Chapitre II

Figure (II.1) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	18
Figure (II.2) : Représentation schématique d'une machine asynchrone double Alimentations	19
Figure (II.3) : Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone	21
Figure (II.4) : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	21
Figure (II.5) : Schéma bloc du système à réguler	26
Figure (II.6) : Schéma bloc de la commande direct	27
Figure (II.7) : Schéma bloc de la commande indirect	28
Figure (II.8) : Variation de la puissance active P (watts)	28
Figure (II.9) : Variation de la puissance réactive Q (VAR)	29
Figure (II.10) : Variation du courant $I_{ds}$	29
Figure (II.11) : Variation du courant $I_{qs}$	29
Figure (II.12) : Variation du courant statorique $I_s$	30

#### Chapitre III

Figure (III.1) : Architecture du système avec un convertisseur de puissance	32
Figure (III.2) : Schéma block du système de régulation des puissances	33
Figure(III.3) : Schéma block du système de régulation du courant	34

Figure (III.4) : Schéma de principe d'une P.L.L	35
Figure (III.5) : Schéma simplifié de la PLL classique	36
Figure (III.6) : Représentations des tensions du réseau électrique et de la position Angulaire $\theta$	37
Figure (III.7) : Architecture du système avec la charge linéaire	37
Figure (III.8) : Représentations des courants du système complet	38
Figure (III.9) : Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique est déséquilibrée	39
Figure (III.10) : Représentations des tensions du réseau électrique et de l'angle $\theta$	39
Figure (III.11) : Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique contient des harmoniques	40
Figure (III.12) : Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire $\theta$	40
Figure (III.13) : Schéma du filtre multi-variable	41
Figure (III.14) : Schéma de principe de la P.L.L avec un filtre multi-variable FMV	42
Figures (III.15) : Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire $\theta$	42
Figures (III.16) : Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire $\theta$	42
Figure (III.17) : Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique est déséquilibrée	43
Figure (III.18) : Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique contient des harmoniques	44
Figure (III.19) : Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique est équilibrée	45

## Liste des tableaux

### Chapitre I

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients de l'énergie éolien	06
Tableau (I.2) : Les avantages et les inconvénients éoliens à axe horizontale et axe verticale	12
Tableau (I.3) : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale	13

Tableau(I.4) : Différents types de machines 14

### **Chapitre III**

Tableau (III.1) : Gains des régulateurs utilisés 34

Tableau (III.2): Changement de paramètres de la machine 44



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I</b>	
<b>Etat de l'art</b>	<b>3</b>
Introduction	4
I.1 Historique et évolution de l'exploitation de l'énergie éolienne	4
I.2 Définition de l'énergie éolienne	5
I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	5
I.4 Principaux composants de l'éolienne	6
I.5 Différents types d'éoliennes	9
I.6 puissance et dimensions des aérogénérateurs	12
I.7 Principe de fonctionnement d'une éolienne	13
I.7 Classification des éoliennes selon le type de génératrice	14
I.8. Classification des éoliennes selon leur vitesse	15
Conclusion	16
<b>Chapitre II</b>	
<b>Modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation</b>	<b>17</b>
Introduction	18
II.1 Description de la MADA (à rotor bobiné)	18
II.2 Principe de fonctionnement d'une MADA	19
II.3 Modes de fonctionnement générateur de la MADA	20
II.4 Modélisation de la MADA	22
II.5 Choix du référentiel	23
II.6 Commande vectoriel de la MADA	24
II.7 Différentes méthodes de commande vectorielle	27
II.8 Simulation de la MADA	28
Conclusion	30
<b>Chapitre III</b>	
<b>Commande de machine asynchrone à double alimentation</b>	<b>31</b>
Introduction	32
III.1 Description des éléments du système	32
III.2 Eléments important constituant la commande de la MADA	33
Conclusion	44
<b>Conclusion générale</b>	<b>46</b>
<b>Références</b>	<b>47</b>
<b>Annexe</b>	<b>51</b>

# Introduction générale

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. Cependant ces énergies ne sont pas considérées comme des énergies propres. Alors, on a besoin de chercher d'autres solutions alternatives pour produire l'électricité tel qu'avec des sources renouvelables non polluantes et plus économiques en exploitant bien les éléments de la nature comme l'eau, le soleil et le vent.

De plus, l'augmentation importante de la consommation d'électricité doit être satisfaite et ne peut se faire qu'avec l'utilisation d'énergie propre car les énergies fossiles sont de plus en plus difficiles à extraire et donc ceux font de plus en plus rare. Ainsi, l'énergie éolienne est l'une des plus importantes et des plus prometteuses des sources d'énergie renouvelable à travers le monde en termes de développement notamment car elles sont non polluantes.

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à Double Alimentation (MADA) connecté au réseau électrique. Cependant nous allons voir l'influence des perturbations présente dans le réseau électrique sur le bon fonctionnement de la commande de ce dernier.

Ainsi, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens et les composants qui les constitue de façon générale, incluant les différents générateurs utilisés, leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les topologies et les configurations de la machine asynchrone à double alimentation en fonctionnement générateur (hypo et hyper-synchrone). Ainsi, nous aborderons la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation pour

ensuite valider son modèle par la simulation sous l'environnement « Matlab/SymPower System ».

Dans le troisième chapitre, nous présenterons l'architecture du système complet MADA-réseau électrique-charges. Nous montrerons également l'influence des perturbations présente dans le réseau électrique sur le bon fonctionnement de la commande de notre MADA.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art**

## Introduction

Le vent est une source d'énergie primaire et renouvelable que l'homme utilise depuis des centaines d'années dans sa vie quotidienne : « moulin à vent, bateaux à voile, pour pomper l'eau, ... ». Cependant, ces dernières années nous remarquons que les applications modernes étant la production à grande échelle d'énergie électrique à base d'énergie renouvelable à cause du réchauffement climatique qui impose de changer les centrales polluantes par des systèmes à base d'énergie renouvelable.

Ainsi dans ce chapitre, nous allons présenter l'énergie éolienne, les types d'aérogénérateurs existant et leur principe de fonctionnement.

### I.1 Historique et évolution de l'exploitation de l'énergie éolienne

Depuis au moins 3000 ans, Perses et Egyptiens [01] et [02] utilisèrent les moulins à vent et les roues à eau pour le pompage de l'eau et moulin le blé et le riz. En 1888, Bruch et ses collègues ont réalisé une éolienne, le diamètre de cette turbine était de 17 m et elle fut équipée de 144 pales. Elle générée seulement 12 kW. C'était la première éolienne opérationnelle utilisée pour charger les batteries et comme alimentation continue de lampes et moteurs [03]. Puis il y a eu James Blyth qui essaya diverses machines dont un moulin à axe vertical ayant la forme d'un anémomètre Robinson [04]

En 1891 Poul La Cour a développé une éolienne avec des rotors à 4 pales, permettant de produire 25 kW et a mis en évidence que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales donnèrent un meilleur rendement. Cette éolienne sera la première utilisée à l'échelle industrielle [05].

En 1920 Georges Darrieus imagine une éolienne à axe vertical [05]. En 1957 Johannes Juul crée une turbine appelée Gedser qui sert encore de modèle aux éoliennes actuelles. Les éoliennes utilisant ce type de turbine produisaient jusqu'à 1000 kW.

Ensuite, le développement des éoliennes a été freiné en raison d'une grande consommation en énergies fossiles telles que le pétrole et le charbon [05]. Cependant au cours de la dernière décennie, l'énergie éolienne a reconnu une hausse considérable [01]. Ainsi, la production mondiale a doublé tous les 3 ans depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle [01].

## I.2 Définition de l'énergie éolienne

Une éolienne qui est un aérogénérateur exploite l'énergie éolienne pour produire de l'électricité. Cette énergie peut être utilisée de deux manières, soit pour la :

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile par exemple), pour pomper l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer par exemple) ou pour faire tourner un moulin. [06]
- Production d'énergie électrique: la turbine est couplée à un générateur électrique pour produire du courant. Le générateur est relié à un réseau électrique ou à un système autonome ou à un dispositif de stockage d'énergie. [06]



*Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent*

## I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente des inconvénients qu'il est nécessaire de palier pour qu'elles ne constituent pas un frein à son développement.

Le tableau ci-dessous montre les avantages et inconvénient de l'énergie éolienne :

**Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement [07]	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo.
L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules).	Possède un mécanisme bruyant.
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant.	Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets toxiques.	L'impact visuel, « ça reste néanmoins un thème subjectif »
L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.	La qualité de la puissance électrique : la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
Le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.	
La surface occupée au sol est peu importante.	
C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.	
Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. Le cout d'investissement nécessaire est faible par rapport a des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà. [08]	

#### **I.4 Principaux composants de l'éolienne**

Une éolienne est généralement constituée de cinq éléments principaux : la nacelle, la tour, la génératrice, le rotor et le multiplicateur.

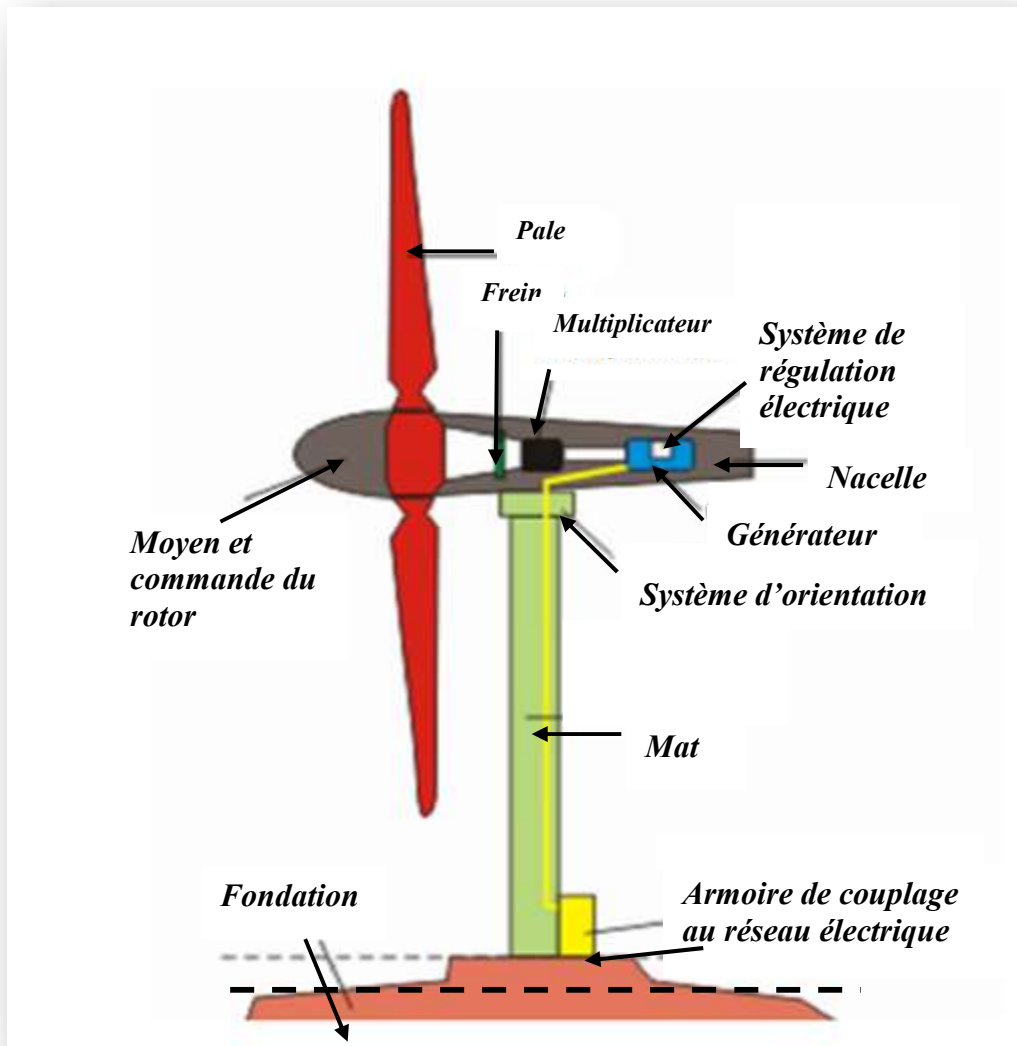
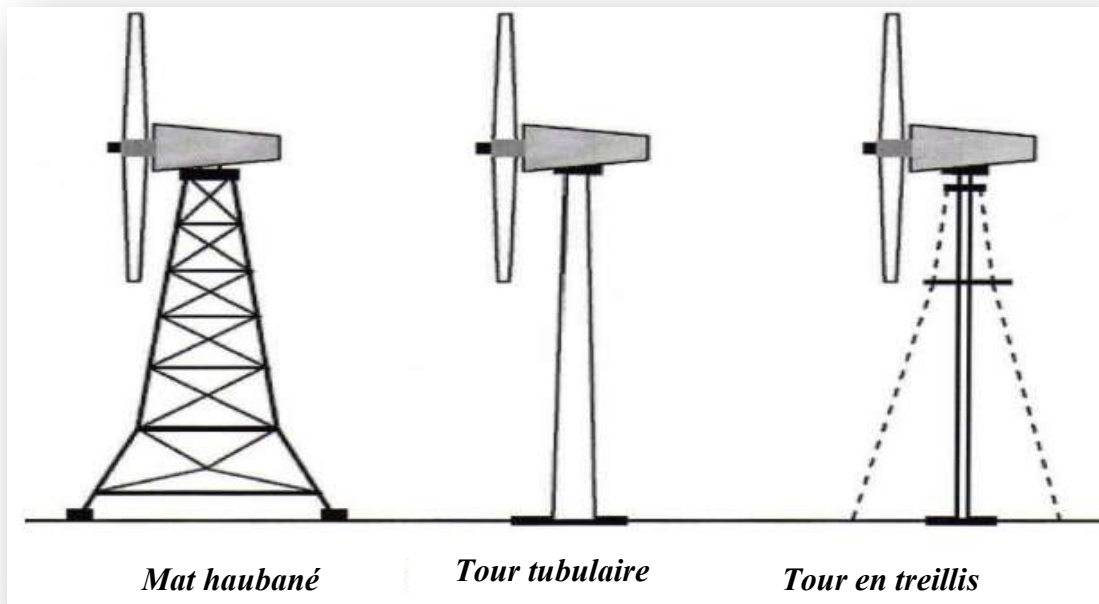


Figure I.2 : schéma d'une éolienne [09]

- **La nacelle [10]** : Au sommet du mât se trouve la nacelle qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein, générateur...)
- **La tour (le mat)** : C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Trois grands types de tour existent, à savoir :
  - **Tour mât haubané** de construction simple et moins coûteuse, elle s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.



- **Tour en treillis** qui sont les moins chères sont souvent mal acceptées et très peu utilisées. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain
- **Tour tubulaire** qui est beaucoup plus élégant, a un cout qui peut atteindre trois à quatre fois celui d'un pylône haubané.



*Figure I.3 : Différents types de tours [11]*

- **Le rotor** : Le rotor est entraîné par l'énergie du vent via des pâles, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie (pompe, générateur électrique ...).
- **Le multiplicateur** : Sert à adapter la vitesse de la turbine de l'éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **La génératrice** : C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est généralement soit une machine synchrone, ou une machine asynchrone à cage ou encore une machine à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [12].

## I.5 Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes familles d'éoliennes certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres ont un axe vertical, perpendiculaire au sol.

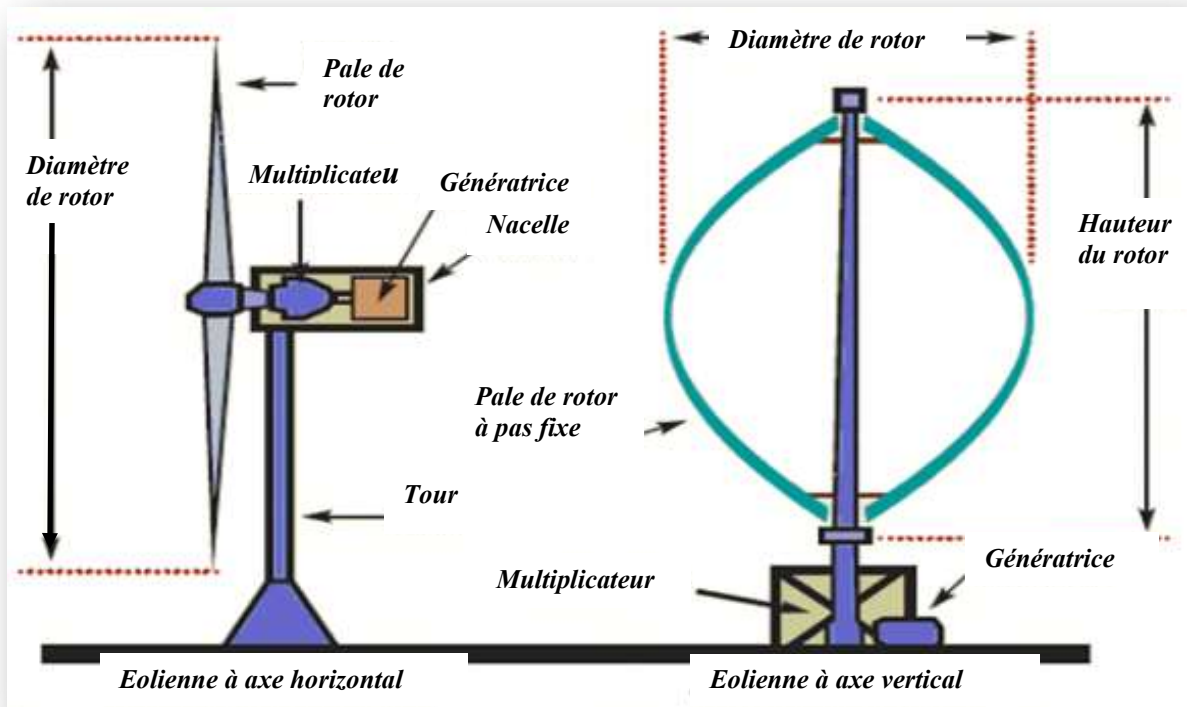
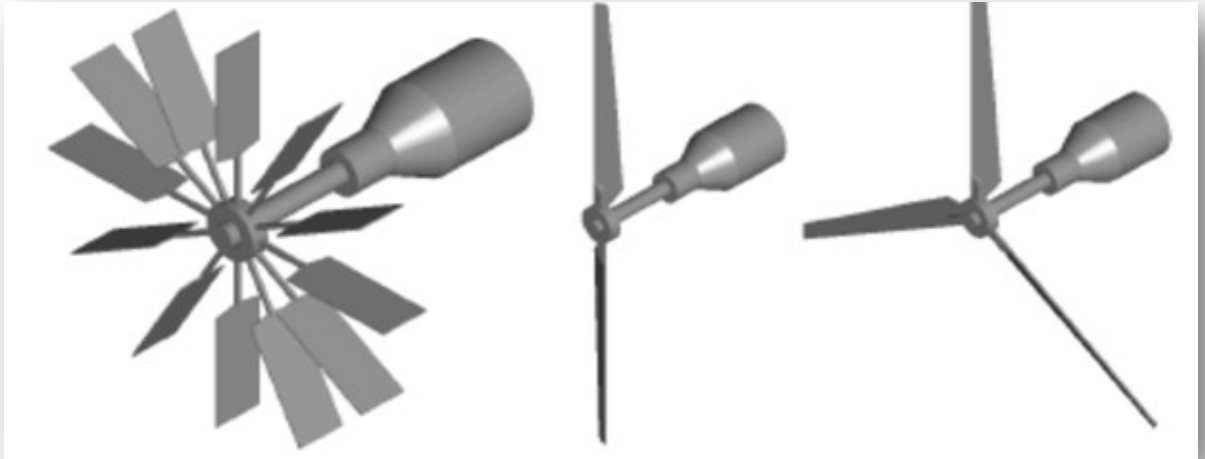


Figure I.4 : deux types des éoliennes [13]

- **Concernant les éoliennes à axe horizontal :** Elles sont souvent appelées "éolienne à hélices" et sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles s'orientent suivant la direction du vent. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois (les plus courantes) ou plusieurs pales.

Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion [14].

Elles sont implantées dans les zones rurales ou en mer car elles nécessitent de la place.



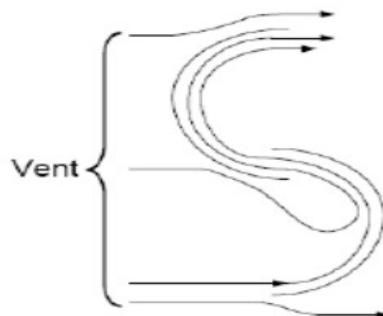
*Eolienne à pale*

*Eolienne à deux*

*Eolienne à trois*

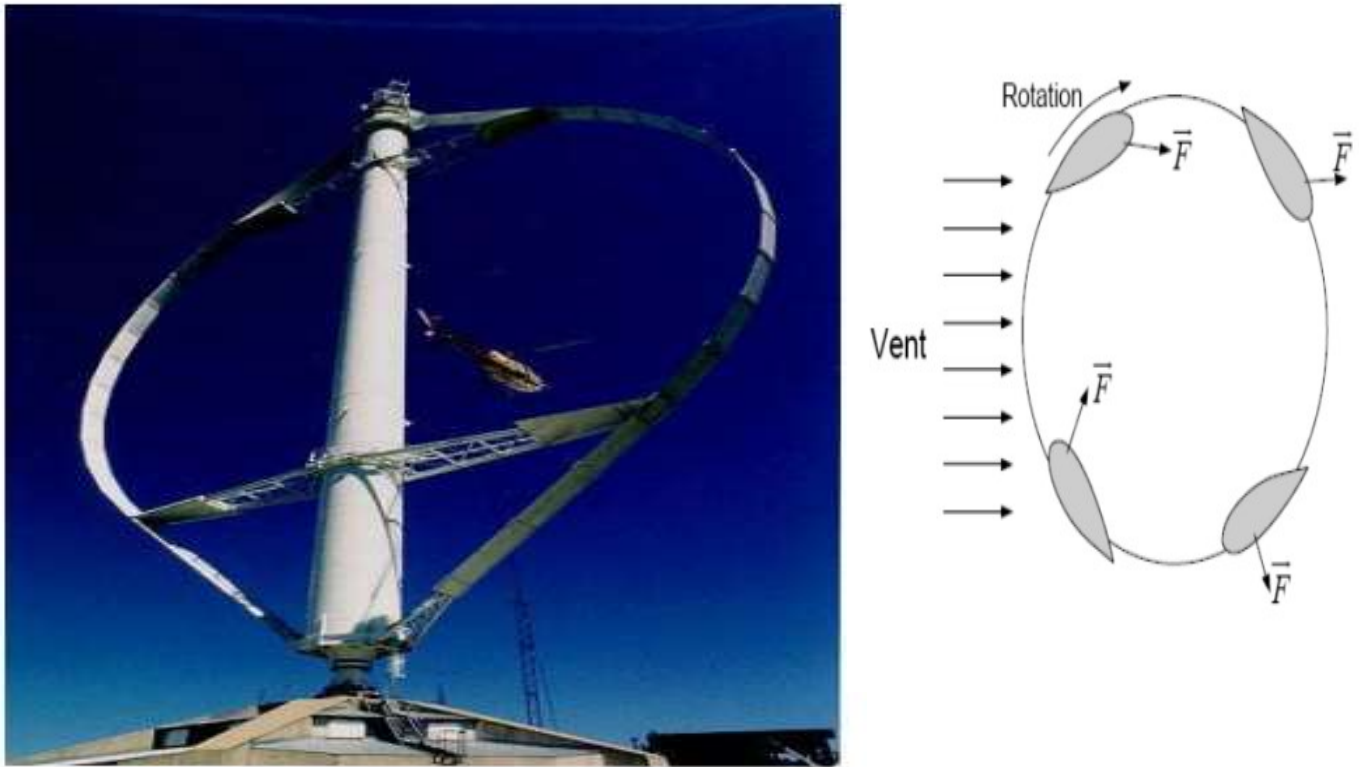
*Figure I.5 : Eoliennes à axe horizontal [13]*

- **Concernant les éoliennes à axe verticale :** elles ont été les premières structures utilisées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Il existe deux types d'éolienne verticale, les éoliennes de Savonius (inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924), Ils sont basés sur le principe de la traînée 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 [16].



*Figure. I.6 : éoliennes à axe vertical de type Savonius [15]*

Et les éoliennes de Darrieus (conçu par l'ingénieur français George Darrieus) [15]. Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction de l'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig. I.7). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. [16]



*Figure I.7 : éoliennes à axe vertical de type Darrieus [15]*

Parmi les avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontale et axe verticale, nous avons :

**Tableau I.2: Les avantages et les inconvénients éoliennes à axe horizontale et axe verticale**

	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical</b>
Avantages	Coût limité. [17]	De conception plus simple que les machines à axe horizontal.
	Peu de contraintes mécaniques. [17]	Elle est plus facile d'accès.
	Grande efficacité.	La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. [19]
Inconvénients	Bruit conséquent.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal
	Vibrations non négligeables. [18]	Les éoliennes ne démarrent pas automatique, il faut utiliser la génératrice come moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne.
	Grande sensibilité au flux éolien et sa variation. [17]	Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [19]

## I.6 Puissance et dimensions des aérogénérateurs

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [20], ainsi nous avons :

- Les éoliennes de petite puissance : inférieures à 40 KW
- Les éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW
- Les éoliennes de forte puissance : supérieures à 1 MW

De plus, le tableau ci-dessous propose une classification de ces éoliennes selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice :

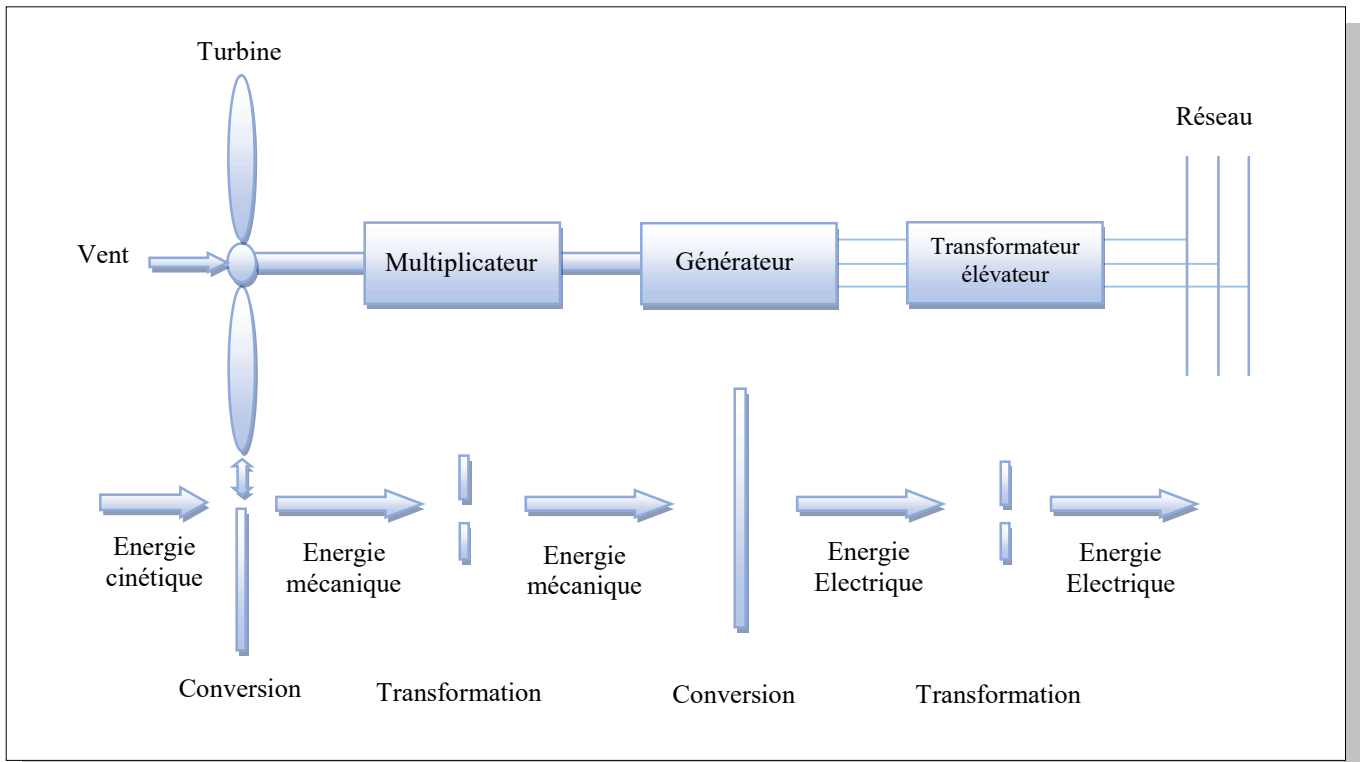
**Tableau. I.3 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale**

Eolienne	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

### I.7 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes : [21]

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique transmise en suite au réseau électrique.



**Figure I.8 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne [22]**

Son principe de fonctionnement est donc relativement simple. Pour résumer, le vent va faire tourner les pales qui elles-mêmes vont faire tourner le générateur. A son tour le générateur va transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. L'électricité est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage.

### I.7 Classification des éoliennes selon le type de génératrice

Un **générateur électrique** est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Donc il existe différents types de génératrices. On les classe généralement en deux catégories, les génératrices synchrones et les génératrices asynchrones. Le tableau suivant montre les avantages et inconvénients des différentes machines.

**Tableau I.4 : Différent type des machines [23]**

	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
M. asynchrone (à cage)	Faible cout	Puissance extraite non optimisé
	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fiabilité de l'électronique de puissance	Pas de contrôle de l'énergie réactive
		Magnétisation de la machine imposée par le réseau
M. asynchrone (MADA)	Machine robuste	Maintenance de boite de vitesse
	Fonctionnement a vitesse variable	Prix de l'électronique de puissance
	Puissance extraite optimisée	Contrôle commande complexe
	Machine standard	Contact glissant bagues balais
Machine synchrone (MSAP)	Très bon rendement.	Coût élevé (à cause du prix des aimants)
	Fonctionnement a vitesse variable sur toute la plage de vitesse.	-Prix de l'électronique de puissance
	-Puissance extraite optimisée pour les vents faibles.	-Beaucoup plus chair
		-Moins robuste

## I.8. Classification des éoliennes selon leur vitesse :

Il y a deux types d'éoliennes raccordées aux les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [23].

- **Concernant les éoliennes à vitesse fixe :** Elles sont les premières à avoir été développé. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de pair de pole de la génératrice. Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrone à cage d'écureuil peuvent se résumer dans les points suivants [08]:
  - ✓ Système électrique simple.
  - ✓ Grande fiabilité.
  - ✓ Prix modéré.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
  - ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La Connexion directe au réseau électrique d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée.
- **Concernant les éoliennes à vitesse variable :** Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales. De plus, il limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent [24]. Mais dans ce cas, l'utilisation de convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est



nécessaire [25]. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [17].

Parmi les avantages de cette configuration nous avons [26] :

- ✓ L'augmentation du rendement énergétique.
- ✓ La réduction des oscillations de couple (Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques).
- ✓ La génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

## **Conclusion**

Nous avons écrit dans ce chapitre les différentes éoliennes qui existent, les éléments qui la compose et leurs principes de fonctionnement.

Dans ce qui suit nous allons étudier les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones à double alimentation.

## **Chapitre II**

# **Modélisation et commande de la machine asynchrone à double alimentation**

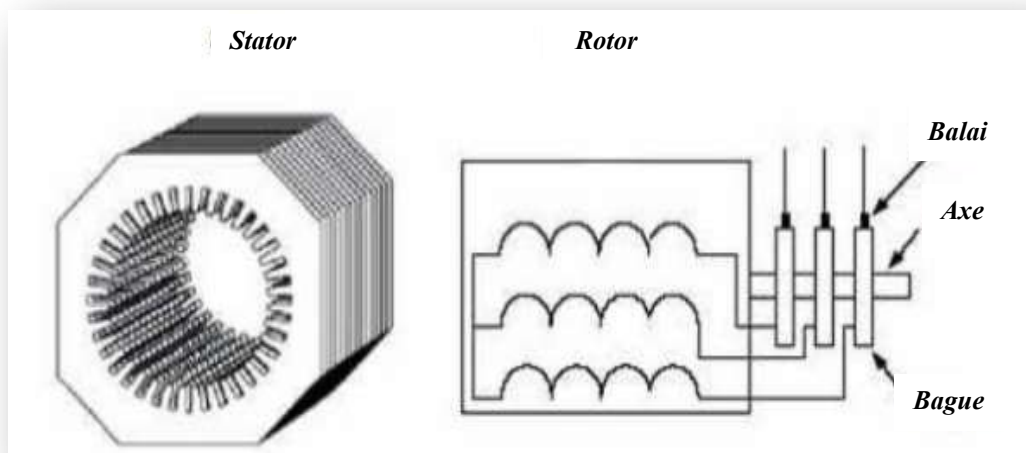
## Introduction

Il existe plusieurs types d'éolienne de différentes structures et commande. Parmi ces éoliennes plusieurs chercheurs ont fait des études sur les machines asynchrones double alimentation car il présente plusieurs avantages comme il a été présenté dans le chapitre précédent.

Ainsi, ce chapitre sera consacré à la modélisation et la commande du système complet de l'éolienne. Pour cela, nous nous sommes orientés vers la machine asynchrone à double alimentation MADA.

### II.1 Description de la MADA (à rotor bobiné) :

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine triphasée à courant alternatif. Elle est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches de ce stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine. Elle contient trois enroulements identiques et symétriques couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois bagues figure (II.1).



*Figure II.1. : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [26]*

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur à base d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. L'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur a soit un mode appelé hypo ou hyper synchrone [27].

## II.2 Principe de fonctionnement d'une MADA

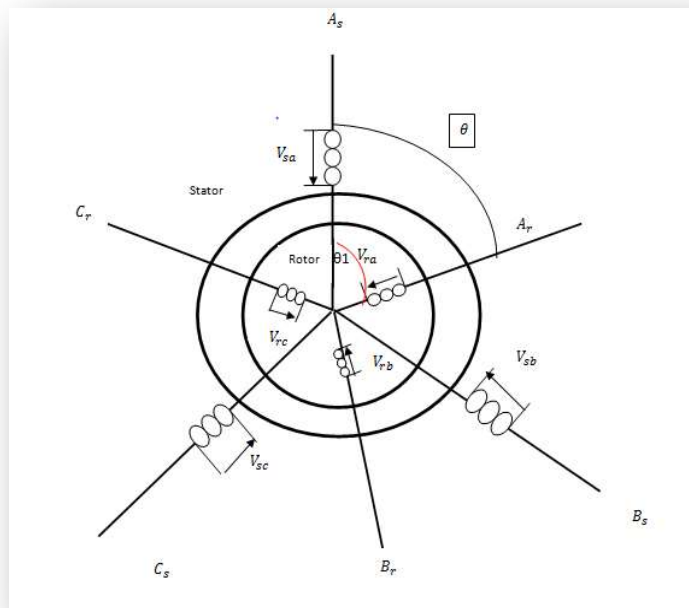
Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge [28]. Comme la machine asynchrone, elle se compose d'un stator qui est fixe, et d'un rotor qui est mobile. Le stator est alimenté par une tension triphasé. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.1})$$

$\omega_s$ : La pulsation du réseau d'alimentation triphasé.

$p$ : Le nombre de paire des pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor tourne à la vitesse  $\frac{d\theta}{dt}$  par rapport au stator, avec  $\theta$  est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure (II.2). [29]



**Figure II.2. : Représentation schématique d'une machine asynchrone double Alimentations**

Pendant la rotation, le flux magnétique qui est généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créées au rotor et au stator est [30] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} * \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (\text{II.2})$$

Tel que :

$N_s$  et  $N_r$  : Sont respectivement le nombre de spires des bobinages statoriques et rotoriques.

$\omega_s$  et  $\omega_{mec}$  : sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

En définissant le glissement par

$$g = \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (II.3)$$

Donc l'équation (II.2) et (II.3) devient :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} * g \quad (II.4)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_r}{N_s} \quad (II.5)$$

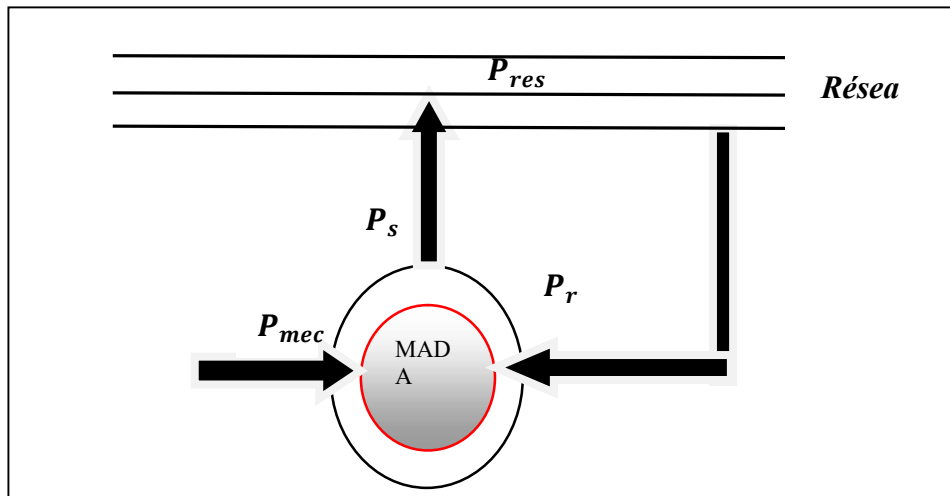
Donc, le rapport entre la puissance  $P_r$  au rotor et la puissance  $P_s$  au stator devient :

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{i_r}{i_s} * \frac{E_r}{E_s} = g \quad (II.6)$$

### II.3 Modes de fonctionnement générateur de la MADA

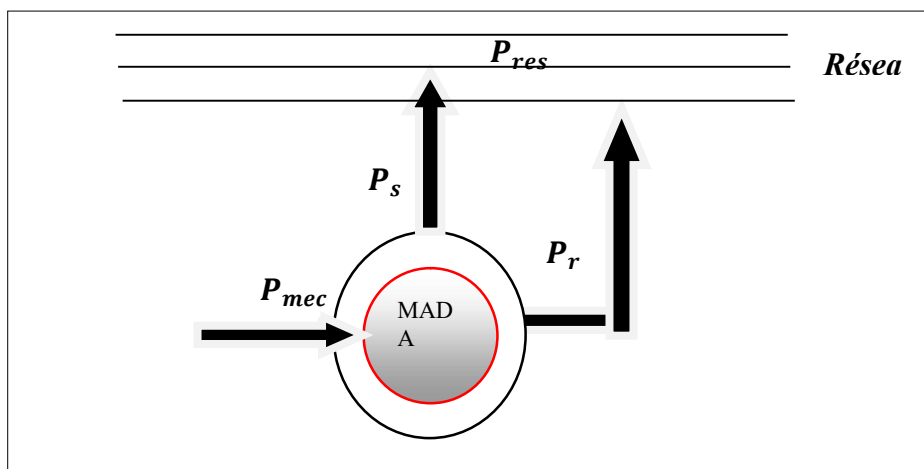
En générale, la MADA peut de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement du moteur ou du générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur [31]. Par contre pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Ainsi, pour un fonctionnement :

- **Hypo-synchrone** : La puissance est fournie au réseau par le stator. De plus, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor, et pour terminer la vitesse de rotation et en dessous de la vitesse de synchronisme [17].



*Figure II.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone*

- **Hyper synchrone** : Nous avons la puissance qui est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau et la vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme. [32]



*Figure II.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone*

Tel que :

$P_s$  : Puissance statorique.

$P_r$  : Puissance rotorique.

$P_{mec}$  : Puissance mécanique.

$P_{res}$  : Puissance de réseau

## II.4 Modélisation de la MADA :

Pour mieux comprendre la commande vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), il est important de le modéliser, afin de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle pour réaliser sa commande vectorielle pour faire des simulations en régimes dynamique et permanent. Pour faire, il faut une analyse qui tient compte de sa configuration exacte, mais du fait de sa complexité il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices qui sont : un entrefer constant, l'effets des encoches qui sont négligeables, un circuit magnétique non saturée et à perméabilité constante et des pertes ferromagnétiques négligeables [33] et [34]. Après avoir présenté les hypothèses, nous pouvons présenter :

- **Les équations électriques de la MADA :** D'après les conditions précédentes les équations sous forme matricielle peuvent s'écrire, pour le stator et le rotor :

$$\begin{cases} V_{abc} = R_s \cdot [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \\ V_{ABC} = R_r \cdot [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{ABC}] \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$R_s$  et  $R_r$  sont respectivement les résistances statorique et rotoriques par phase.

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

$$[V_{abc}] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \text{ étant le vecteur de la tension statorique.}$$

$$[\varphi_{abc}] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \text{ étant le vecteur de flux statorique.}$$

$$[i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \text{ étant le vecteur de courant statorique.}$$

et les vecteur rotoriques sont définis de la même façon avec un changement d'indice de « abc » vers « ABC ».

- **Les équations magnétiques :** qui sont donné comme suite :

$$\begin{cases} [\varphi_{abc}] = [L_s] \cdot [i_{abc}] + [M_{sr}] \cdot [i_{ABC}] \\ [\varphi_{ABC}] = [L_r] \cdot [i_{ABC}] + [M_{rs}] \cdot [i_{abc}] \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \text{ et } [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$[L_s], [L_r]$  Représentent respectivement les matrices d'inductances statoriques et rotoriques.

$M_s, M_r$  représentent les mutuelles statoriques et rotoriques.

Ainsi, les inductances mutuelles entre phase statorique et rotorique ont pour expression :

$$[M_{rs}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec :  $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

Nous obtenons à partir des équations (II.7) et (II.8) l'expression :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = R_s \cdot [i_{abc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [i_{abc}] + [M_{sr}] \cdot \frac{d}{dt} [i_{ABC}] \\ [V_{ABC}] = R_r \cdot [i_{ABC}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [i_{ABC}] + [M_{sr}] \cdot \frac{d}{dt} [i_{abc}] \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

- **L'équation mécanique :** Nous avons l'expression du couple électromagnétique qui est égale à :

$$C_{em} = p [i_{abc}]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] [i_{ABC}]) \quad (\text{II.10})$$

Et ainsi nous avons l'expression mécanique qui est égale à :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.11})$$

## II.5 Choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différents référentiels. Il existe trois choix importants on peut fixer le référentiel (d-q) [35] au référentiel fixe (lié Au stator), référentiel rotorique (lié Au rotor) et référentiel synchrone (lié au champ tournant).

Pour notre étude, nous allons travailler avec le référentiel lié au champ tournant, car son module permet d'avoir des grandeurs rotoriques et statorique constante dans le régime permanent, et donc une régulation plus aisée [35].

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \text{ et } \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = \omega_s - \omega = g \cdot \omega_s.$$



Après l'application de la transformation de Park, on obtient le système des équations (II.12) et (II.13) qui représente le modèle de la MADA dans le repère (d-q), qui est lié au champ tournant, nous avons ainsi :

- Les équations de tension statorique :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

- Les équations de tension rotorique :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En multipliant l'équation magnétique (II.8) par la matrice de Park, on obtient :

- Les équations magnétiques statorique :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

- Les équations magnétiques rotorique :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Tel que  $M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$  est la mutuelle cyclique entre rotor-stator

## II.6 Commande vectoriel de la MADA

Des expressions précédentes nous avons défini la transformée de Park nécessaire au changement de coordonnées utilisé pour la commande vectorielle. La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes ( $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon à ce que l'une des composantes ( $I_{qs}$ ) commande le couple et l'autre ( $I_{ds}$ ) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée. [37]

De plus, en supposant que le référentiel est lié au champ tournant et que le flux statorique est orienté sur l'axe d, nous avons alors :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

En plus, pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes, on néglige la résistance du bobinage statorique ( $R_s = 0$ ). Ainsi, en écrivant l'équation (II.16) dans l'équation (II.2), nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \cdot \varphi_s \rightarrow \varphi_s = \frac{V_{qs}}{\omega_s} = \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les expressions des puissances active et réactive statorique sont alors donné par l'expression suivante :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} \\ Q_s = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Les puissances active  $P_s$  et réactive  $Q_s$  sont donc respectivement en fonction des courants statoriques  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ , sur lesquels nous avons aucune action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques. A partir des expressions des flux statoriques (II.14), nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s * I_{ds} + M * I_{dr} \Rightarrow I_{ds} = \frac{\varphi_s - M * I_{dr}}{L_s} \\ \varphi_{qs} = L_s * I_{qs} + M * I_{qr} \Rightarrow I_{qs} = \frac{-M * I_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant les courants statoriques ( $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ ) obtenus dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

En remplaçant maintenant  $\varphi_s$  par  $\frac{v_{qs}}{\omega_s} = \frac{v_s}{\omega_s}$  on aura alors les expressions des puissances qui deviennent :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M V_s}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Concernant les expressions des tensions rotoriques, sachant que :

•  **$\varphi_{dr}$  en fonction de  $I_{dr}$  :**

$$\varphi_{dr} = L_r * I_{dr} + M * I_{ds} \Rightarrow \varphi_{dr} = L_r * I_{dr} + M * \left( \frac{\varphi_s - M * I_{dr}}{L_s} \right)$$

$$\varphi_{dr} = L_r * I_{dr} + M * \left( \frac{v_s - M * I_{dr}}{\omega_s L_s} \right)$$

$$\varphi_{dr} = I_{dr} \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + \frac{M * v_s}{\omega_s * L_s}$$

•  $\varphi_{qr}$  en fonction de  $I_{qr}$  :

$$\varphi_{qr} = L_r * i_{qr} + M * i_{qs} \Rightarrow \varphi_{qr} = L_r * I_{qr} + M * \frac{-M * I_{qr}}{L_s}$$

$$\varphi_{qr} = L_r * I_{qr} - \frac{M^2}{L_s} * I_{qr}$$

$$\varphi_{qr} = I_{qr} * \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right]$$

On obtient donc le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{dI_{dr}}{dt} \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] - g \cdot \omega_s \cdot I_{qr} \cdot \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{dI_{qr}}{dt} \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + g \cdot \omega_s \cdot I_{dr} \cdot \left[ L_r - \frac{M^2}{L_s} \right] + g \frac{M \cdot v_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.22)$$

En posant ( $\sigma \cdot L_r = L_r \cdot \frac{M^2}{L_s}$ ) nous avons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r * i_{dr} + \frac{dI_{dr}}{dt} \cdot \sigma \cdot L_r - g \cdot \omega_s \cdot I_{qr} \cdot \sigma \cdot L_r \\ V_{qr} = R_r * i_{qr} + \frac{dI_{qr}}{dt} \cdot \sigma \cdot L_r + g \cdot \omega_s \cdot I_{dr} \cdot \sigma \cdot L_r + g \cdot \frac{M \cdot v_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.23)$$

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

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r * i_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot I_{qr} \cdot \sigma \cdot L_r \\ v_{qr} = R_r * i_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot I_{dr} \cdot \sigma \cdot L_r + g \cdot \frac{M \cdot v_s}{L_s} \end{cases} \quad (II.24)$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone

Ces équations permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler :

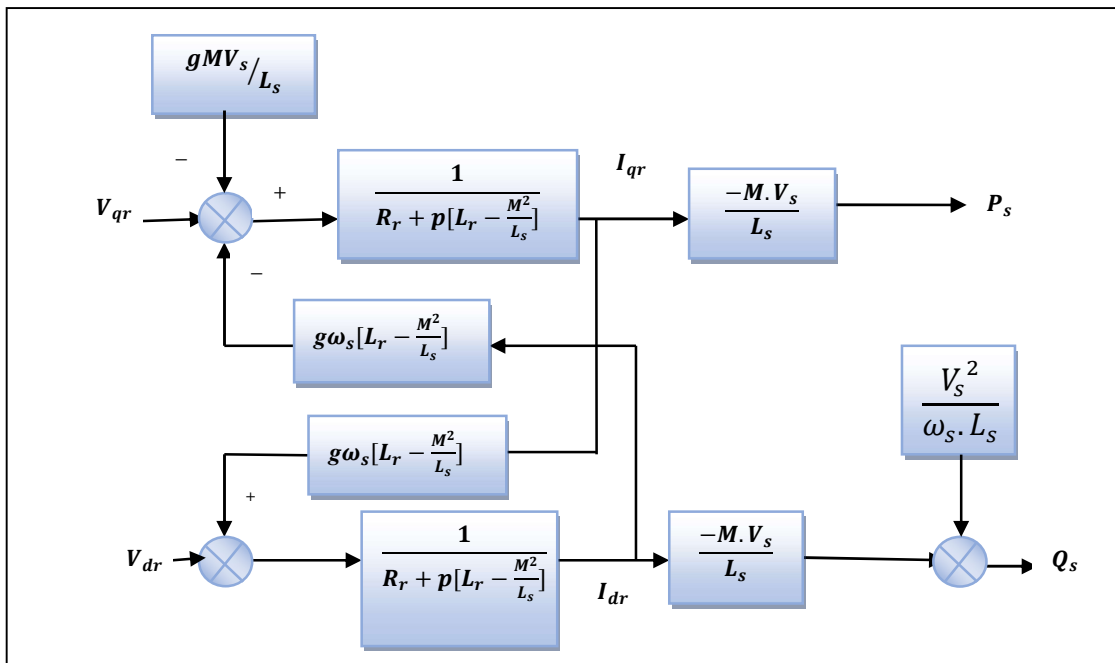


Figure II.5. Schéma bloc du système à réguler

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

## II.7 Différentes méthodes de commande vectorielle [38]

Il y a deux méthodes pour effectuer la commande en puissance de cette machine, la méthode qui consiste à négliger les termes de couplage ( $g\omega_s[L_r - \frac{M^2}{L_s}]$ ) et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive. Cette méthode est appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

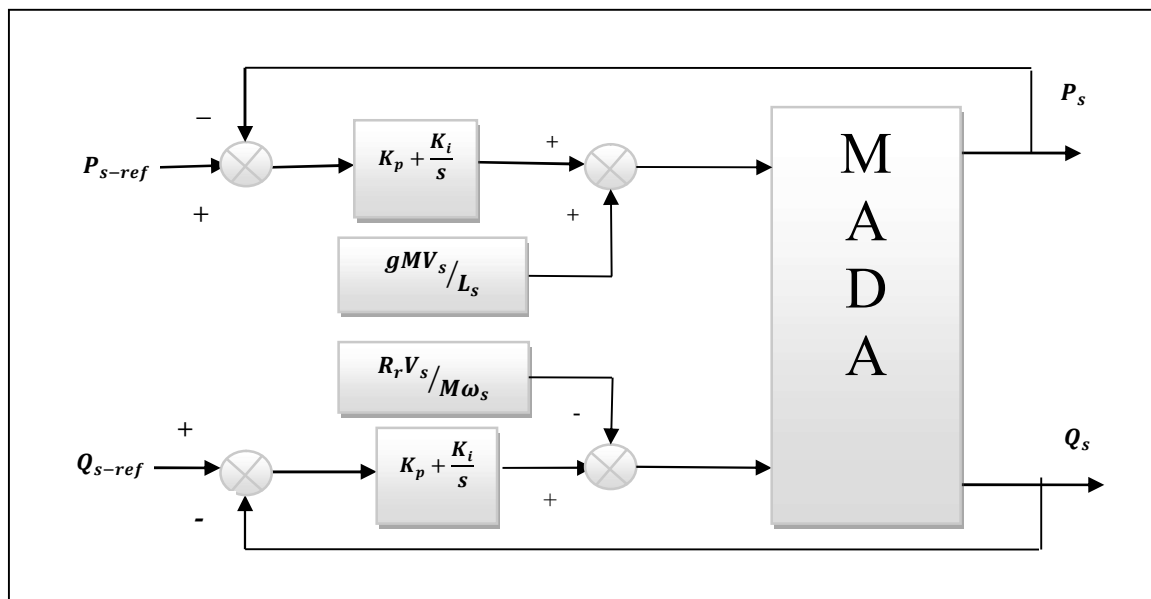


Figure II.6. Schéma bloc de la commande directe

Et la méthode qui consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte découle directement des équations (II.21) et (II.22). (Voir figure II.7)

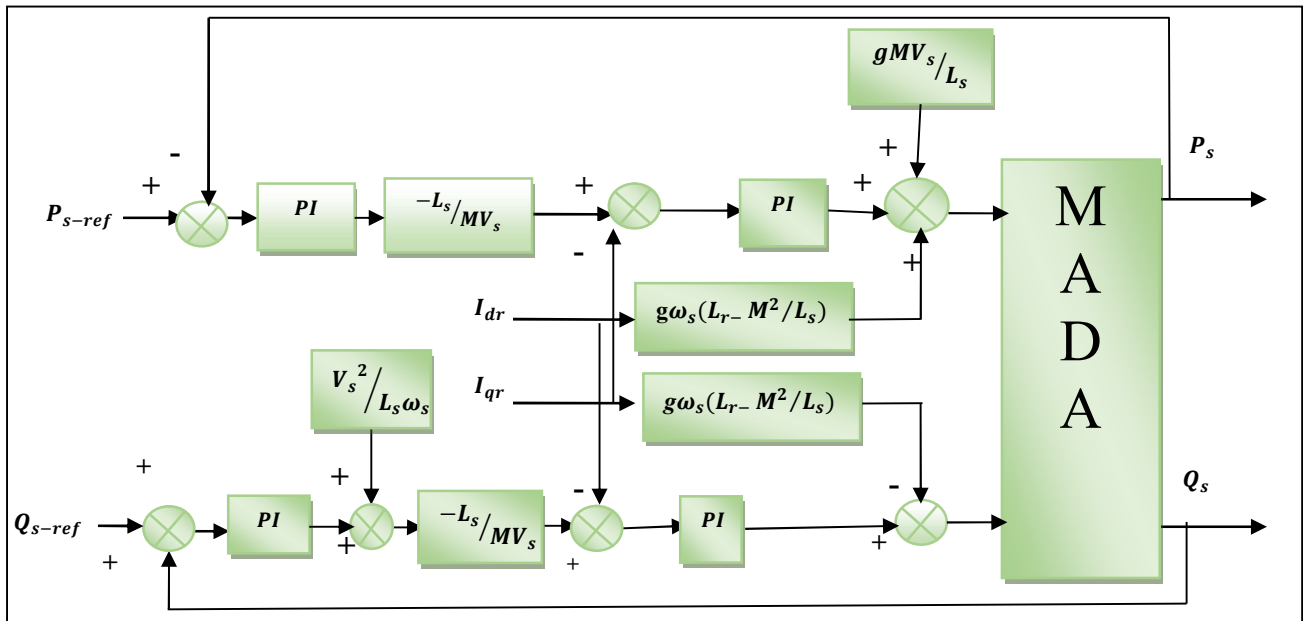


Figure II.7. Schéma bloc de la commande indirecte

## II.8 Simulation de la MADA

A l'aide du logiciel MATLAB/ SimPower System, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour le fonctionnement générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (repère (d-q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une MADA d'une puissance de 1.5 MW, en utilisant la commande indirecte. Les paramètres de la MADA en mode générateur utilisée dans la simulation sont donnés en annexe A. Les résultats de simulation sont :

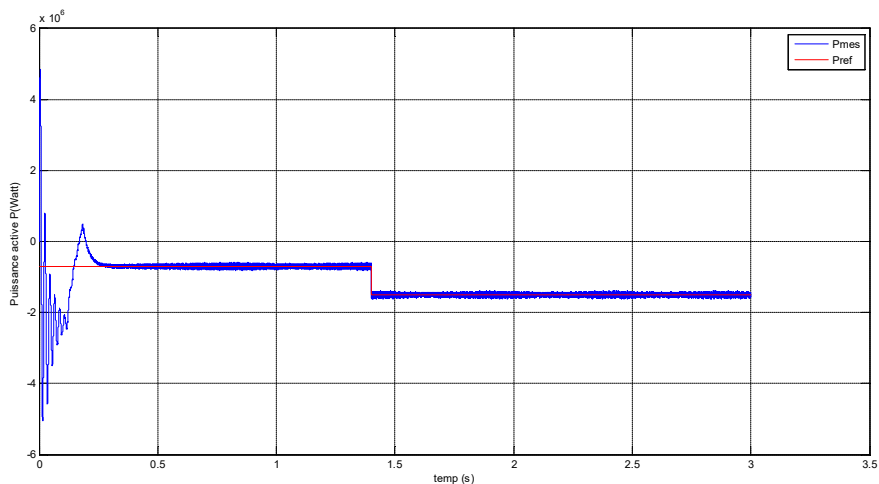
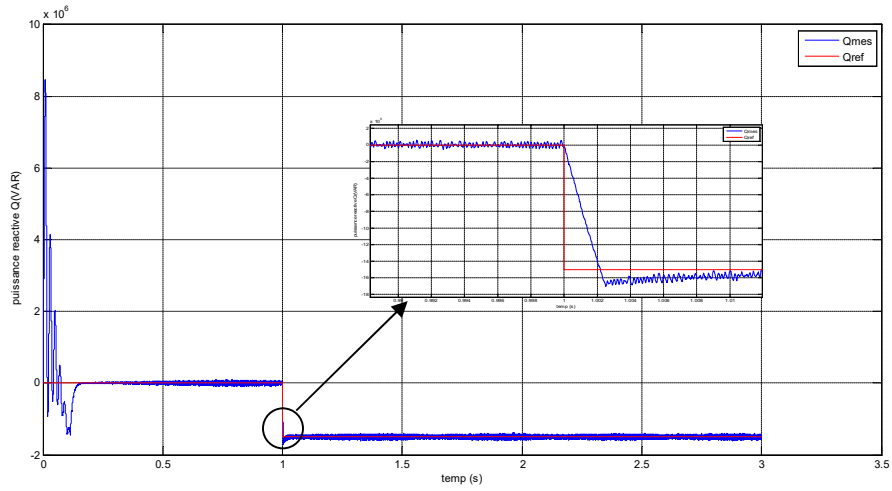
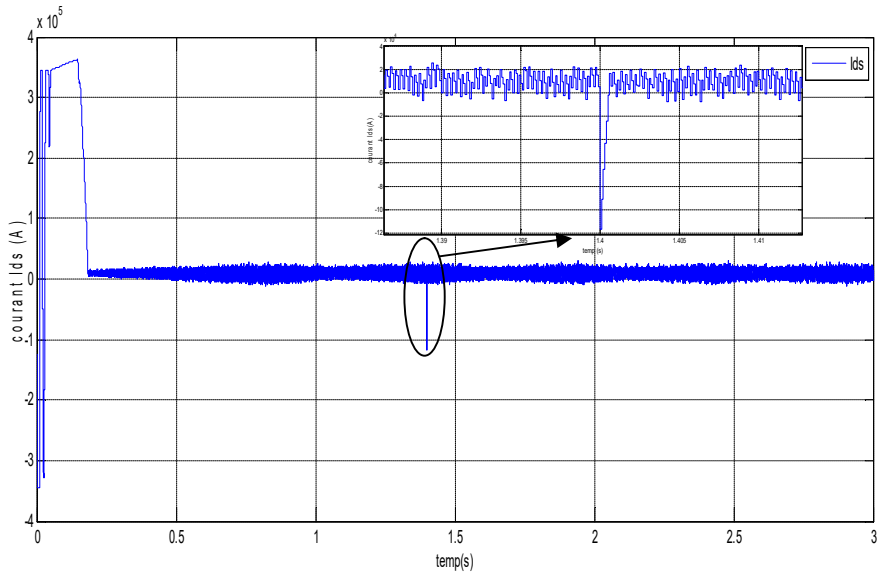


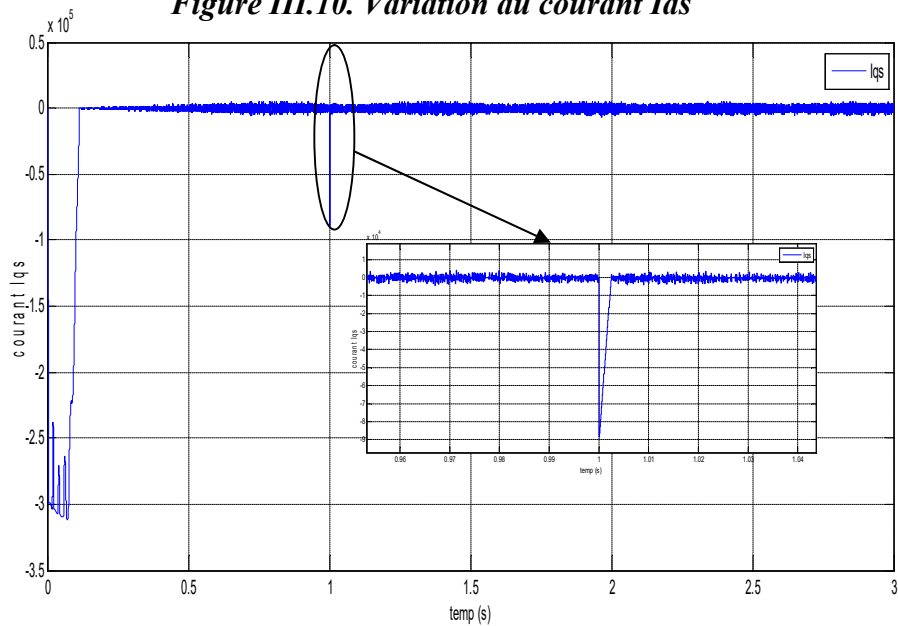
Figure III.8. Variation de la puissance active P (watts)



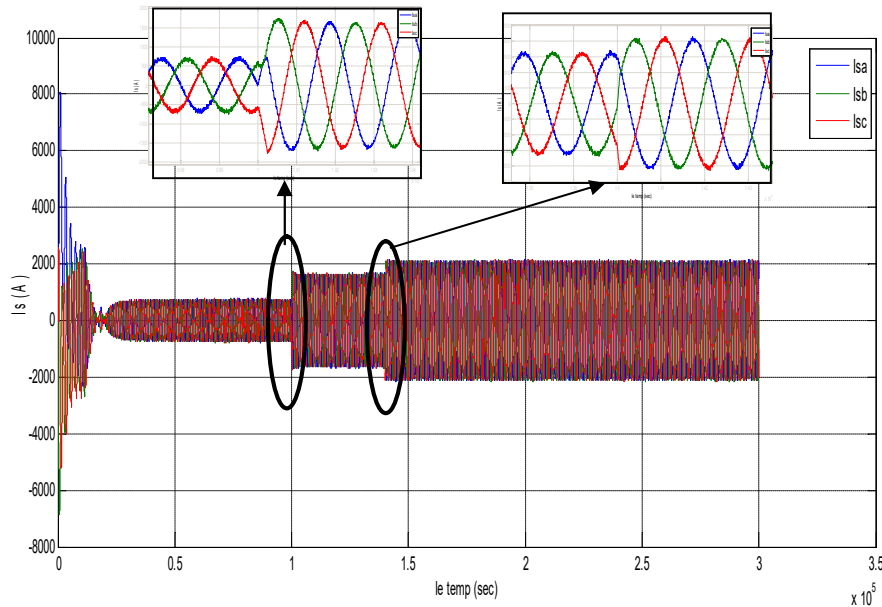
**Figure III.9. Variation de la puissance réactive  $Q$  (VAR)**



**Figure III.10. Variation du courant  $I_{ds}$**



**Figure III.11. Variation du courant  $I_{qs}$**



**Figure III.12.** Variation du courant statorique  $I_s$

Nous avons appliqué des échelons de puissance active et réactive comme suite :

- à  $t=1s$  on pose un échelon à la puissance réactive  $Q$  qui passe de  $54000$  [VAR] à  $-1670000$  [VAR].
- et à  $t=1.4$  sec on pose un échelon de la puissance active  $P$  qui passe de  $-600000$  [W] à  $-1600000$  [W].

D'après les figures, on remarque un bon suivi de la consigne (échelon) pour les puissances active et réactive avec un simple régulateur PI. De plus, nous remarquons que le courant  $I_s$  est de forme sinusoïdale, et son amplitude change pour chaque variation de la puissance active et réactive.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, et les différents modes de fonctionnements. Ensuite, nous avons modélisé le système global d'une éolienne de  $1.5$  [MW] de puissance à vitesse variable et nous avons simulés le système complet (turbine + MADA).

Les simulations nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de la MADA en mode génératrice.

**Chapitre III**

**Commande de machine asynchrone à  
double alimentation**

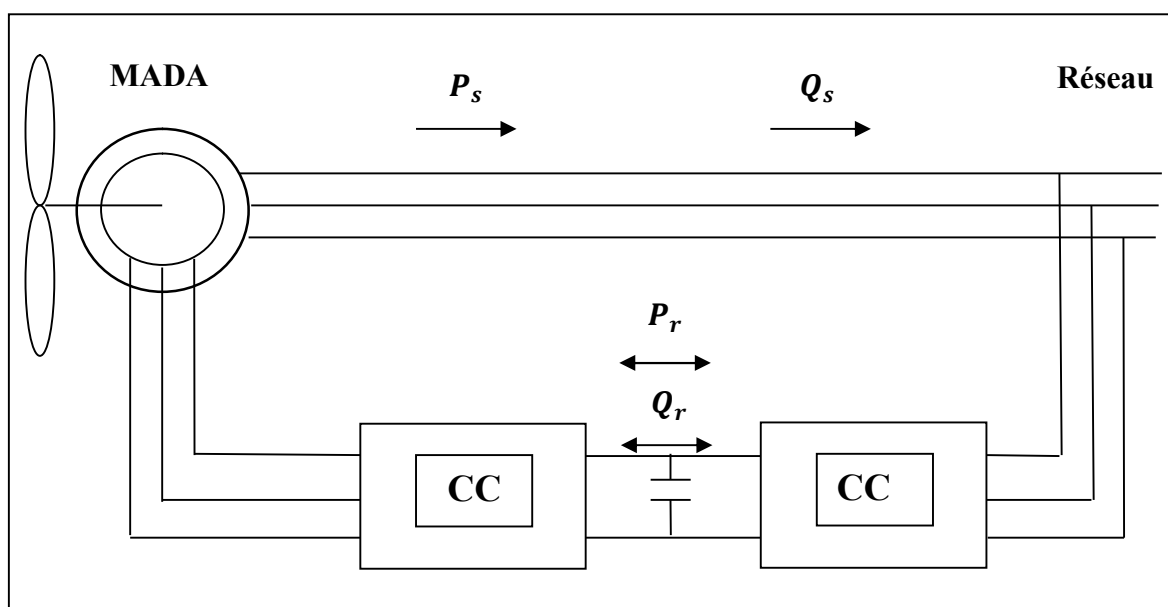


## Introduction

La mise en équation de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans le chapitre 2. Ainsi, dans ce chapitre, nous allons présenter et étudier en détail la topologie back-to-back, puis nous allons procéder à la synthèse des régulateurs qui assureront le bon fonctionnement de notre commande.

### III.1 Description des éléments du système

La figure (III.1) représente la topologie de notre MADA qui est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.



*Figure. III.1. Architecture du système avec un convertisseur de puissance*

Ce schéma représente la topologie back-to-back ; c'est à dire que Le rotor de la MADA est connecté au réseau électrique via un filtre  $R_f-L_f$  et de deux convertisseurs statiques l'un est nommé convertisseur coté machine (CCM), l'autre est nommé convertisseur coté rotor (CCR). Ces deux convertisseurs sont reliés entre eux coté continu par un condensateur. Le premier convertisseur permet de contrôler la puissance active et réactive statorique et le couple électromagnétique. Le second permet de contrôler le facteur de puissance et de réguler la tension du bus continu. Le transformateur à la sortie de la MADA permet d'élever la tension pour le raccorder au réseau de distribution. Actuellement, il n'y a pas d'éolienne

directement connectée sur le réseau de transport. Enfin Le stator est directement connecté au réseau. La MADA fonctionne soit en mode :

- **Hyper synchronise** lorsque le convertisseur coté machine fonctionne en redresseur et le convertisseur coté réseau fonctionne en onduleur. On règle la commande de l'onduleur pour ajuster et obtenir en sortie de l'onduleur un signal d' une amplitude et une fréquence adaptées à celles du réseau, après le passage par le transformateur élévateur de tension
- **Hypo synchronise** lorsque le convertisseur coté réseau fonctionne en redresseur et le convertisseur coté machine fonctionne en onduleur. L'onduleur dans ce cas règle l'amplitude et la fréquence du signal à envoyer vers le rotor de la MADA.

### III.2 Eléments important constituant la commande de la MADA

Parmi les éléments important constituant la commande indirecte de la MADA, il y a :

#### 1. Le calcul des régulateurs :

- Le premier régulateur est pour le contrôle de la puissance. Il est représenté par la figure suivante :

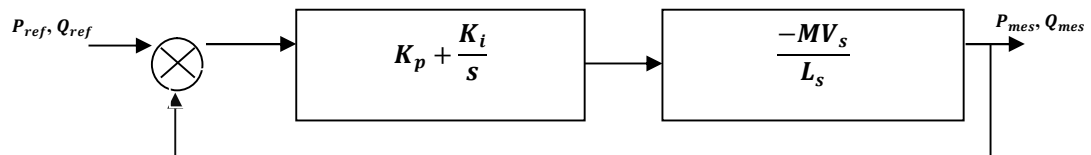


Figure III.2. Schéma block du système de régulation des puissances

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de notre système est présentée par les expressions suivantes :

$$FTBO = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot \frac{-MV_s}{L_s} \quad (III.1)$$

Concernant la fonction de transfert en boucle fermée il est donné par l'expression :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1+FT} = \frac{(K_p s + K_i) \frac{-MV_s}{L_s}}{s + (K_p s + K_i) \frac{-MV_s}{L_s}} \quad (III.2)$$

De cette FTBF nous obtenons :

$$K_p = 0 \tag{III.3}$$

et

$$K_i = \frac{3}{\frac{-MVs}{L_s} T_r} \tag{III.4}$$

- Le second régulateur est utilisé pour le contrôle du courant. Il est représenté sur la figure suivante :

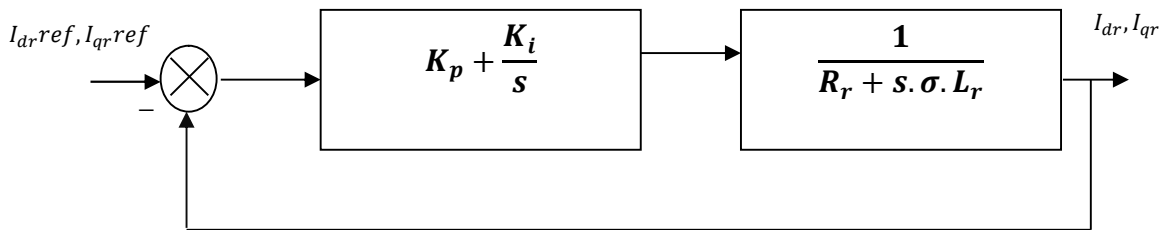


Figure III.3. Schéma block du système de régulation du courant

Après avoir fait les calculs des gains de ce régulateur nous avons trouvé les valeurs qui sont regroupé dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Gains des régulateurs utilisés

METHODE	Commande indirecte BF	
Grandeur	Courants	Puissances
kp	0.3438	0.5151
ki	0.171	20.5177

2. Un autre élément important utilisé dans la commande est la boucle à verrouillage de phase, appelé **P.L.L.** Nous disons qu'une boucle est dite verrouillée, lorsque la fréquence de sortie est égale à la fréquence d'entrée ( $F_S = F_E$ ). Il s'agit donc d'un asservissement de fréquence, ou plus généralement de phase [39]. L'un des schémas de base de la PLL est représenté sur la figure suivante :

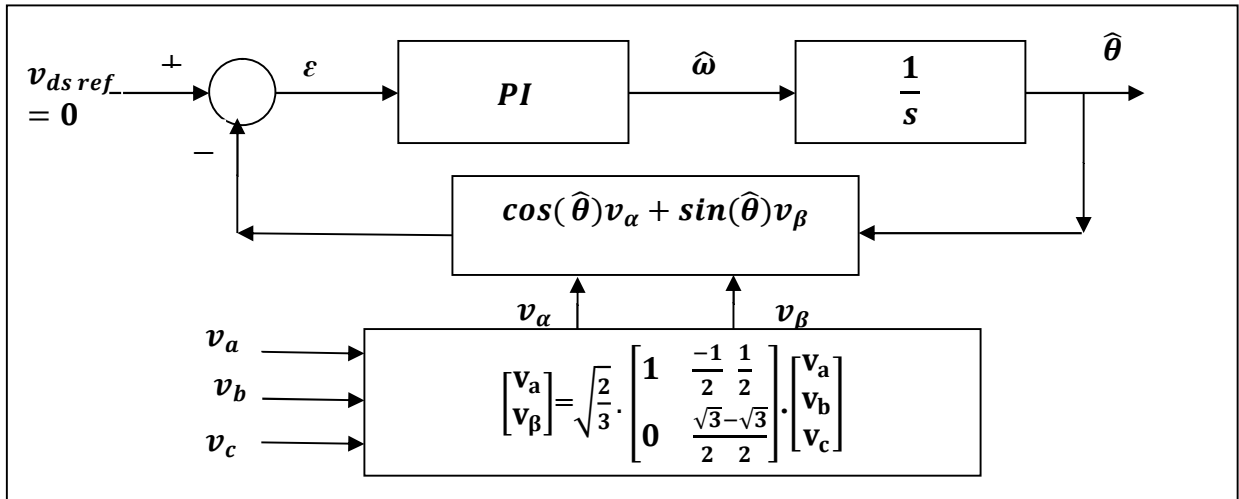


Figure III.4. Schéma de principe d'une P.L.L

Supposons que les trois tensions du réseau électrique sont sinusoïdales :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

En appliquant la transformation de Concordia :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}-\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \cdot v_m \cdot \sin(\omega t) \\ -\sqrt{3} \cdot v_m \cdot \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Sachant que dans le repère (d-q) nous avons :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Ainsi :

$$v_d = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot \sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III.9})$$

En supposant que  $\sin(\theta - \hat{\theta})$  soit petit, on a donc :

$$v_d = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot (\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III.10})$$

En posant la pulsation angulaire  $\hat{\omega}$  égale à :

$$\hat{\omega} = F_s(s) \cdot \sqrt{3} \cdot V_m \cdot (\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{III.11})$$

Avec  $F_s(s)$  la fonction de transfert de correcteur PI donné par l'expression suivante :

$$F_s(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k_p \left( \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right) \quad (\text{III.12})$$

Sachant que la position angulaire a pour expression :

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (\text{III.13})$$

Nous obtenons donc le modèle simplifié de la P.L.L, illustré sur la figure suivante :

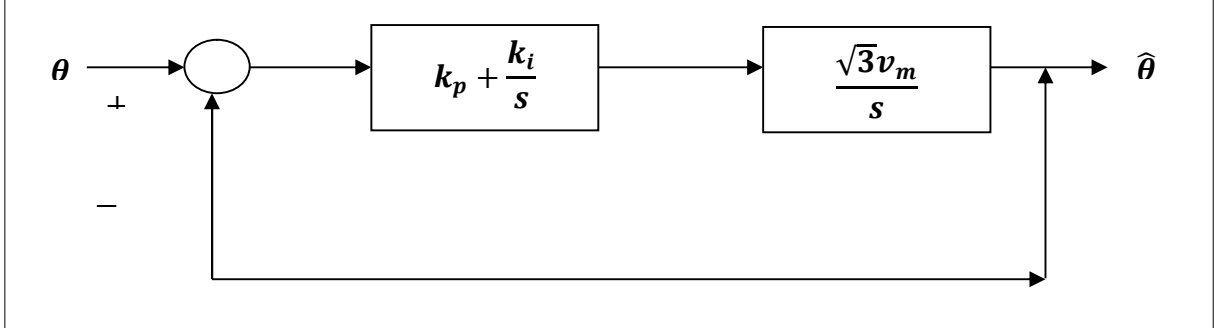


Figure II.5. Schéma simplifié de la PLL classique

Les paramètres du régulateur sont facilement calculables et sont égaux à :

$$k_i = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{3} \cdot V_m} \quad (\text{III.14})$$

$$k_p = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n}{\sqrt{3} \cdot V_m} \text{ et } \tau_i = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \quad (\text{III.15})$$

Afin de valider notre PLL nous avons supposé les trois tensions du réseau électrique sont sinusoïdales :

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin(\omega t) \\ V_{sb} = \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin(\omega t - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ V_{sc} = \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin(\omega t + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Nous avons ainsi les résultats de simulation suivant :

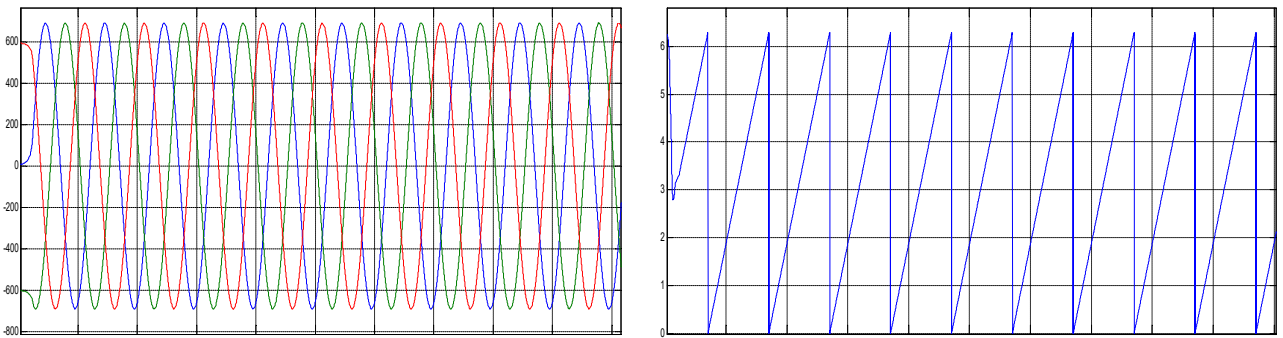
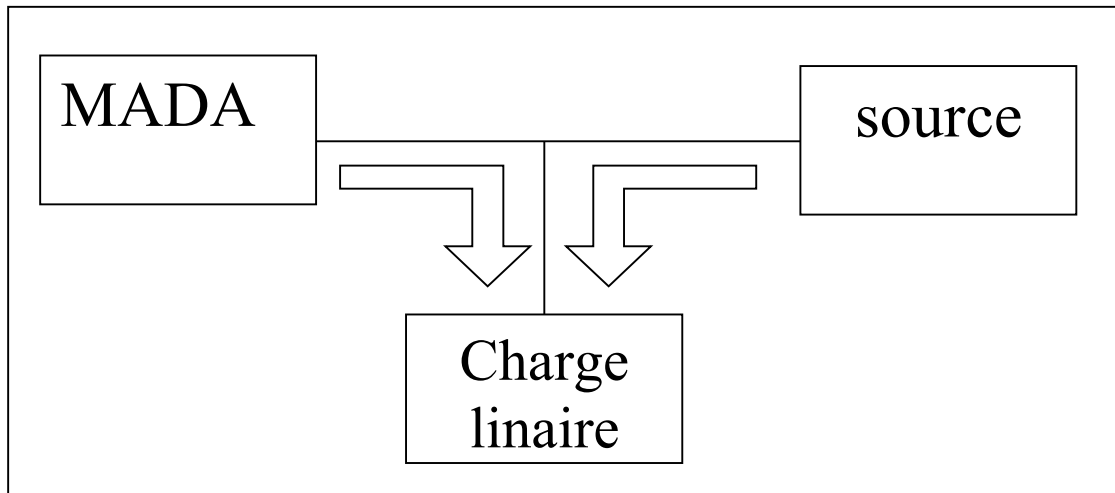


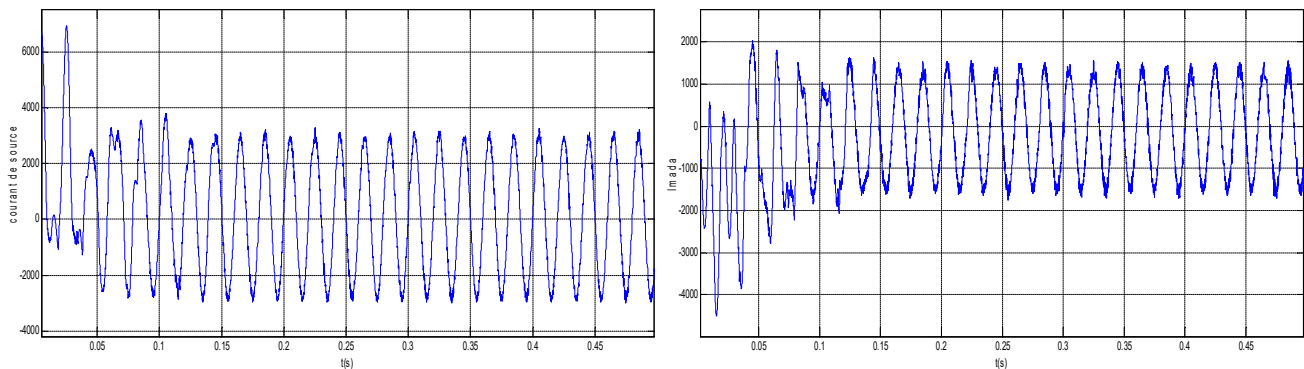
Figure III.6. Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire  $\hat{\theta}$   $\times 10^4$

Maintenant, afin de valider notre commande de la MADA avec les régulateurs que nous avons calculé et la PLL, nous avons simulé le système complet constitué de la MADA qui est connecté à un réseau électrique alimenté par des charges linéaires. Les paramètres du système complet sont présentés dans l'annexe 1. Nous obtenons alors :



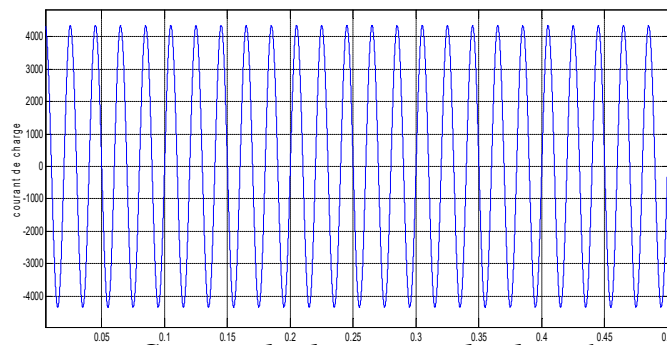
**Figure III.7. Architecture du système avec la charge lineaire**

Les résultats de simulation nous donnent les figures suivantes :



**a- Courant de la MADA pour la phase 1**

**b- Courant de source pour la phase 1**



**c- Courant de charge pour la phase 1**

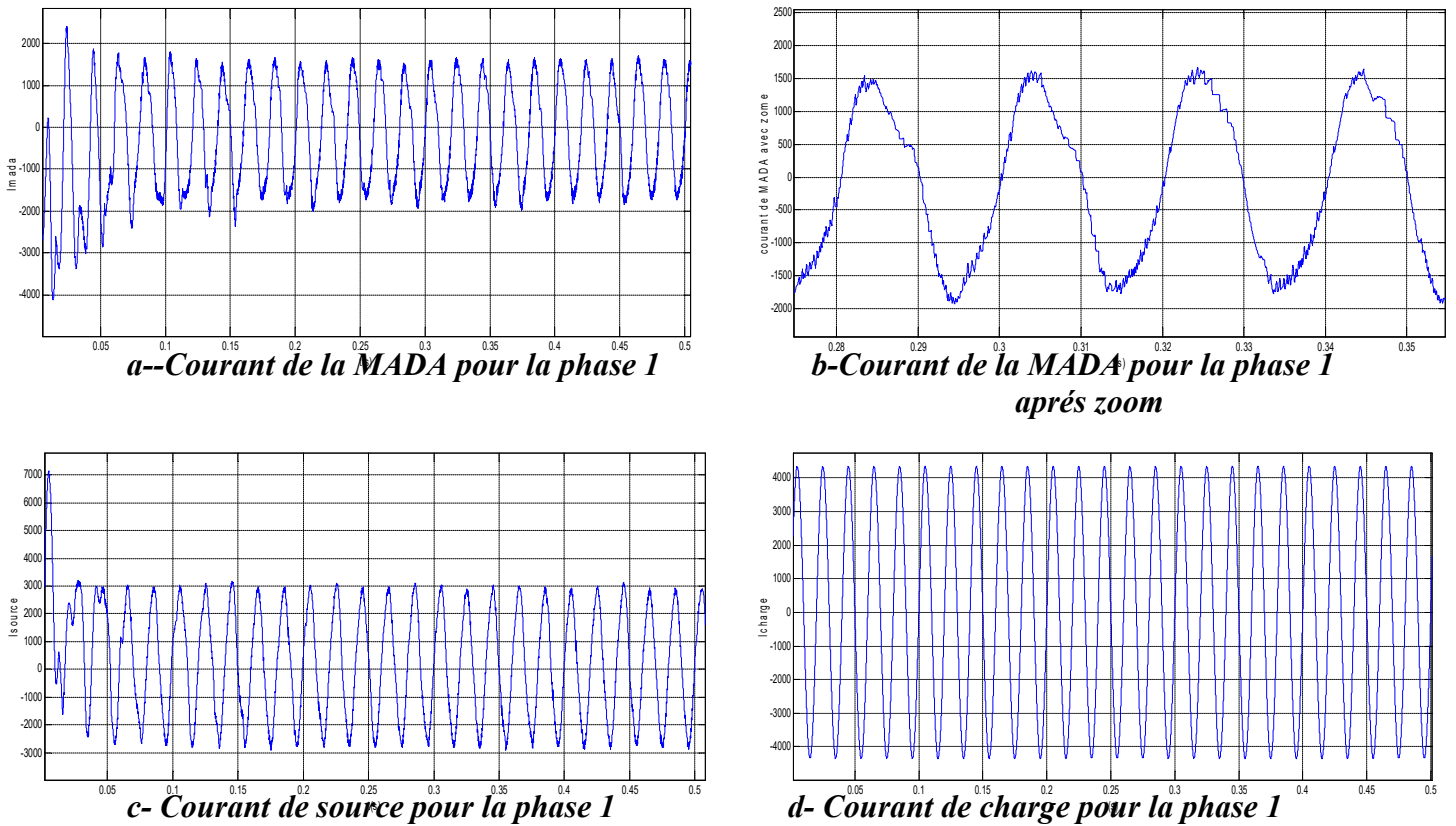
**Figure III.8. Représentations des courants du système complet**

Nous remarquons de ces figures que le système complet fonctionne correctement.

Supposons maintenant que la source est déséquilibrée, donné par l'expression suivante :

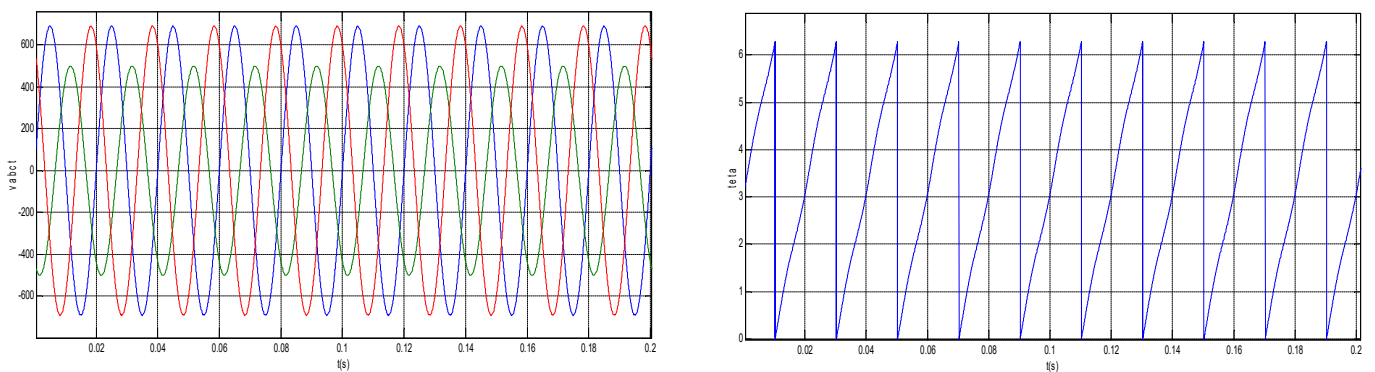
$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2}. 690. \sin(\omega t) \\ V_{sb} = \sqrt{2}. 500. \sin(\omega t - \frac{2.\pi}{3}) \\ V_{sc} = \sqrt{2}. 690. \sin(\omega t + \frac{2.\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.17)$$

En simulant le système complet constitué de la MADA qui est connecté à un réseau électrique alimenté par des charges linéaires, nous obtenons les résultats suivants :



**Figure III.9. Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique est déséquilibrée**

Nous remarquons de ces figures que le courant coté MADA se détériore, car le courant n'est pas complètement sinusoïdal comme le montre la figure III.9b, cela est due à la détérioration du fonctionnement de la PLL. En effet, nous remarquons que le signal de la PLL, voir figure ci-dessous, lors d'un déséquilibre se détériore ce qui engendre une détérioration de la commande de la MADA au complet.

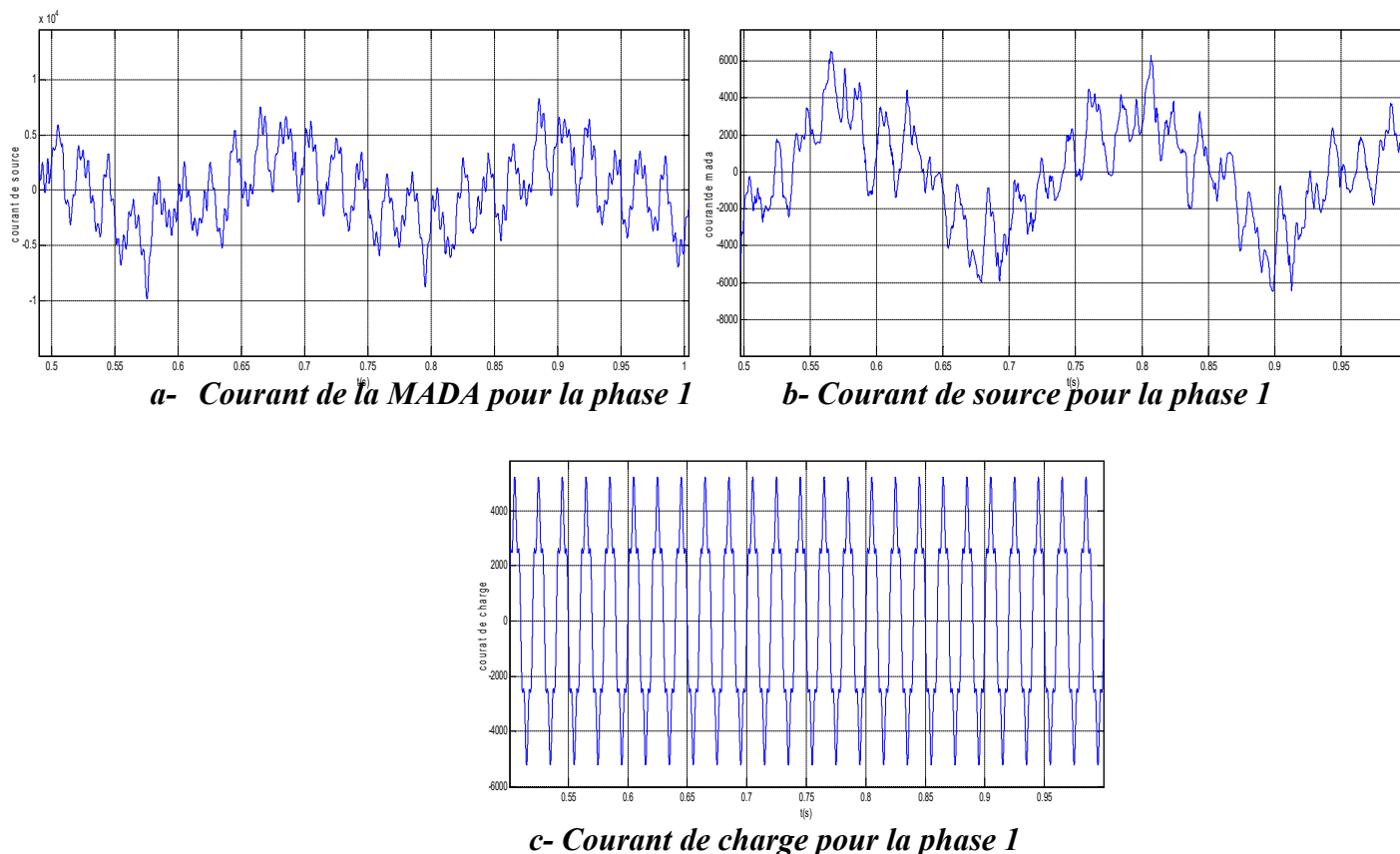


**Figure III.10. Représentations des tensions du réseau électrique et de l'angle  $\theta$**

De plus, supposons maintenant que la source contient des harmoniques, exemple :

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin(\omega t) + \sqrt{2} \cdot \frac{690}{5} \cdot \sin(5\omega t) \\ V_{sb} = \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2} \cdot \frac{690}{5} \cdot \sin(5\omega t - \frac{10\pi}{3}) \\ V_{sc} = \sqrt{2} \cdot 690 \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2} \cdot \frac{690}{5} \cdot \sin(\omega t + \frac{10\pi}{3}) \end{cases} \quad (III.18)$$

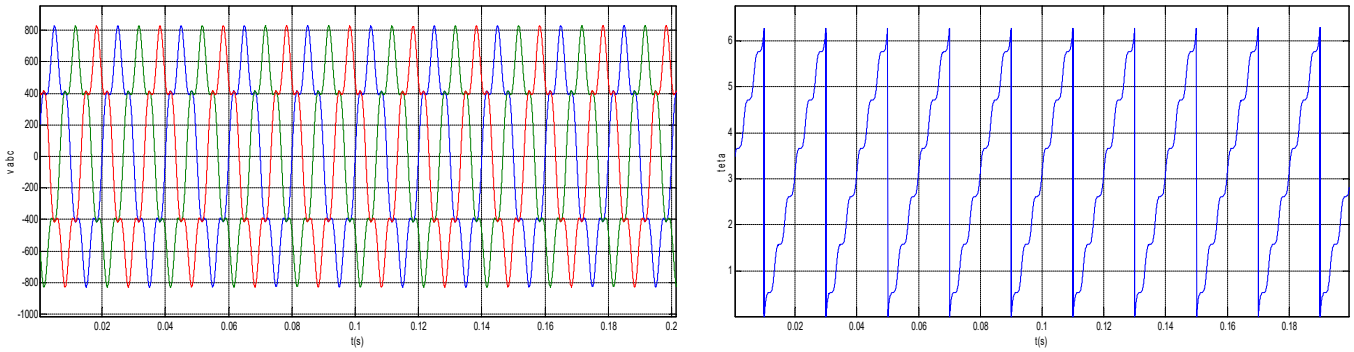
En simulant le système complet constitué de la MADA qui est connecté à un réseau électrique alimenté par des charges linéaires, nous obtenons les résultats suivants :



**Figure III.11. Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique contient des harmoniques**

Nous remarquons de ces figures que le courant coté MADA se détériore également considérablement, cela est due également à la détérioration du fonctionnement de la PLL. En effet, nous remarquons que le signal de la PLL, voir figure ci-dessous, lors de la présence des harmoniques se détériore aussi ce qui engendre une détérioration de la commande de la MADA au complet.





**Figure III.12. Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire  $\theta$**

Ainsi, nous remarquons que la commande de la machine asynchrone double alimentation ne fonctionne pas bien lors de présence de perturbation de tension dans le réseau électrique. Cela est due au mauvais fonctionnement de la PLL car ce dernier n'est pas robuste. Pour la rendre plus robuste nous allons introduire dans la PLL un filtre multivariable qui rejette ces perturbations et permettra à la commande de la MADA de fonctionner même en présence de ces perturbations. Pour résoudre ce problème, nous avons introduit un filtre multivariable a notre PLL. Ce filtre multi-variable est un filtre d'extraction, il a été développé par [40]. Il est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des courants dans le repère  $(\alpha\beta)$ . Ce type de filtre permet l'extraction d'un harmonique de rang particulier. La fonction de transfert de ce filtre est donnée par la relation suivante :

$$\begin{cases} \hat{v}_\alpha(p) = \left(\frac{K}{p} [v_\alpha(p) - \hat{v}_\alpha(p)] - \frac{\omega_c}{p} \cdot \hat{v}_\beta(p)\right) \\ \hat{v}_\beta = \left(\frac{K}{p} [v_\beta(p) - \hat{v}_\beta(p)] - \frac{\omega_c}{p} \cdot \hat{v}_\alpha(p)\right) \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Où K est la constante du filtre

$\omega_c$  La pulsation de coupure du filtre (rad/s)

$\hat{v}_{\alpha\beta}$  et  $v_{\alpha\beta}$  sont respectivement les tensions à la sortie et à l'entrée du filtre dans le repère  $\alpha\beta$ .

Le schéma bloc du filtre multivariable est présenté par la figure suivante :

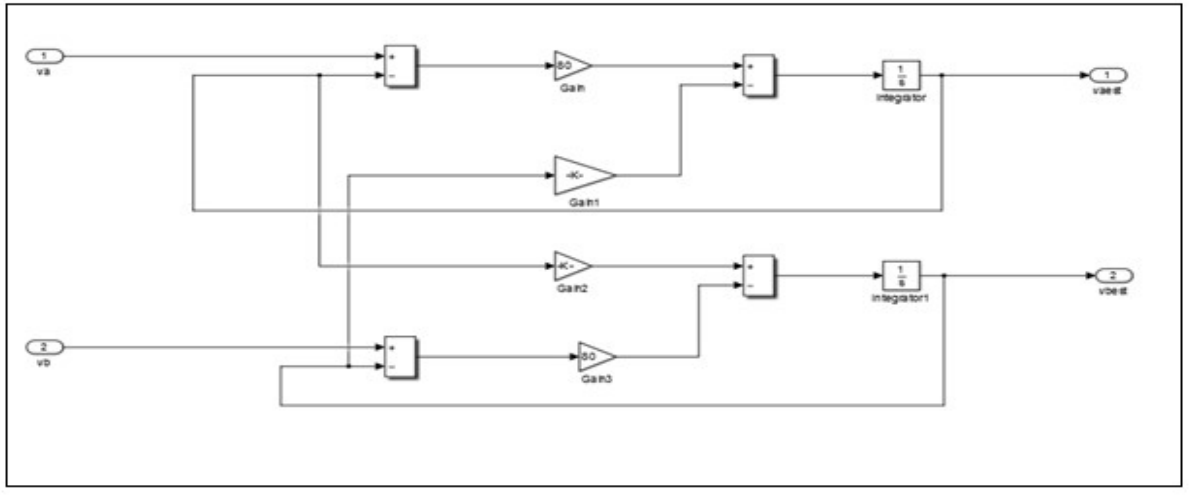


Figure III.13. Schéma du filtre multi-variable

Ainsi la figure suivante représente une P.L.L contenant un filtre multi variable :

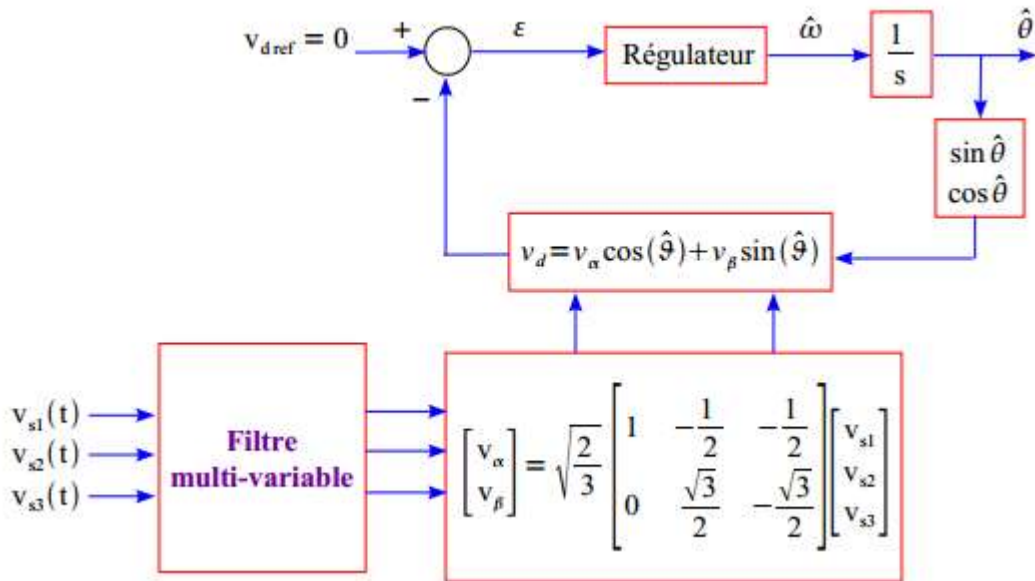
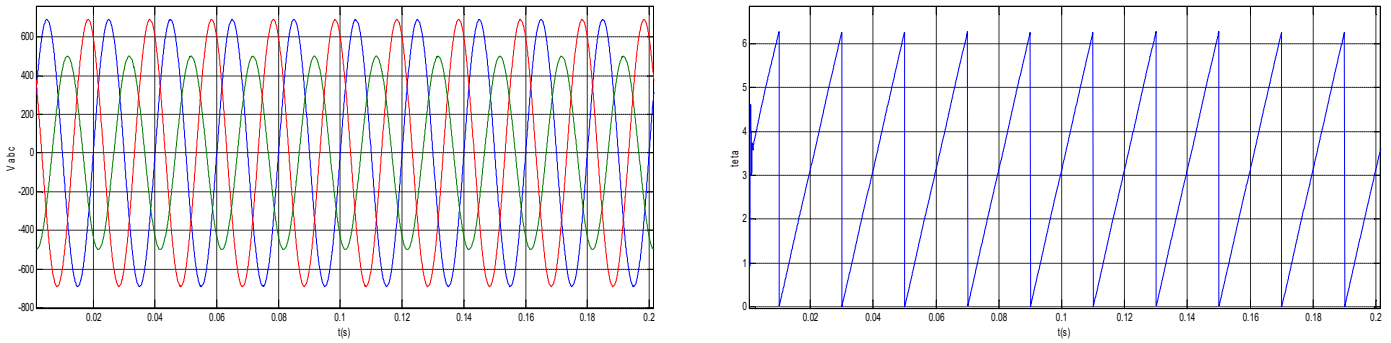


Figure III.14. Schéma de principe de la P.L.L avec un filtre multi-variable FMV

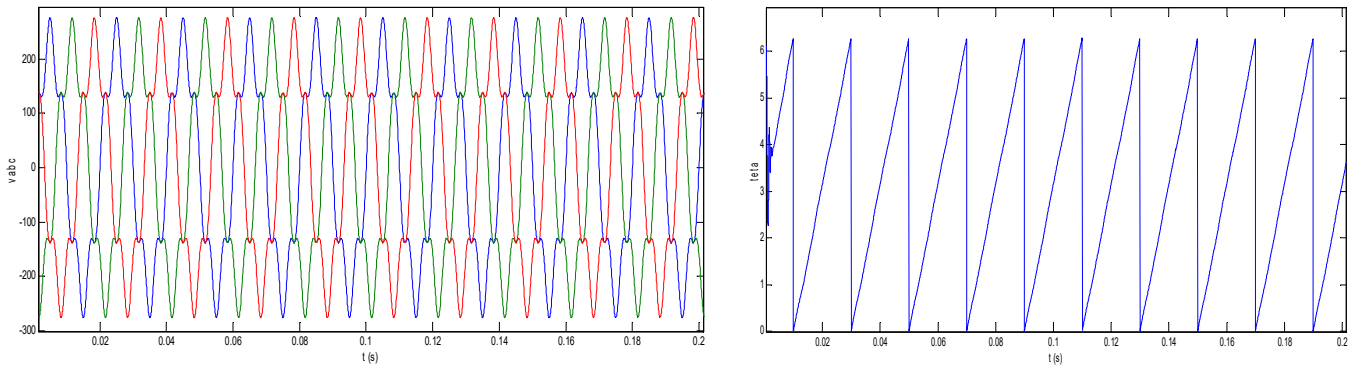
Pour montrer la robustesse de cette PLL, nous allons perturber le réseau électrique, ainsi :

- 1<sup>ère</sup> cas la tension de la source est déséquilibrée et ne contient pas d'harmoniques



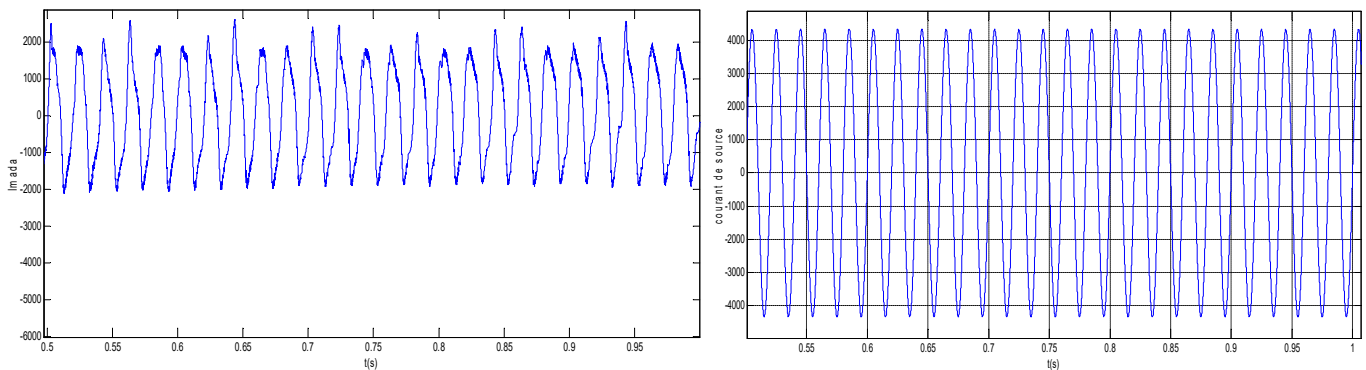
**Figures III.15 Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire  $\theta$**

- 2<sup>ème</sup> cas La tension de la source est équilibrée mais contient des harmoniques



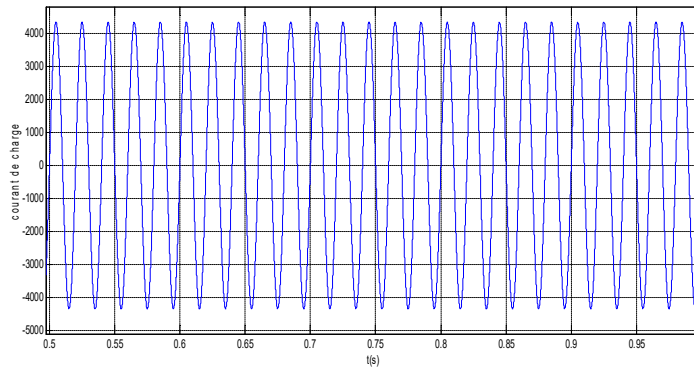
**Figures III.16. Représentations des tensions du réseau électrique et de la position angulaire  $\theta$**

Nous remarquons de ces simulations que malgré la présence d'un déséquilibre de tension ou la présence d'harmonique de tension, la PLL rejeter ces perturbations et donne toujours de bon résultat. Afin de valider notre commande de MADA avec les régulateurs que nous avons calculé et la PLL contenant un filtre multi-variable, nous allons simuler le système complet constitué de la MADA qui est connecté à un réseau électrique alimenté par des charges linéaires, lorsque le réseau électrique à des tensions sinusoidale mais déséquilibré (Voir figure III.17), puis lorsque nous avons des harmoniques de tension (Voir figure III.18), comme le montre les figures suivantes :



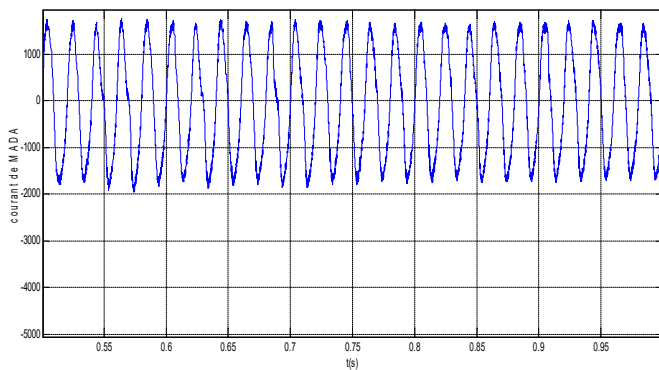
**a- Courant de la MADA pour la phase 1**

**b- Courant de source pour la phase 1**

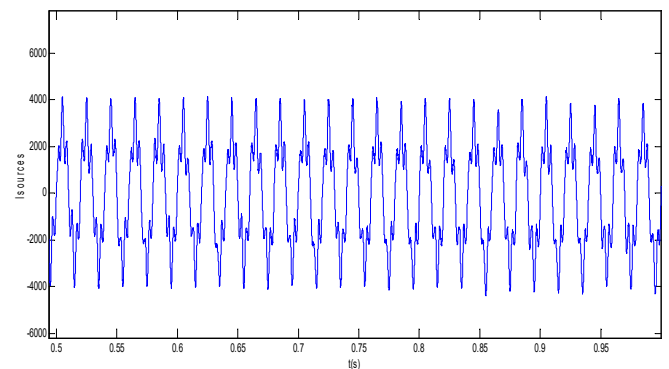


*c- Courant de charge pour la phase 1*

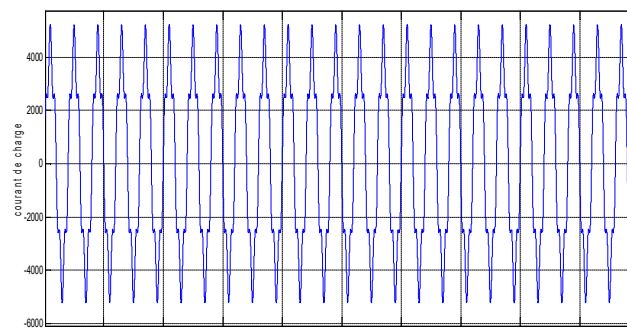
**Figure III.17. Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique est déséquilibrée**



*a- Courant de la MADA pour la phase 1*



*b- Courant de source pour la phase 1*



*c- Courant de charge pour la phase 1*

**Figure III.18. Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique contient des harmoniques**

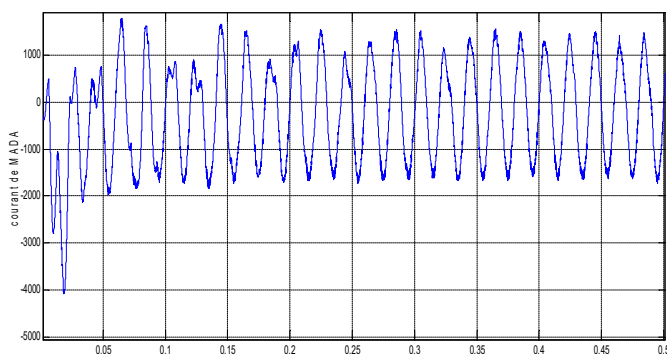
Nous remarquons de ces simulations que la commande de la MADA fonctionne très bien car il n'est pas influencé par les perturbations de la tension générée côté source.

Après avoir montré l'influence des perturbations présentes sur le réseau électrique, sur le bon fonctionnement de la commande, nous allons maintenant montrer l'influence des paramètres de la machine sur le bon fonctionnement de la commande de la MADA incluant une PLL robuste. Ainsi le tableau suivant nous montre les paramètres de la machine que nous avons changé.

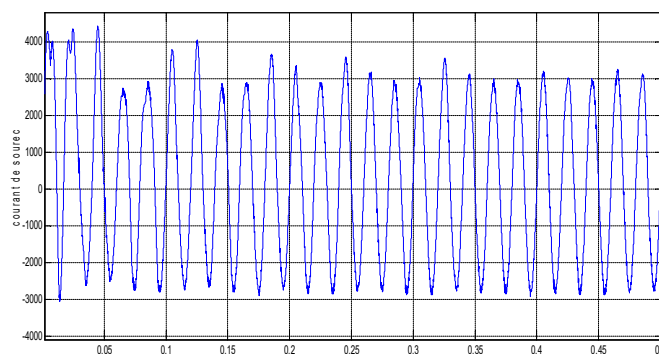
Tableau III.2 Changement de paramètres de la machine

Symboles	Ancienne Valeur	Nouvelle valeur
$r_s$	0.012	0.02
$r_r$	0.021	0.028
M	0.0135	0.014
$l_s$	2.0372e-4	2.587e-4
$l_r$	1.7507e-4	1.589e-4

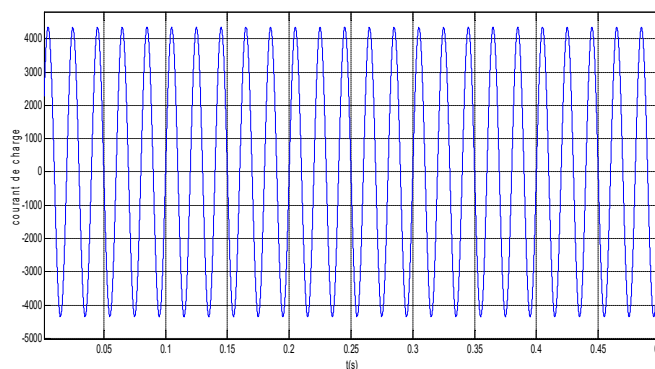
Les résultats de simulations sont donnés par les figures suivantes :



*a- Courant de la MADA pour la phase 1*



*b- Courant de source pour la phase 1*



*c- Courant de charge pour la phase 1*

**Figure III.19. Représentations des courants du système complet lorsque la tension du réseau électrique est équilibrée**

Nous remarquons de ces simulations que malgré il y a eu un changement de paramètre de la machine asynchrone. Les résultats nous donnent un fonctionnement correct de ce dernier.

## Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons d'abord présenté la MADA ayant une topologie back-to-back. Nous avons ensuite présenté les résultats de simulations et montré qu'une commande ne rejetant pas les perturbations du réseau électrique pouvez engendrer un mauvais

fonctionnement de ce dernier. C'est pour cela que nous avons changé un des éléments de la commande afin qu'ils puissent fonctionner même en présence des perturbations.

## Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème de l'étude et la simulation d'une commande pour éolienne à base de MADA lors de présence de perturbation dans le réseau électrique. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice asynchrone branché au réseau électrique et alimentant des charges. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de notre MADA.

Ainsi, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art et les différents types d'éoliennes existant. On a également présenté leurs avantages et leurs inconvénients. Enfin, on a présenté les différents types de machine électrique employé dans l'éolienne.

Dans le second chapitre, on a présenté l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Ensuite, on a présenté le modèle mathématique de la (MADA). Enfin, on a présenté l'étude des différentes commandes existantes.

Dans le troisième chapitre, on a cherché à valider le modèle de la MADA, et cela en affectant une série de simulation. Au début, il avait pour but de valider le modèle de la MADA avec une commande intégrant une PLL classique, et voir si cette commande pouvait fonctionner correctement en présence de perturbation dans le réseau électrique. Cette commande nous a montré qu'il ne fonctionné pas très bien lors de la présence de ces perturbations. C'est pour cela que nous avons introduit dans la commande une PLL plus robuste qui rejeté ces perturbations.

## References

- [01] T. ACKERMANN and L. SO EDER “Wind energy technology and current status: a review” Department of Electric Power Engineering, Electric Power Systems, Royal Institute of Technology, Teknikringen 33, S-10044 Stockholm, Sweden Received 20 April 2000; accepted 25 April 2000.
- [02] R.L.Hills. “Power from wind: a history of windmill technology.” New York: Cambridge University Press, 1994
- [03] W. Tong. Wind “Power generation and wind turbine design.” Southampton. Boston WIT Press, 2010
- [04] CAHIERS D’EOLE novembre 2000 - N° 2 Publication semestrielle consacrée au patrimoine éolien, REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON, en couverture : Dessin d’une publicité Byrrh des années 1950.
- [05] M. Michel FOLLIASSON, « Les éoliennes », Rapport du groupe de travail de l’Académie des Beaux-Arts 2007.
- [06] T. Douadi « Etude et commande d’un système éolien à base d’une génératrice asynchrone », thèse de magistère de l’université de EL Hadj Lkhdar –Batna, option maîtrise d’énergie
- [07] R. BAÏLE « Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent application à la prévision de la ressource éolienne », université de Corse le 18 Octobre 20 10.
- [08] H. CAMBLONG « Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » Thèse de doctorat de l’école nationale supérieure d’arts et métiers, 2003.
- [09] T. PHILIPPE, Th. CLAUDE, « étude d’une éolienne » Projet technologique, Université de Québec. (2007)
- [10] I. ATOUI « contribution au diagnostic de défaut dans une chaîne de production d’énergie », 2009.
- [11] M. SATHYAJITH « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006
- [12] M. LISERRE, R. CÁRDENAS, M. MOLINAS, J. RODRÍGUEZ, “Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks,” IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, April 2011



- [13] S. BENZEGHADI « étude et simulation d'une éolienne (turbine + MADA) à vitesse variable suivant les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone ,thèse de master, université aboubakr Belkaid-Tlemcen,2013.
- [14] M. KASSA IDJDARENE « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonome » thèse de doctorat, 2010.
- [15] A. BOYETTE « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne »,2006.
- [16]T. GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », 2011.
- [17] F. POITIERS « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [18] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chine éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [19] L. MOURAD « Synthèse de lois de commande non-linéaire pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, université Aboubakar Belkaid-Tlemcen, 2016.
- [20] Adema, agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie, produire de l'électricité avec le vent, novembre 2012.
- [21] D.ROYE.S.BACHAABD R.BELHOMME, « Technologie des systèmes éoliennes-intégration dans les réseaux électriques », la Revue3EI, no.39, 2004
- [22] M. SI-BRAHIMI « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne a base de la machine asynchrone » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015
- [23] A. DAVIGNY « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007
- [24] E. MULJADI, K. PIERCE et P. MIGLIORE – « Control strategy for variable speed, stall-regulated wind turbines », American Controls Conference, Philadelphia, PA, Juin 24-26, 1998.

- [25] L. CHANG « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [26] M. MALKI et S. ALI BELARBI « Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret », Thèse de Master, université Aboubakar Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [27] A. MELLOUL « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne » Mémoire de magister, université farhat Abbas Stif, 2011.
- [28] A. BEN AMOR « Commande Direct e des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau » thèse de magistère, 2013.
- [29] F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)», thèse de magistère, ENP, 2007.
- [30]C. NAÏM « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens »thèse de magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010
- [31] I. HAMZAOUI « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » Thèse de Magister, ENP d'Alger, 2008.
- [32] N. AIT RANDANE « Commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne, mémoire de magister, 2012
- [33] B. KELKOUL « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de magister API option automatique. Université de Tlemcen, 2011
- [34] A. GAILLARD « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service ». Thèse de doctorat d'état en génie électrique, université Henry Poincaré, Nancy 1. 2010.)
- [35] M. BENAMSILI « Filtrage actif par l'éolienne » mémoire d'ingénieur Ecole Nationale supérieure Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie juin2009
- [36] J.M RETIF « Commande vectorielle des machines asynchrone et synchrones », institut National des sciences Appliquées de Lyon ,2008
- [37] H. NAOUEL « Amélioration des performances des aérogénérateurs » Magister en électrotechnique de l'université CONSTANTINE1, 2013
- [38] M. ALLAM, D. BOUBAKEUR, M. ABID, Y. DJERIRI et R. ADJOU DJ « Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine

Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne », Journal of Advanced Research in Science and Technologie, ISSN: 2352-9989, Université de Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbès22000, Algérie.

[39] F. PEPIN « Boucle à verrouillage de phase ».

[40] N. HAMOUDA, K.E. HEMSAS « Application d'une nouvelle approche FMV pour la compensation active globale et sélective des harmoniques de courants »Laboratoire d'Automatique de Sétif, LAS, Département d'Electrotechnique, Faculté de sciences de l'Ingénieur Université Ferhat ABBAS de Sétif.

## Annexe

### Paramètres du réseau d'alimentation :

Tension de source :  $V=690$  V.

Fréquence :  $f=50$  Hz.

### Paramètre de la MADA de puissance nominale 1.5Mw

Le tableau suivant résume les paramètres de la machine utilisé pour la simulation :

Tableau A.1: valeur des paramètres de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

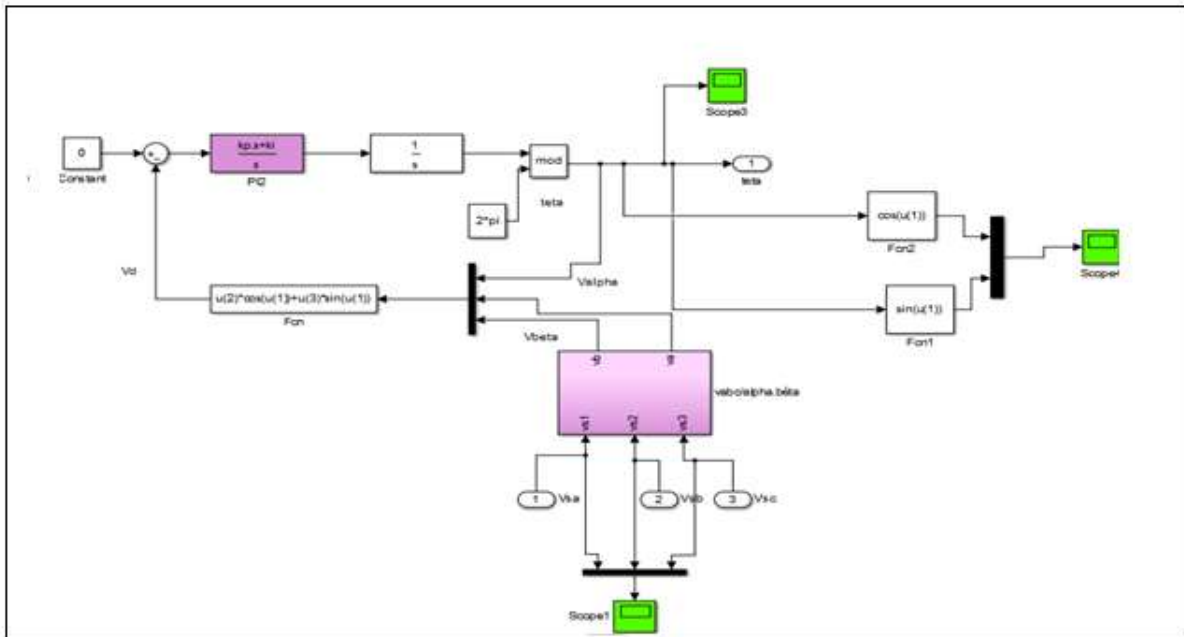
Désignation des paramètres	Symboles	Valeurs
Tension de la MADA	$V_s$	690(V)
Fréquence de la MADA	$f_n$	50(HZ)
Nombre de paires de pôles	$p$	2
Résistance statorique	$r_s$	0.012( $\Omega$ )
Résistance rotorique	$r_r$	0.021( $\Omega$ )
Moment d'inertie de la MADA	$J$	1000 (Kg/m <sup>2</sup> )
Coefficient de frottement de la MADA	$f$	0.0024 (Nm.s/rad)
Inductance mutuelle	$m$	0.0135(H)
Inductance statorique	$l_s$	2.0372e-4(H)
Inductance rotorique	$l_r$	1.7507e-4(H)

### Paramètre de la turbine :

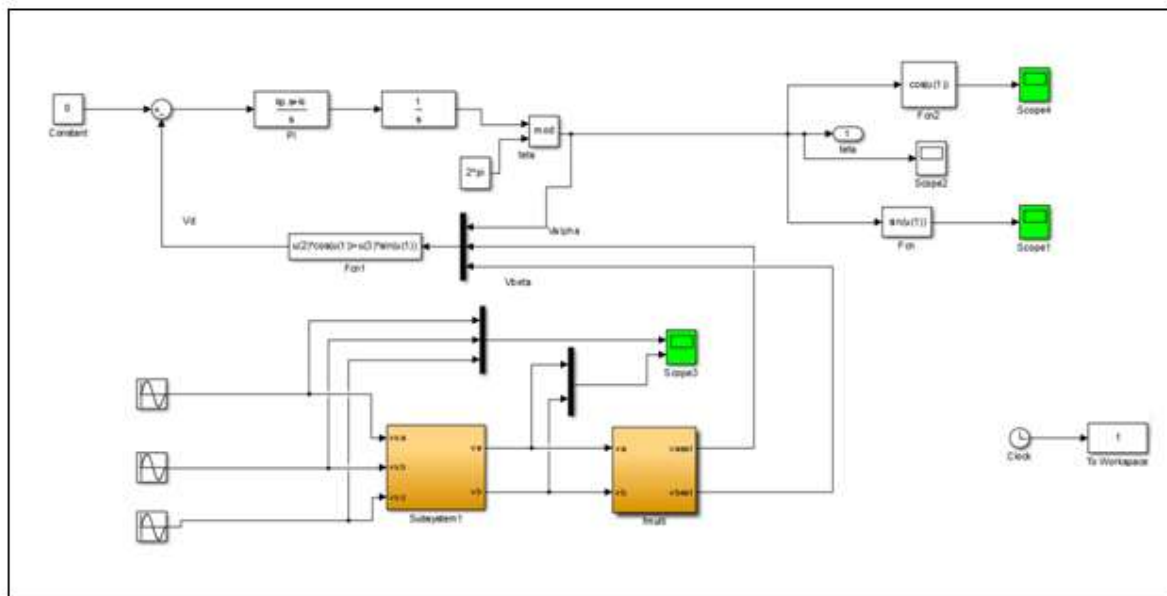
Rayon de la surface balayée par les pales :  $R= 32.25$ m.

Gain du multiplicateur :  $G= 70$ .

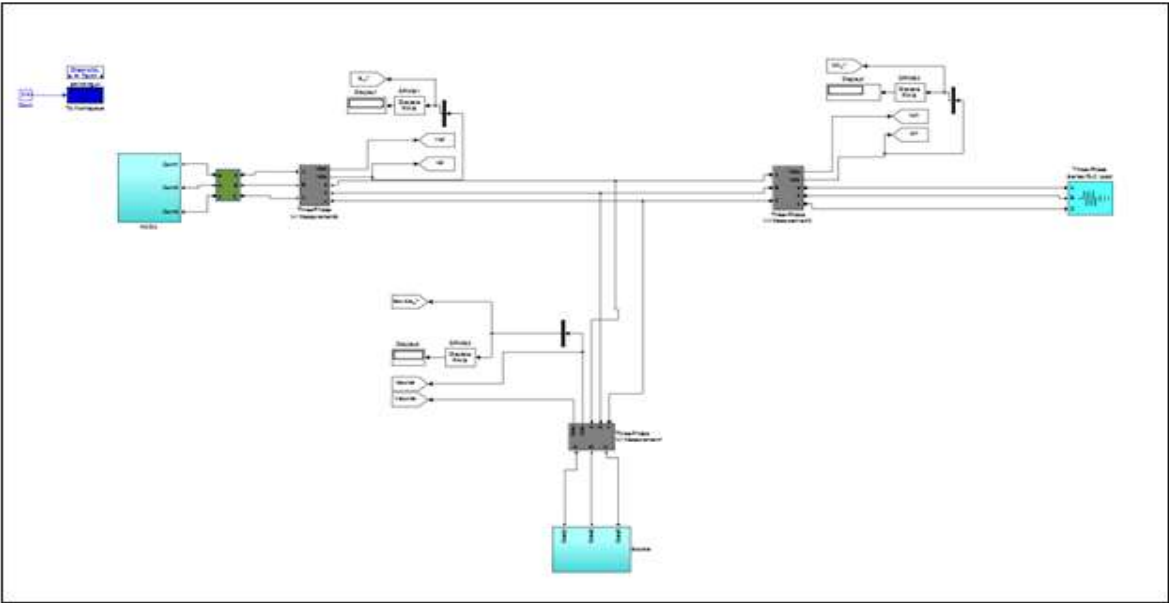
**PLL :**



**PLL multi-variable**



**Systeme complet (MADA- Réseau électrique- charges linéaires)**



## Résumé

Avec l'amélioration des performances des éoliennes, que ce soit au niveau des choix des matériaux ou des types de commandes et puissances fournies, ce qui a permis une expansion de leur utilisation au niveau mondiale. Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution qui utilise une machine asynchrone à double alimentation (MADA) et qui peut être exploitée comme génératrice. Après une présentation de l'état de l'art des éoliennes et de ses différentes génératrices comme la génératrice (MADA), que nous avons étudié tout au long de ce travail, nous nous sommes intéressés à commander les puissances actives et réactives pour obtenir de bonnes performances. Puis, nous avons étudié l'influence des tensions de source lorsqu'elles sont perturbées et son impact sur le bon fonctionnement de la commande de notre MADA. Nous avons terminé notre étude mesurer l'influence de changement de paramètres de la MADA sur le bon fonctionnement de sa commande.

**Mots Clés :** MADA, éolienne, régulateur PI, PLL, FMV.

## ملخص

مع تحسن أداء توربينات الرياح سواء في اختيار نوعية المواد المكونة أو أنواع تقنيات والصلاحيات الموردة، مما سمح لتوسيع استخدامها على المستوى العالمي. في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية لمتغيرة السرعة، هناك حلا للمولد الغير المتزامن مضاعف التغذية (DFIG) والتي تشغل بعد عرض حالة الرياح. درسنا خلال هذه المذكرة، طرق السيطرة الغير المباشرة مع تأثير تغيير خصائص المولد على فعالية تقنية التحكم المستعملة.

الكلمات المفتاحية: آلة كهربائية غير متزامنة بتغذية مضاعفة، MADA، PLL، FMV، توربينات الرياح .

## Abstract

With the improved performance of the wind turbine in terms of the choice of materials or the kind of controls and power supplied, it has allowed to expand their use on the worldwide. In the field of variable-speed electric power generation, there is a solution which uses a double feed induction machine (DFIG) and which can be used as a generator. After a presentation of the state of the art, of the wind and its various generators as the generator (MADA), which we studied throughout this work, we were interested in controlling the active and reactive powers to obtain good performances. Then, we studied the influence of the source voltages when they are disturbed on the good operation of the control of our MADA. We have completed our study on the influence of parameters of our MADA and their impact on the good operation of its control.

**Keywords:** double fed induction generator, PLL, FMV, wind turbine.

