

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

1985

Université Mohamed Boudiaf

M'sila

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Electrique



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Mémoire de Fin d'Etudes

En Vue de l'obtention du Diplôme

MASTER

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION ÉOLIENNE

Présenté par : El-amria Zeghlache

Salwa Lachi

Proposé et dirigé par :

Abdelmadjid CHOUCOU

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH

Le tout puissant, de m'avoir donné

Le courage et la volonté pour

Accomplir ce travail

Nous tenons à remercier notre encadreur

Abdelmadjid CHOUCHEUR D'avoir posé un sujet très
intéressant et Pour ses conseils, sa Disponibilité

et pour nous avoir fait profiter de ses

connaissances Et de ses qualités tant professionnelles
qu'humaines.

Nos remerciements vont également à

toutes les personnes qui Nous ont aidées

à réaliser ce travail

Dédicace

Avant tout, je remercie dieu le tout puissant
De m'avoir donné le courage et la patience
Pour réaliser ce travail malgré toutes les
Difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

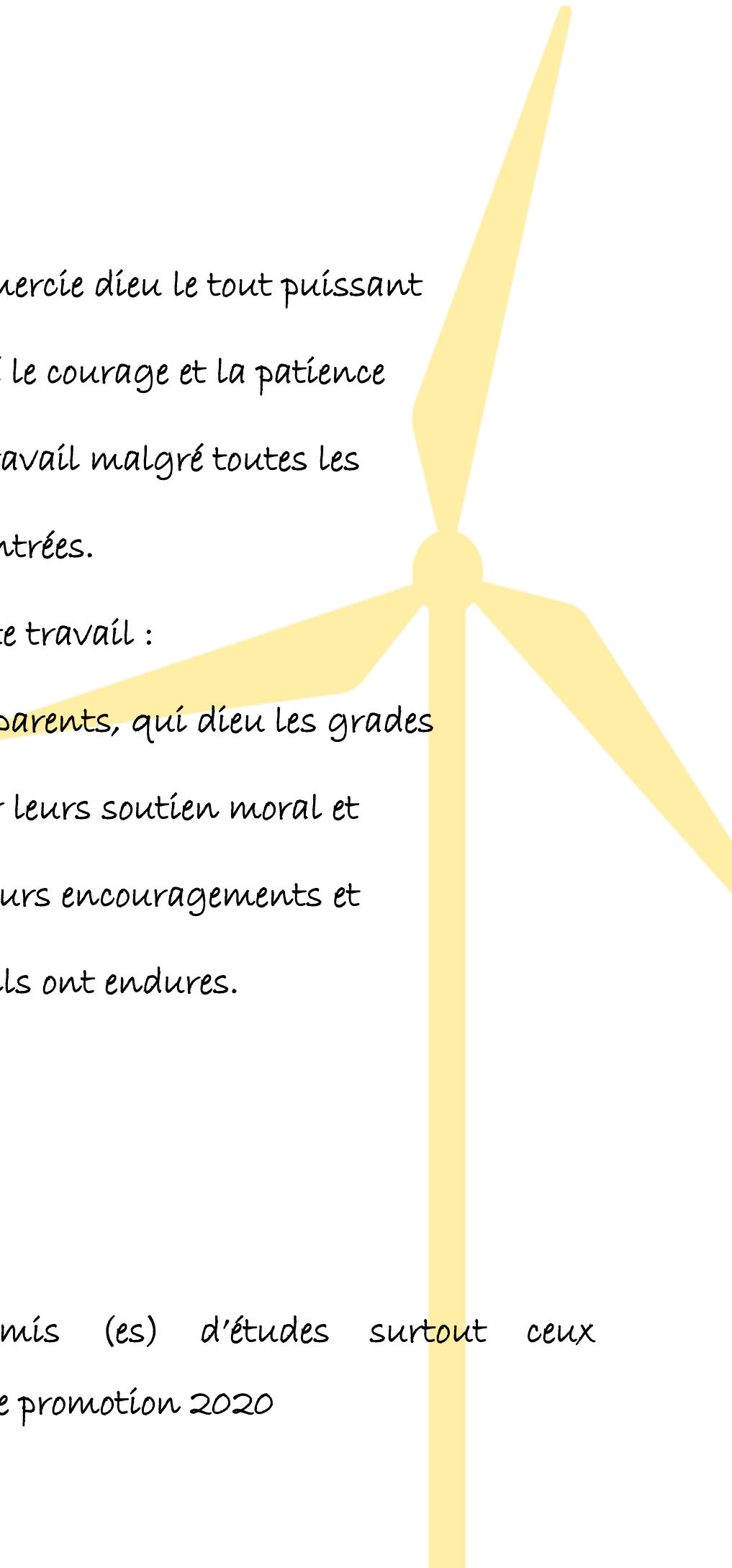
A mes très chers parents, qui dieu les guides
et les protège pour leurs soutien moral et
financier, pour leurs encouragements et
les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères

A ma sœur

Aux chers amis

A tous les amis (es) d'études surtout ceux
d'électrotechnique promotion 2020



A.zeghlache

Dédicace

Avant tout, je remercie dieu le tout puissant

De m'avoir donné le courage et la patience

Pour réaliser ce travail malgré toutes les

Difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, qui dieu les guides

et les protège pour leurs soutien moral et

financier, pour leurs encouragements et

les sacrifices qu'ils ont endurés.

A ma sœur

Aux chers amis

A tous les amis (es) d'études surtout ceux
d'électrotechnique promotion 2020.

S.Lachi



SOMMAIRE

Les abréviations utilisées

Liste des figures et des tableaux

Les symboles utilisés

Introduction General

Chapitre I : Etat de l'art de la production d'énergie éolienne

I.1 Introduction

I.2 Historique

I.3 Quelques notions sur le vent

I.4 Définition de l'énergie éolienne

I.5 L'évolution de son exploitation dans le monde

I.6 Principaux composants d'une éolienne

I.7 Principe de fonctionnement d'une éolienne

I.8 Classification des éoliennes

I.8.1 Selon l'axe

I.8.1.1 Éoliennes à axe horizontal

I.8.1.2. Éolienne à axe verticale

I.8.2 Selon la vitesse

I.8.2.1. Les éoliennes à vitesse fixe

I.8.2.2 Les éoliennes à vitesse variable

I.8.3. Selon l'utilisation

I.8.3.1. Éolienne raccordée au réseau

I.8.3.2 Éolienne autonome

I.9 Machines électriques dans les aérogénérateurs

I.9.1 Générateur synchrone

I.9.1.1 générateur synchrone à rotor bobine

I.9.1.2 Génératrice synchrone à aimants permanents

I.9.2 Générateur asynchrone

I.9.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

I.9.2.2 Génératrice asynchrone à double alimentation

I.10 Les différentes installations des éoliennes

I.10.1 L'éolienne offshore

I.10.2 L'éolienne Onshore

I.11 Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne

I.11.1 Inconvénients

I.11.2 Avantages

I.12 conclusion

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

II.1 Introduction

II.2 Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

II.3 La double alimentation

II.4 Principe de fonctionnement de la MADA

II.5 Description du fonctionnement de la MADA

II.5.1 Structure de la machine.

II.5.2 Modes de fonctionnement de la MADA

II.5.2.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

II.5.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

II.5.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone

II.5.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone

II.6 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

II.6.1.1 Hypothèses simplificatrices

II.6.1.2 Modèle de la MADA

II.6.1.2.1 Equations électriques de la MADA

II.6.1.2.2 Equations mécaniques de la MADA

II.6.1.2.3 Application de la transformation de Park à la MADA

II.6.3 Choix du référentiel

II.6.3.1 Référentiel lié au stator

II.6.3.2 Référentiel lié au rotor

II.6.3.3 Référentiel lié au champ tournant

II.7 Application de la MADA

II.8 Avantages et inconvénients de la MADA

II.8.1 Avantages de la MADA

II.8.2 Inconvénients de la MADA

II.9 Conclusion

Chapitre III : Commande vectoriel de la MADA

III.1 Introduction

III.2 Principe de la commande vectorielle

III.3 Modèle de la MADA à flux statorique orienté suivant l'axe d

III.3.1 Les équations le couple électromagnétique et les puissances statoriques

III.4 Commande indirecte des puissances active et réactive de la MADA

III.4.1 Commande en boucle ouverte

III.4.2 Commande en boucle fermée

III.5 Résultats de simulation

III.6 Conclusion

Chapitre IV : Commande par la logique floue

IV.1 Introduction

IV.2 Principe de la logique floue

IV.3 Notions fondamentales de la logique floue

IV.3.1 Ensembles flous

IV.3.2 Caractéristiques d'un sous ensemble flou

IV.3.3 Fonctions d'appartenances

IV.3.3.1 Différentes formes de fonction d'appartenance

IV.3.3.2 Formulation mathématique des fonctions d'appartenance 3.3.3

IV.3.4 Variables linguistiques

IV.3.5 Opérateurs de la logique floue

IV.3.6 Raisonnement floue

IV.3.6.1 Implication floue

IV.3.6.2 Modus ponens généralisé

IV.4 Structure d'une commande à logique floue

IV.4.1 Fuzzification

IV.4.2 Règles de contrôle

IV.4.3 Inférence des règles floues

IV.4.4 Défuzzification

IV.5 Application de la commande par la logique floue a la MADA

IV.5.1 Comportement du système

IV.5.2 Structure de base d'un contrôleur flou de courant

IV.6 Résultats de simulation

IV.7 Conclusion

Conclusion Générale

Bibliographie

ANNEXE

Les abréviations utilisées :

CC : courant continu

CA : courant alternatif

MS : Machine Synchrone

MSAP : Machine Synchrone à Aiment Permanent

GSAP : Générateur Synchrone à Aimant Permanent.

MAS : Machine Asynchrone

MADA : Machines Asynchrones à Double Alimentation

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation

MLI : Modulation de largeur d'impulsions

f.m.m : Force magnétomotrice

DFIM : Doubly Fed Induction Machine

SCE: Système de Conversion Eolien

Liste des figures et des tableaux

Chapitre I :

Figure I.1 : Ancêtres des moulins à vent (Deutsche Museum)

Figure I.2 : types d'anémomètres

Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Figure I.4 : Le retard de croissance de cette décennie entraîne des pénuries d'énergie éolienne d'ici 2030

Figure I.5 : Constitution d'une nacelle

Figure I.6 : Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne

Figure I.7 : Les éoliennes à axe horizontal

Figure I.8 : Éolienne en amont et en aval

Figure I.9 : Eoliennes à axe vertical

Figure I.10 : Eoliennes de type Darrieus

Figure I.11 : Eoliennes de type Savonius

Figure I.12 : Eolienne à vitesse fixe

Figure I.13 : éoliennes a vitesse variable

Figure I.14 : Machine synchrone connectée directement au réseau

Figure I.15 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

Figure I.16 : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et convertisseur MLI

Figure I.17 : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et redresseur à diodes

Figure I.18 : systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimants permanents

Figure I.19 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP

Figure I.20 : Caractéristique couple - vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles

Figure I.21 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Figure I.22 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance

Figure I.23 : Génératrice asynchrone à double alimentation

Figure I.24 : Parc éolien offshore

Figure I.25 : Parc éolien onshore

Chapitre II :

Figure II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Figure II.2 : Cascade hyposynchrone

Figure II.3 : Fonctionnement moteur hypo-synchrone

Figure II.4 : Fonctionnement moteur hyper-synchrone

Figure II.5 : Fonctionnement générateur hypo-synchrone

Figure II.6 : Fonctionnement générateur hyper-synchrone

Figure II.7 : Représentation schématique de la MADA

Figure II.8 : MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Figure II.9 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation

Chapitre III :

Figure III. 1 : Principe de la commande vectoriel.

Figure III. 2 : Synoptique du modèle simplifié de la MADA.

Figure III.3 Puissance active statorique

Figure III.4 Puissance réactive statorique

Chapitre IV:

Figure IV.1 : Classification des ensembles flous

Figure IV.2 : Caractéristiques d'un ensemble flou.

Figure IV.3 : Exemples des fonctions d'appartenances monotones décroissantes

Figure IV.4 : Exemples des fonctions d'appartenances monotones croissantes.

Figure IV.5 : Exemples des fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et gaussienne).

Figure IV.6 : Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale

Figure IV.7 : Fonctions d'appartenances de $T(\text{erreur}) = \{NG, NP, EZ, PP, PG\}$.

Figure IV.8 : Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

Figure IV.9 : Schéma bloc de la structure de commande flou.

Figure IV.10 : Réponse typique d'un système à un échelon de puissance.

Figure IV.11 : Schéma bloc de la structure du contrôleur du type PI-flou.

Figure IV.12 : Les fonctions d'appartenances utilisées par le contrôle

Figure IV.13 Puissance active statorique (flou type 1)

Figure IV.14 Puissance Réactive statorique (flou type 1)

Tableau IV.1 : Méthode usuelles de l'inférence floue.

Tableau IV.2 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances.

Les symboles utilisés

ω_s : Pulsation des courants statoriques (rad/sec).

ω_r : Pulsation des courants rotoriques (rad/sec).

ω_g : Pulsation de glissement (rad/sec).

g : Coefficient de glissement.

f_s, f_r : Fréquence statorique et rotorique (Hz).

G : Gain de vitesse.

$P_{turbine}$: Puissance du turbine.

P_{vent} : Puissance du vent.

M_v : Masse volumique du vent.

V_{vent} : Vitesse du vent.

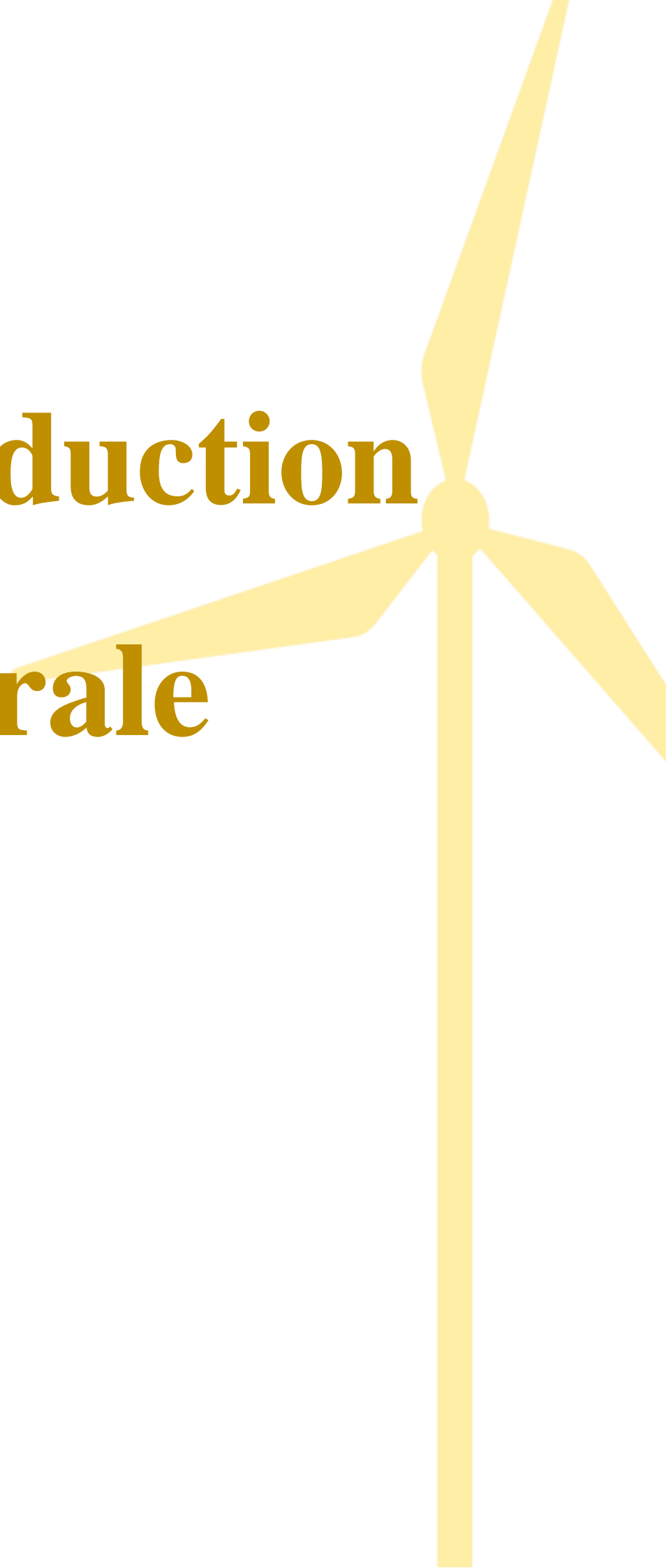
C_{em} : Coefficient de puissance.

θ : Angle de calage.

λ : vitesse spécifique

Introduction

Générale



La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est très populaire puisqu'elle bénéficie de certains avantages par rapport à tous les autres types à vitesse variable, son utilisation dans la chaîne de conversion électromécanique en tant que aérogénérateur ou moteur a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années. En effet, le convertisseur d'énergie utilisé afin de redresser-onduler les courants alternatifs du rotor a une puissance nominale fractionnaire de celle du générateur, ce qui réduit son cout par rapport aux topologies concurrentes [83].

Les techniques de l'intelligence artificielle sont connues actuellement pour leur grande potentialité de pouvoir résoudre les problèmes liés aux processus industriels, notamment le contrôle, l'estimation et l'identification des paramètres des systèmes variant. Parmi ces techniques, on trouve la logique floue qui s'applique de plus en plus dans le contrôle de la machine à induction et l'adaptation de sa commande vectorielle. Le but de l'Intelligence Artificielle est de concevoir des systèmes capables de reproduire le comportement de l'humain dans ses activités de raisonnement. La logique floue classique appelée aujourd'hui logique floue type-1 a été généralisée vers une nouvelle logique floue appelée logique floue type-2. Ces dernières années, Mendel et ses collègues ont beaucoup travaillé sur cette nouvelle logique, ils ont bâtis son fondement théorique, et ils ont démontré son efficacité et sa supériorité par rapport à la logique floue type-1 [84].

Dans ce contexte que le présent travail de recherche traite la conversion de l'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone double alimentée (MADA) où plusieurs commandes avancée appelés commande vectorielle et commande par logique floue.

L'objectif principal de ce mémoire est de présenter une étude théorique et pratique d'un système de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, par l'utilisation de deux types de commandes déférentes (commande vectorielle et commande par logique floue).

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente l'état de l'art de l'énergie éolienne (son historique, l'évolution de son exploitation dans le monde en quelques chiffres ainsi que ses avantages et ses inconvénients).

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des machines asynchrones à double alimentation, leurs applications et de son alimentation.

Alors que le troisième chapitre, sera consacré à l'aspect théorique des commandes proposées pour contrôler les puissances active et réactive générées par notre système de conversion d'énergie éolienne à savoir : commande vectorielle appliquée sur la machine asynchrone a doublé alimentation.

Le dernier chapitre, sera consacré à l'aspect théorique de la commande par la logique floue et puis son application à la machine asynchrone a doublé alimentation.

A stylized yellow wind turbine with three blades and a central hub, positioned on the right side of the page. The blades are spread out, and the tower is a vertical line extending from the bottom.

Chapitre I :

Etat de l'art de la Production d'énergie éolienne

I.1.Introduction

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux.

Les énergies non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limites peuvent être épuisés et en plus de ça sont responsables de l'effet de serre à l'origine du réchauffement climatique qui menace notre planète et les générations futures.

Une énergie renouvelable est une énergie qui se renouvelle pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [1].

Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'accroissement de la demande de plus en plus galopante.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des rappels sur les systèmes éoliens, les principaux composants et le principe de fonctionnement d'une éolienne, suivi d'un rappel des différents types des éoliennes, ainsi que les différentes machines utilisées.

I.2. Historique

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre du grain (Figure I.1). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « Poul La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes [2].

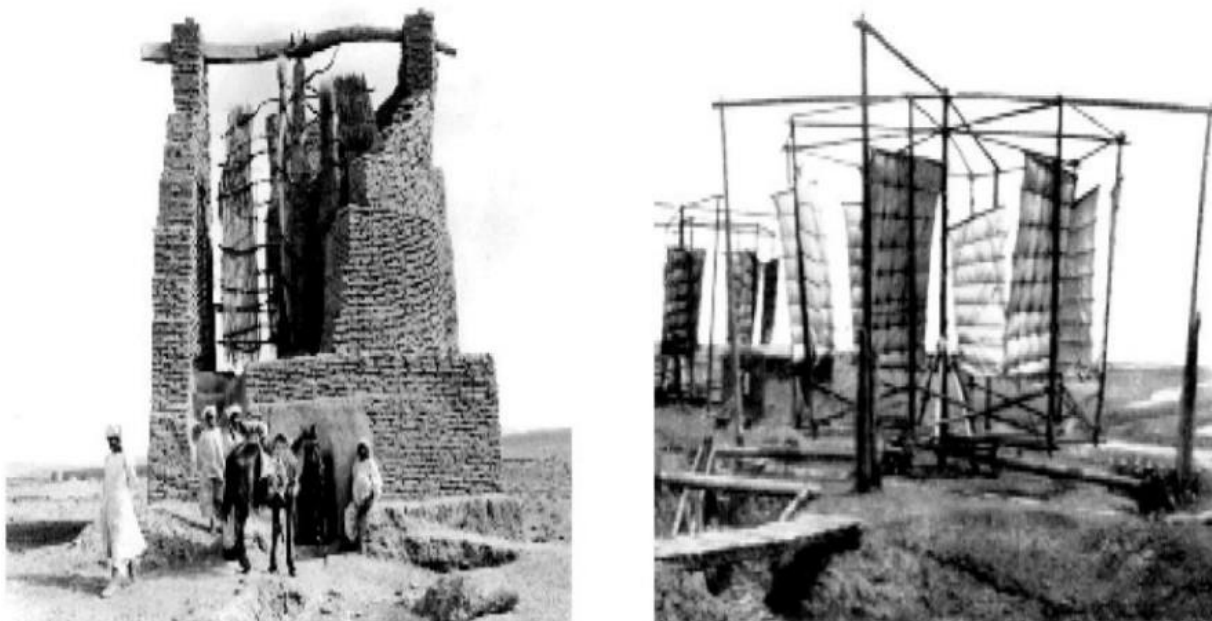


Figure I.1 : Ancêtres des moulins à vent (Deutsche Museum)

I.3. Quelques notions sur le vent

Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones d'air chaud et d'autre d'air froid qui possèdent également des différences de pressions atmosphérique. Ces différences de pressions engendrent des mouvements d'air nommes vent. Le vent constitué une source d'énergie qui est continuellement renouvelée par des phénomènes naturels. On mesure la vitesse du vent au moyen d'un instrument appelé anémomètre (figure. I.2) qui tourne d'autant plus vite que le vent souffle fort.



Anémomètre à trois
coupelles en forme de
demi-sphère

Anémomètre à quatre
coupelles en forme de
demi-sphère

Anémomètre installé au
sommet d'un mât de 10
mètres.

Figure I.2 : types d'anémomètres

Le vent est caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps :

- la direction.

- La vitesse.

I.4. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

Un aérogénérateur, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure. I.3)

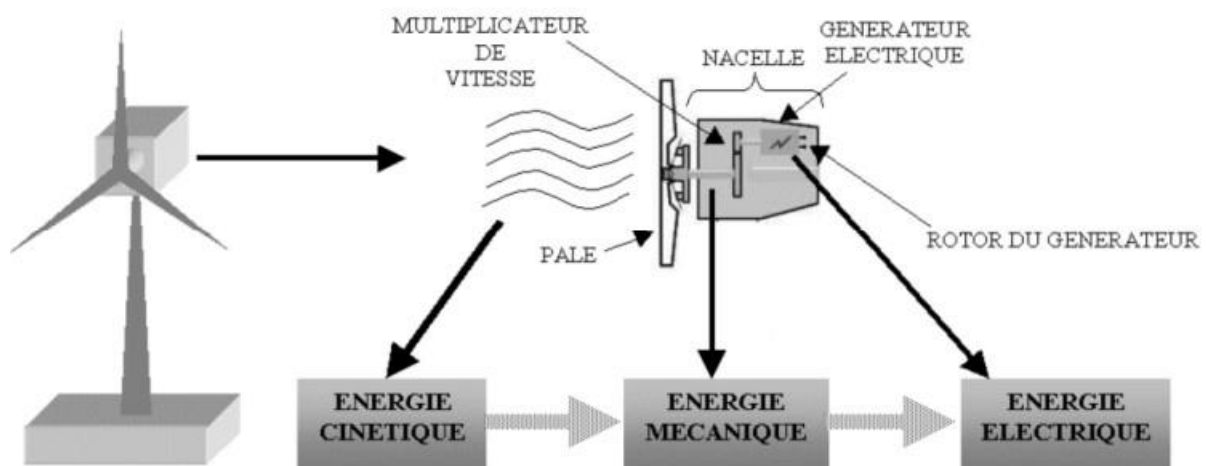


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [28].

I.5.L'évolution de son exploitation dans le monde :

Feuille de route de l'AIE à zéro émission nette d'ici 2050 (2021). La nouvelle capacité éolienne projetée de 2026 à 2030 suppose un TCAC d'environ 6,6 à 7,0 %, selon les prévisions du GWEC [38].

TCAC de 2021 à 2026. Il représente également environ 34 GW de capacité mondiale déclassée de 2026 à 2030 sur la base de la durée de vie de la turbine de 25 ans.

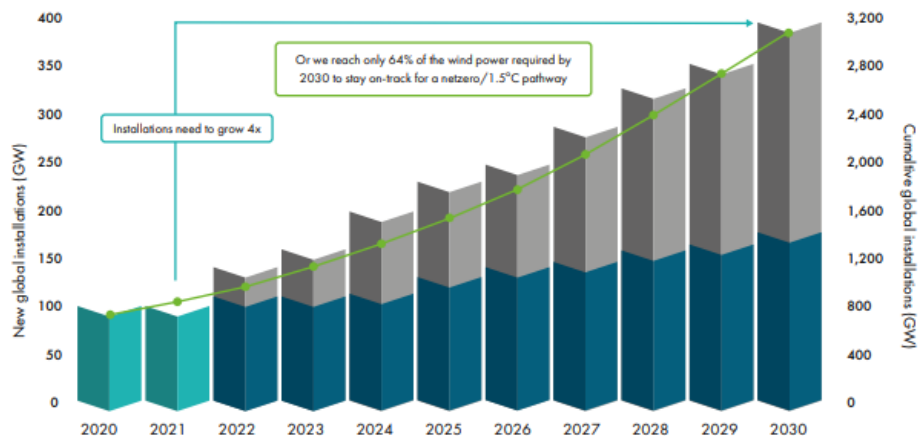


Figure I.4 : Le retard de croissance de cette décennie entraîne des pénuries d'énergie éolienne d'ici 2030 [38]

Nouvelle capacité éolienne projetée en fonction des taux de croissance actuels. L'écart annuel de capacité pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 Scénarios. La capacité éolienne cumulée atteindra zéro d'ici 2050.

Les chiffres de l'écart de capacité sont basés sur des estimations sur le jalon de la feuille de route de l'AIE pour 2030. Les installations mondiales cumulées pour l'énergie éolienne sont à peu près conformes aux Perspectives mondiales des transitions énergétiques de l'IRENA : trajectoire de 1,5 °C (2021).

Ces données représentent la nouvelle capacité, la capacité cumulée et la capacité déclassée, et n'incluent pas une estimation des installations de remotorisation pour remplacer les ~34 GW en turbines déclassées à l'échelle mondiale.

I.6. Principaux composants d'une éolienne :

Le mât : généralement en métal, qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne, le mât est plus au moins haut (dépend de la machine et de la vitesse du vent). Il peut faire en générale de 10 à 100m de hauteur.

La nacelle : est montée au sommet du mât, et abritant les composants mécanique et pneumatique et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine, le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électrique descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

La nacelle, comporte aussi le multiplicateur de vitesse sert à élever la vitesse de rotation de l'arbre qui entraîne la génératrice électrique. Cet arbre comporte généralement un frein

mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

Les principaux éléments de la nacelle sont illustrés dans la figure(I.5).

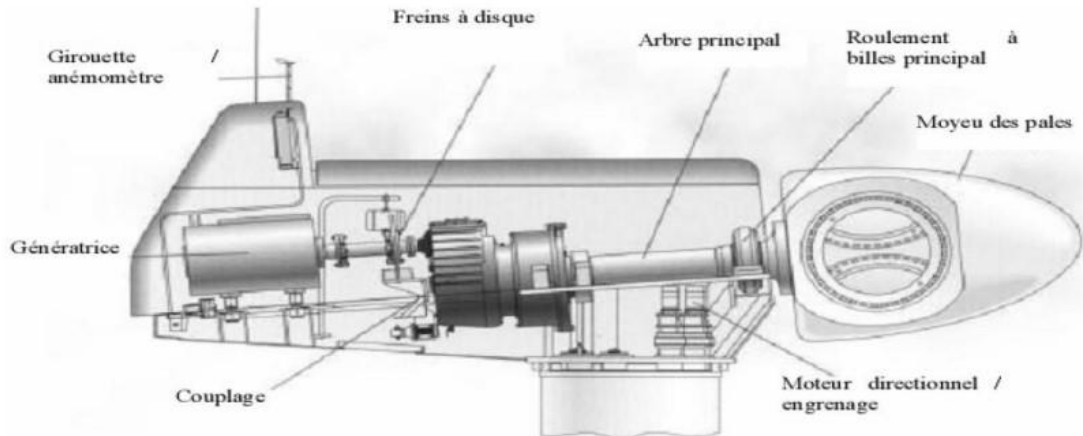


Figure I.5 : Constitution d'une nacelle

Le moyeu : il permet la fixation des pâles .l'ensemble est relié de l'éolienne.

I.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne

L'énergie cinétique du vent est captée par des pâles afin de la transformer en énergie mécanique. La transformation de cette dernière en énergie électrique est assurée par un générateur électrique(Figure.I.5) de type synchrone ou asynchrone

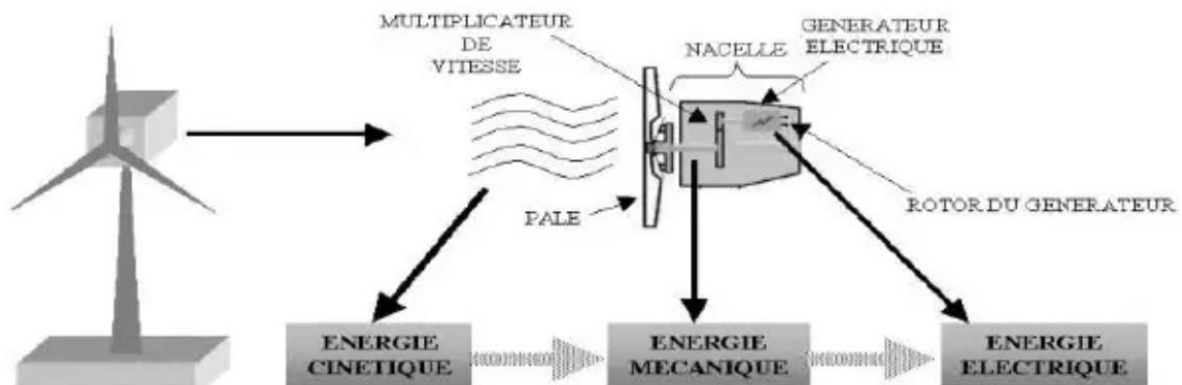


Figure I.6 : Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne [28]

I.8. Classification des éoliennes

Les génératrices éoliennes peuvent être regroupées selon différentes catégories, et un classement est proposé comme suit :

1. La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, machine asynchrone, machine à courant continu) [4].
2. Le type de capteur.
3. Le mode de régulation (pitch ou stal régulation).
4. La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
5. Le mode de fonctionnement (vitesse constante ou variable)

I.8.1 Selon l'axe

Généralement, on classe les éoliennes suivant l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi deux grandes familles :

I.8.1.1 Eoliennes à axe horizontal

Ces éoliennes sont les plus communes. Le grand avantage de cette éolienne est son rendement, notamment quand elle comprend un système d'orientation des pâles en fonction du vent. Ces éoliennes sont également jugées plus solides et engendrent de faibles coûts d'entretien. De plus, ils sont moins exposés aux contraintes mécaniques [3]. Pour générer un couple moteur entraînant la rotation, ils sont constitués d'une ou plusieurs pales. Elles sont Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale. [5]

Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pales tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne.

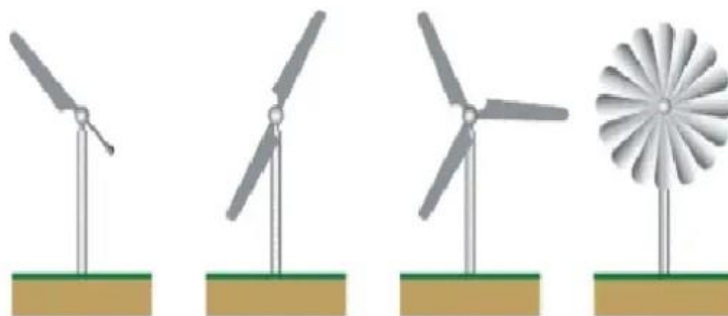


Figure I.7 : Les éoliennes à axe horizontal [29]

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal :

Amont : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

Aval : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

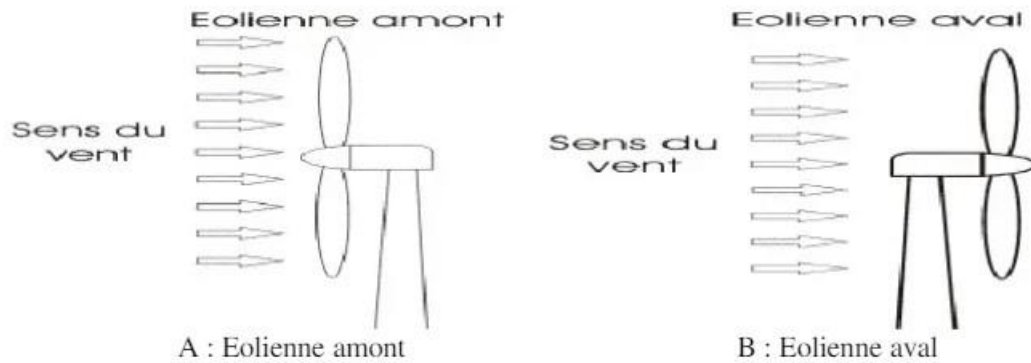


Figure I.8 : Éolienne en amont et en aval [31]

Avantage :

1. Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
2. Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
3. Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.
4. un bon rendement aérodynamique.

Inconvénients :

1. Coût de construction très élevé.
2. L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

I.8.1.2 Éolienne à axe verticale

Ce sont les premières éoliennes développées pour produire de l'électricité.

Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de

réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus léger.



Figure I.9 : Eoliennes à axe vertical [32]

Parmi les éoliennes verticales, deux types se démarquent aujourd'hui sur le marché :

L'éolienne de rotor darrieus :

Généralement, l'éolienne Darrieus est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdale, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie.

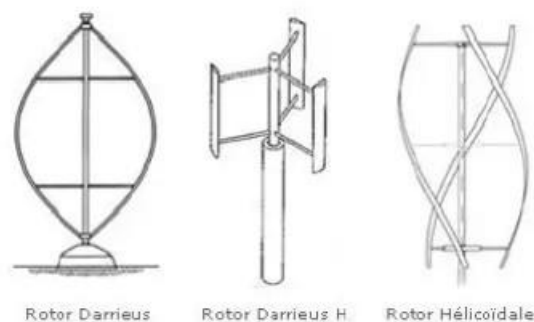


Figure I.10 : Eoliennes de type Darrieus [33]

L'éolienne de rotor Savonius :

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. Le principe consiste à ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Outre un esthétisme très design qui permet facilement aux installateurs de se projeter avec cette éolienne, l'éolienne Savonius peut très bien fonctionner avec de très faibles vents, ce qui n'est pas le cas avec l'éolienne Darrieus.

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante.



Figure I.11 : Eoliennes de type Savonius [34]

Avantage :

1. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
2. Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
3. Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

Inconvénients :

1. Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
2. La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol.
3. Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pâles, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.8.2 Selon la vitesse

I.8.2.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique qui impose sa

fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Généralement, Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers d'un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% [6].

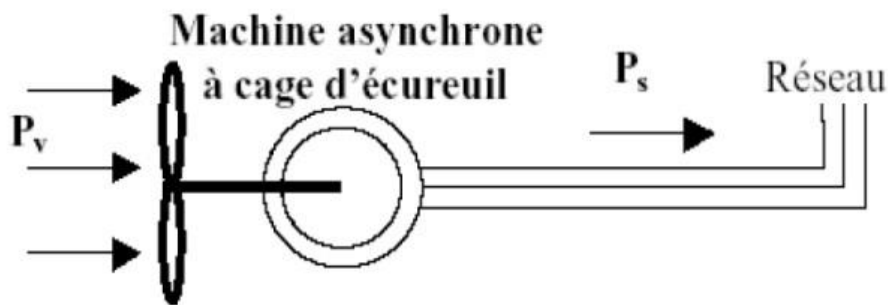


Figure I.12 : Eolienne à vitesse fixe [35]

Parmi ses **avantages** :

1. Elles possèdent un système électrique plus simple, car elles n'ont pas besoin de système électronique de commande.
2. Elles ont une très grande fiabilité.
3. Moins cher.

I.8.2.2 Les éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent [7].

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la (figure I.10).

La configuration de la (figure I.12-a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

La configuration de la (figure I.12-b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné, la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [8].

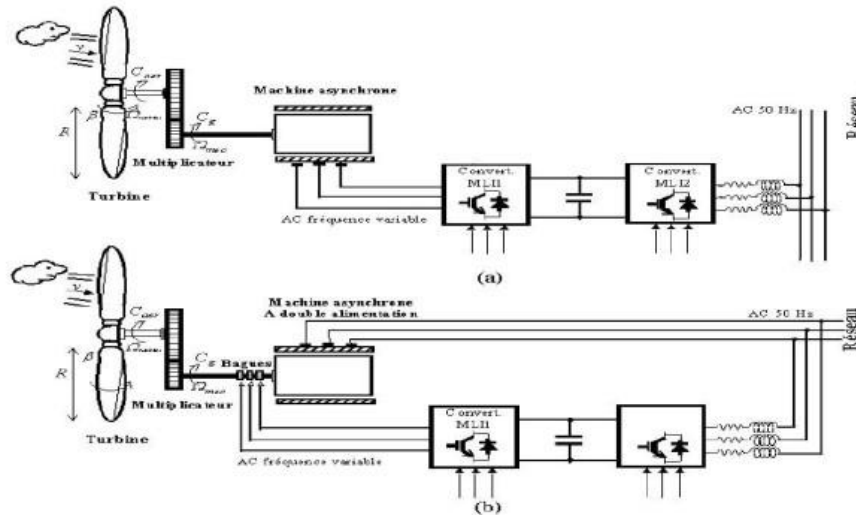


Figure I.13 : éoliennes à vitesse variable [35]

Les principaux **avantages** des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :

1. Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité.
2. Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent.
3. 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 pâles, 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 vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
4. Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est lente.
5. Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
6. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien [9].

I.8.3 selon l'utilisation

I.8.3.1 éolienne raccordée au réseau

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne est raccordée à de grands réseaux de puissance. Le raccordement à un réseau permet :

1. D'implanter les éoliennes au cœur de la ressource et non au plus près de la demande
2. D'amortir les fluctuations de production
3. De disposer de sources d'excitation permettant d'utiliser comme générateurs des machines asynchrones.

I.8.3.2 éolienne autonome

Les systèmes autonomes sont installés aux endroits bien ventés où le raccordement au réseau électrique est impossible, difficiles à réaliser ou trop cher, ces petites éoliennes sont généralement associées à des groupes électrogènes et/ou des systèmes de stockage.

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissances varie de quelques dizaines de watts à quelques dizaines de kilowatts(KW) pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou des stations météo.

Un système éolien autonome type est composé d'un aérogénérateur d'une batterie, d'un régulateur qui assure le contrôle du chargement et du déchargement de la batterie.

Il composé éventuellement de convertisseurs qui transforment le courant continu(CC) en courant alternatif(CA) pour les appareils qui en ont besoin.

I.9. Machines électriques dans les aérogénérateurs

Il y a deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.9.1 Générateur synchrone [10]

C'est le type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW

utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (Figure I.13), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice – réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

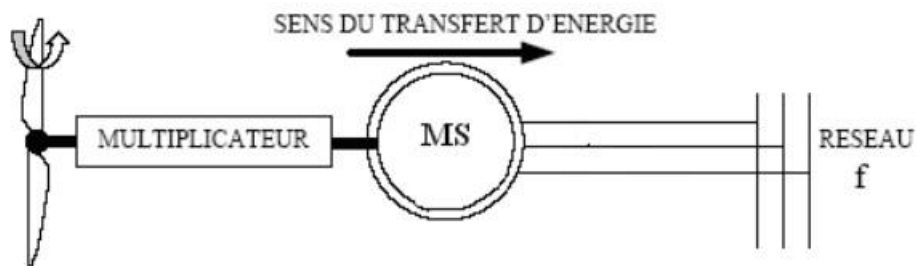


Figure I.14 : Machine synchrone connectée directement au réseau [10]

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (Figure I.14).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aérogénérateur. Elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

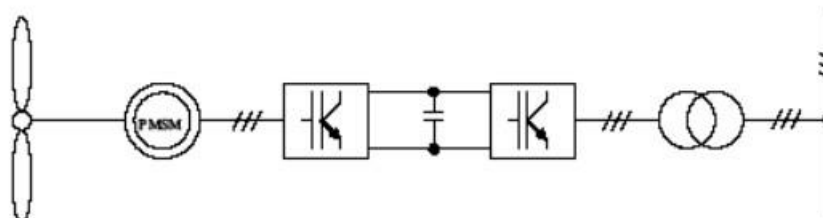


Figure I.15 : Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance [10]

I.9.1.1 Générateur synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires) [11] [12] [13]. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice – réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure I.15/16) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [11] [12] [13].

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Les sites isolés ne sont pas donc adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante [14].

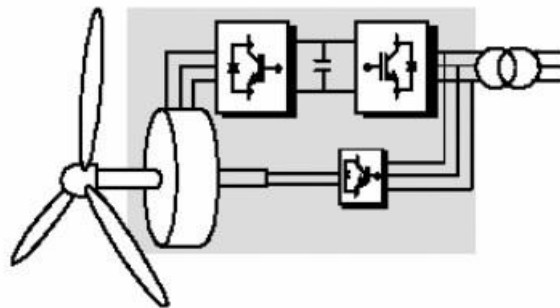


Figure I.16 : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et convertisseur MLI [13]

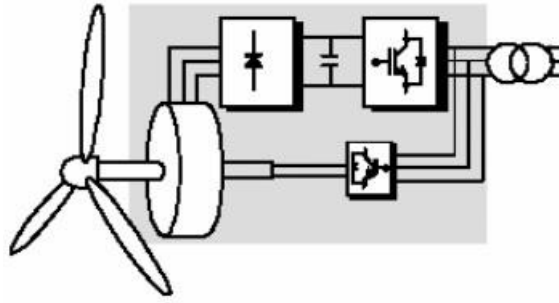


Figure I.17 : système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et redresseur à diodes [13]

I.9.1.2 Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs [15]. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [15] [16]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [14] [16] [17].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation [13] [14]. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure I.17). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [14] [18].

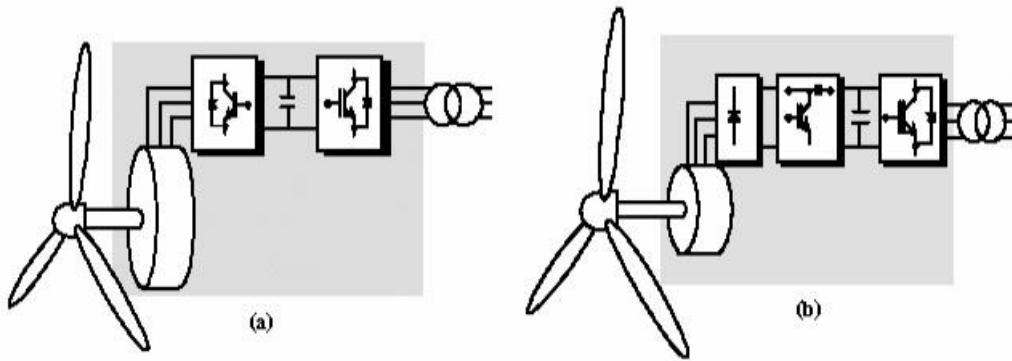


Figure I.18 : systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimants permanents [13]

(a) GSAP avec convertisseurs MLI (b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI

Dans la configuration de la GSAP de (Figure I.18 b), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW) [13].

Dans la configuration de (Figure I.18 a), un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal [19]. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence [13]. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur (Figure I.19), un système à vitesse « non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu [20].

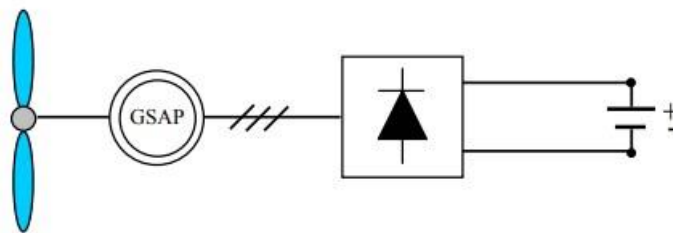


Figure I.19 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP [21]

I.9.2 Générateur asynchrone

Le domaine où le fonctionnement en mode génératrice de la machine asynchrone est le plus répandu est celui de l'énergie éolienne. En effet, c'est dans ce domaine que la génératrice asynchrone a connu des avancées notables. Dans ce qui suit, nous citerons quelques applications que nous essayerons de classer selon le type de machine asynchrone utilisée.

I.9.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple – vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur (Figure I.20) [3].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique suivante (Figure I.20), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif, le plus simple et le plus couramment utilisé, consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure I.21).

La machine à un nombre de pair de pôles fixe doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau ; si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance de la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur (Figure I.21), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

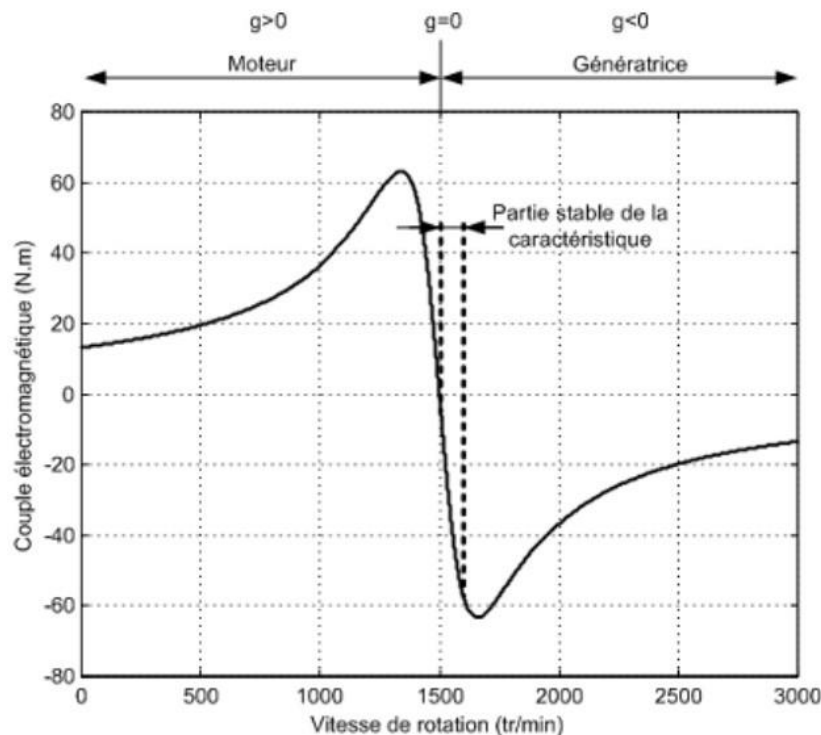


Figure I.20 : Caractéristique couple – vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles [3]

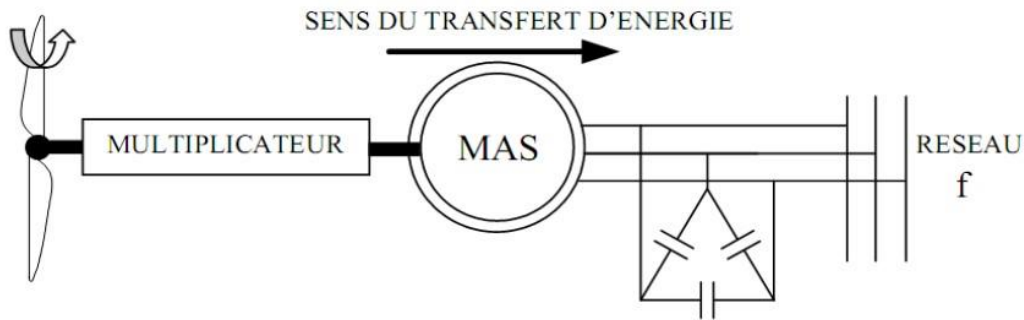


Figure I.21 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [3]

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée, car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (Figure I.22).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

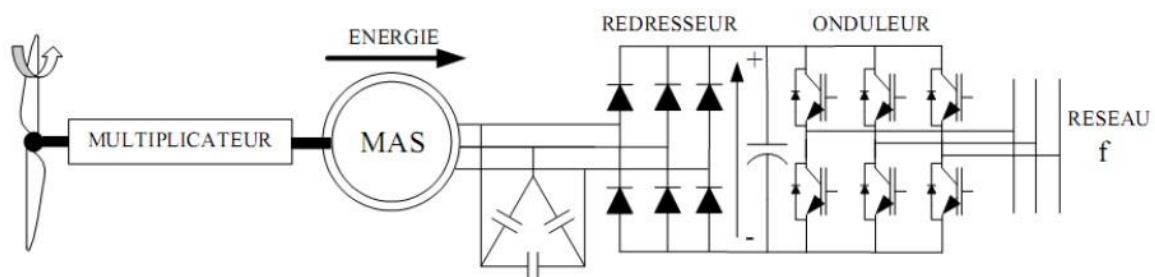


Figure I.22 : Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance[3]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour 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 de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

I.9.2.2 Génératrice asynchrone à double alimentation GADA

Elle est appelée en anglais DFIG (Doubly Fed Induction Generator). Cette génératrice est à rotor bobiné, elle est souvent utilisée dans les applications de fortes puissances. Elle est également appelée génératrice à excitation alternative. En effet, son rotor est alimenté via le système balais-bagues par un système de tensions triphasé équilibré, assuré par un système redresseur-onduleur. Ce système de tension triphasé crée un champ tournant rotorique à la fréquence imposée par l'onduleur. De plus, le rotor tourne, entraîné par une turbine éolienne ou autre. La fréquence des tensions induites au stator est donc la somme de la fréquence de l'onduleur et la fréquence de rotation mécanique du rotor. L'idée est justement d'asservir la fréquence d'alimentation des phases rotoriques à la vitesse de rotation du rotor. Si le rotor accélère on diminue la fréquence d'alimentation et s'il ralentit on l'augmente et ceci de façon à garder toujours la fréquence des tensions statoriques constante et égale à 50 Hz (Figure I.23). [22]

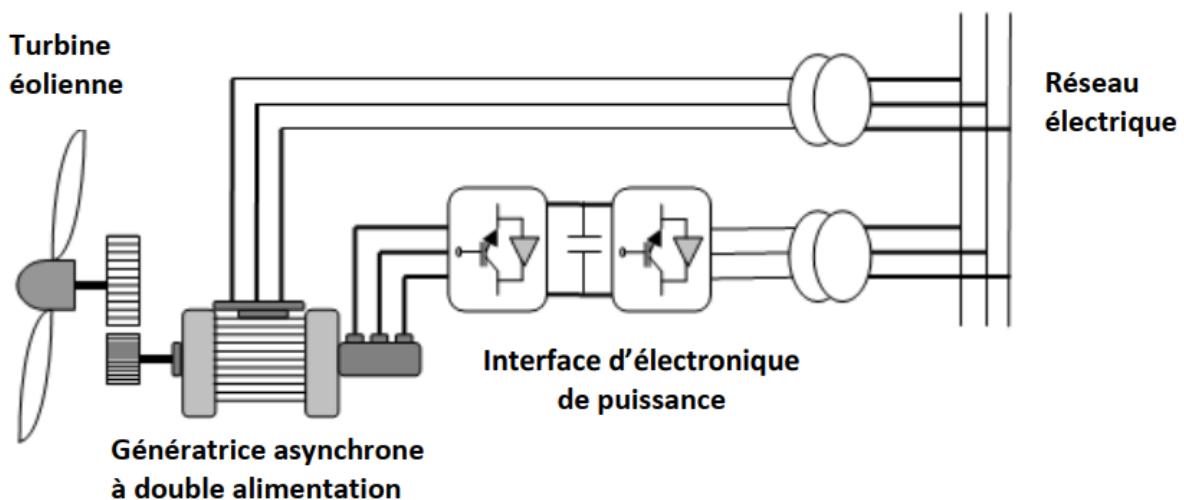


Figure I.23 : Génératrice asynchrone à double alimentation [22]

Ce système a un grand avantage, le convertisseur côté rotor est dimensionné à une fraction (souvent au tiers) de la puissance que peut fournir la génératrice par son stator, car on tolère dans ce genre d'application un glissement d'au plus égal à un tiers [3] [6].

Ce système présente malheureusement un gros inconvénient, c'est le système balais bagues qui limite la puissance d'utilisation et impose un entretien régulier. C'est ainsi qu'est née l'idée d'une cascade de deux machines asynchrones à double alimentation.

I.10. Les différentes installations des éoliennes

I.10.1 L'éolienne offshore

Le « offshore » consiste à implanter les aérogénérateurs en mer, à proximité des côtes. Ainsi, l'impact sur le paysage est modère et il n'y a plus de nuisance sonore (figure. I.24).

Cependant, l'installation d'éoliennes en mer est beaucoup plus coûteuse qu'à terre, les mats doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion doit être renforcée.

L'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens.

En revanche, les éoliennes « offshore » bénéficient d'un vent plus fort et plus régulier, leur puissance nominale est donc plus importante ainsi que leurs rendements. L'énergie éolienne offshore présente plusieurs avantages, parmi ces avantages on cite :

1. L'énorme potentiel inhérent à la surface couverte par les océans et les mers.
2. Elle est abondante, son impact environnemental est minimal.
3. Les vitesses de vent sont généralement plus élevées en mer que sur terre.
4. La turbulence étant plus faible en mer



Figure I.24 : Parc éolien offshore [36]

I.10.2 L'éolienne Onshore

Une éolienne terrestre ou onshore, est par définition installée sur la terre ferme (figure I.25).

Les deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne terrestre :

1. Utilisation industrielle dans le cadre d'un parc éolien, un ensemble d'aérogénérateur est regroupé sur un même site qui est relié au réseau électrique.
2. Utilisation domestique dans le cadre du « petit éolien », des éoliennes terrestres de plus petite envergure peuvent également répondre aux besoins de particuliers.

Il existe d'autres concepts d'éoliennes terrestres, classés selon leur axe soit horizontale ou vertical, les éoliennes terrestres sont moins coûteuses à installer et plus faciles à entretenir que les éoliennes offshore, qui doivent répondre à des défis techniques plus importants liés aux conditions du milieu marin. Le rendement potentiel est toutefois moins important sur terre qu'au large.

Les plus grands parcs éoliens terrestres installés dans le monde sont principalement situés aux États-Unis.



Figure I.25 : Parc éolien onshore [37]

I.11. Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients suivants :

I.11.1 Inconvénients

1. L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [12].
2. Le bruit [12].
3. Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [1].
4. L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [12], [25]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [12].

I.11.2 Avantages

1. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, économique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [26].

2. La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [27].
3. Elle n'est pas une énergie à risque [12].
4. C'est l'énergie la moins chère entre par rapporte les autres énergies renouvelables [26].
5. Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
6. L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

I.12. Conclusion

Une brève description du domaine des énergies éoliennes a été présentée dans ce chapitre. Quelques principales notions sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, ses principaux constituants et son principe de fonctionnement d'une chaîne éolienne.

Ensuite nous avons présenté les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable, les différents types de machines utilisées et leurs principes de fonctionnement. Ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

A la fin de ce chapitre nous avons donné les différentes installations des éoliennes.

Après avoir présenté les différentes génératrices (machines) utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la machine MADA.

A stylized yellow wind turbine with three blades and a vertical tower, positioned on the right side of the page.

Chapitre II :
Etude et modélisation de la
MADA

II.1.Introduction :

La machine asynchrone à bagues présente l'avantage d'être mieux adaptée à la variation de vitesse. Des dispositifs primitifs, comme les plots résistifs et le hacheur rotorique, ont été introduits afin d'assurer le fonctionnement à vitesse variable de cette machine. Toutefois, ces dispositifs ne présentent qu'une plage de variation de vitesse limitée et un rendement global réduit. Plus tard, le montage en cascade hypo synchrone de la machine à bagues vient améliorer le problème de rendement. Enfin, suite à une large évolution des composantes de l'électronique de puissance et de la commande numérique, deux structures ont émergées pour l'alimentation de cette machine pour varier sa vitesse : la première consiste à coupler le stator au réseau et d'alimenter le rotor à travers un onduleur de tension ; dans la seconde, les deux armatures sont couplées à deux onduleurs de tension. C'est la double alimentation de la machine, structure présentant une bonne flexibilité et un nombre suffisant de paramètres de réglage [39].

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique et modéliser la MADA, établie dans un repère diphasé à l'aide de transformation de PARK [1]. Avec ses deux alimentations à fréquences variables, l'une alimente le stator et l'autre alimente le rotor de façon à mettre en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre de simplifier le modèle complexe de la MADA. La simulation sera réalisée sous Matlab/Simulink.

II.2. Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

La littérature atteste du grand intérêt accordé à la machine asynchrone double ment alimentée. En tant que génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rotorique pourra être, et sera, dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles [39]. Pour les applications moteur, la littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [40].

II.3. La double alimentation.

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (machine à induction double alimentée), (de l'anglais, DFIM : *Doubly Fed Induction Machine*), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [22][41].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [42].

Dans les moteurs à double alimentation est appliquée (recueillie) au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statoriques sont directement alimentés par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [42].

II.4. Principe de fonctionnement de la MADA [42]

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices $f.m.m$ du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de $f.m.m$ des enroulements statoriques tourne dans l'espace, avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f_s$ et que le rotor tourne à la vitesse ω_r par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur $f.m.m$ de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse :

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s(1 - g) = \omega_s g .$$

Où :

g : est le coefficient de glissement.

ω_g : est la vitesse angulaire de glissement.

C'est-à-dire proportionnellement au glissement g ; si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse du synchronisme, les sens de rotation sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur $f.m.m$ par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_s \cdot g = 2\pi f_r$; c'est à dire :

$$f_r = g f_s$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$. à partir de l'équation (2.2) et (2.1) on voit que il n'y a qu'une seule vitesse synchrone $\omega_s (g = 0)$.

II.5 Description du fonctionnement de la MADA :

II.5.1 Structure de la machine

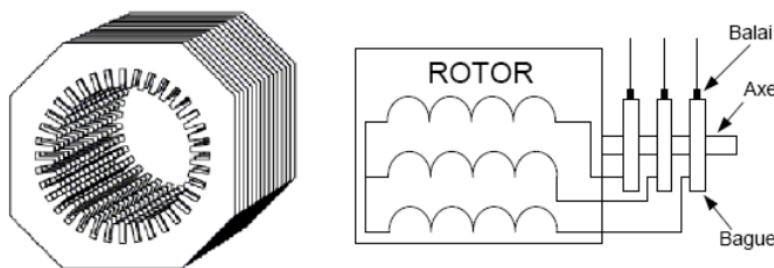


Figure II.1 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Connue depuis 1899 [43], [44], il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [45]. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures, la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [45] (Figure II.1).

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo-synchrone (Figure II.2) [46].

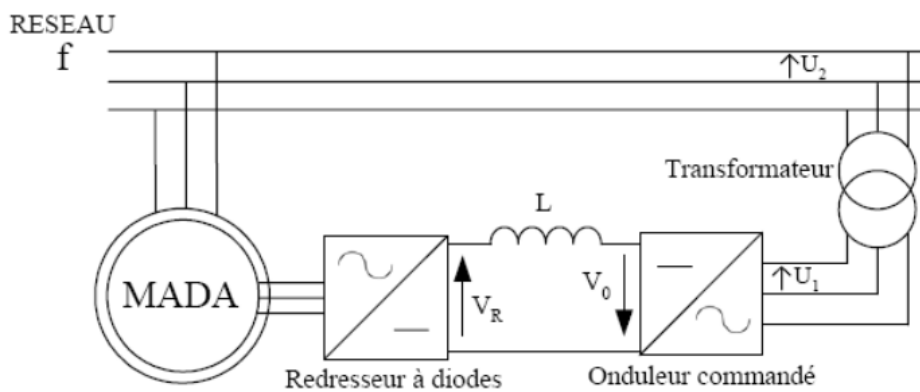


Figure II.2 : Cascade hypo-synchrone.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [46].

II.5.2 Modes de fonctionnement de la MADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence

réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [47].

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, 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 hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [47].

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine [22].

II.5.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [47]

La figure II.3 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

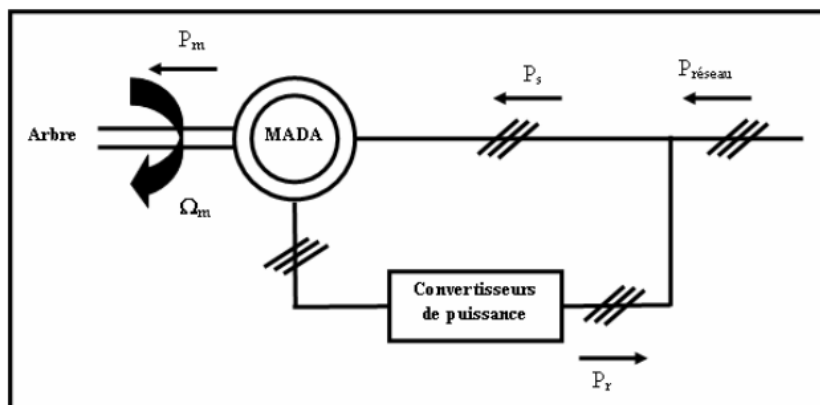


Figure II.3 : Fonctionnement moteur hypo-synchrone

II.5.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [47]

La figure II.4 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-

dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

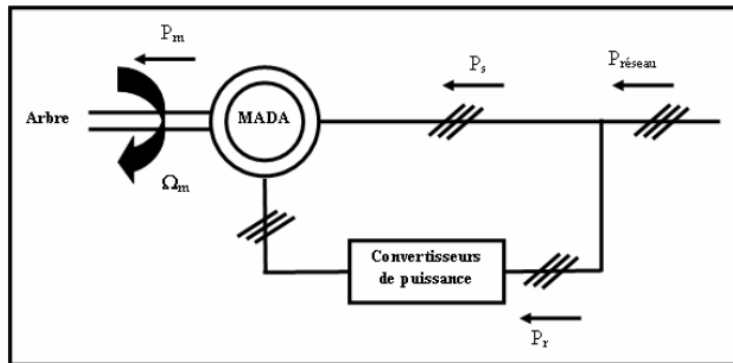


Figure II.4 : Fonctionnement moteur hyper-synchrone

II.5.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [47]

La figure II.5 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

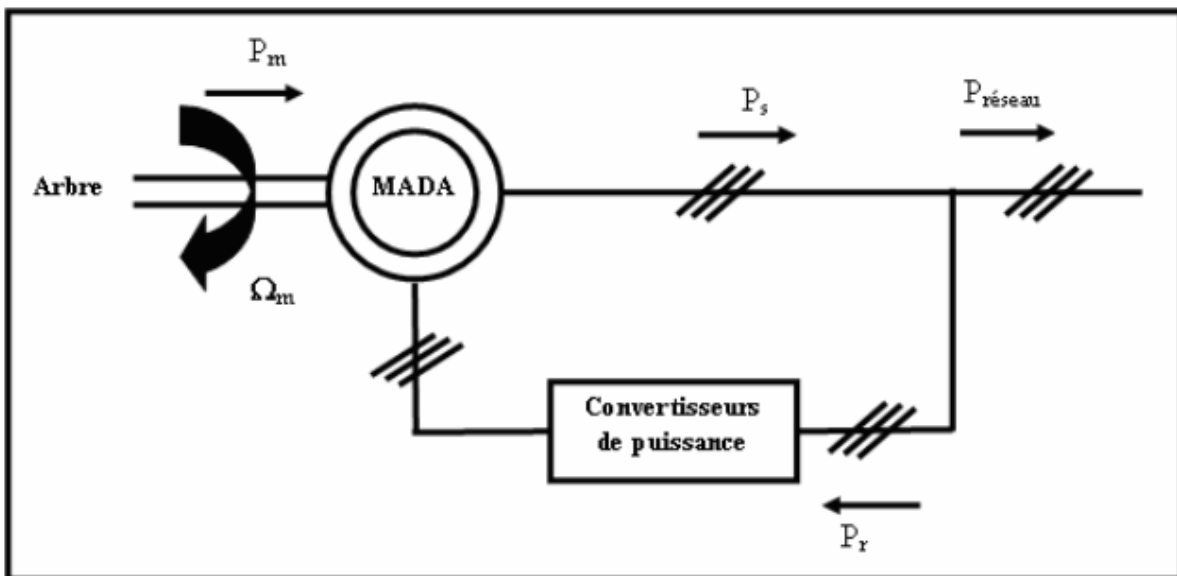


Figure II.5 : Fonctionnement générateur hypo-synchrone

II.5.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [47]

La figure II.6 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

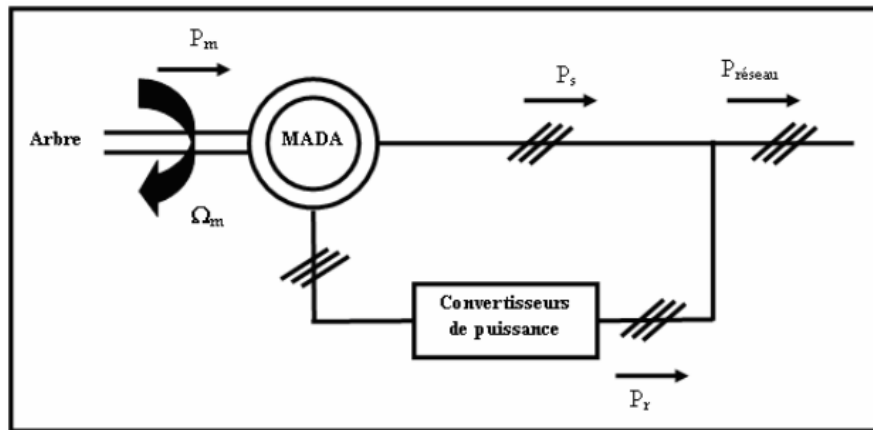


Figure II.6 : Fonctionnement générateur hyper-synchrone

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [47].

II.6. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation:

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator a trois (03) enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est $\Omega_s = \frac{\Omega_s}{p}$ où Ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et p est le nombre de paires de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator. Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse $\Omega_r = \frac{d\theta}{dt}$ par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique [62.63]

II.6.1.1 Hypothèses simplificatrices:

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

–Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.–Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.

–Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.

– Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé. De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [60.61.62.63].

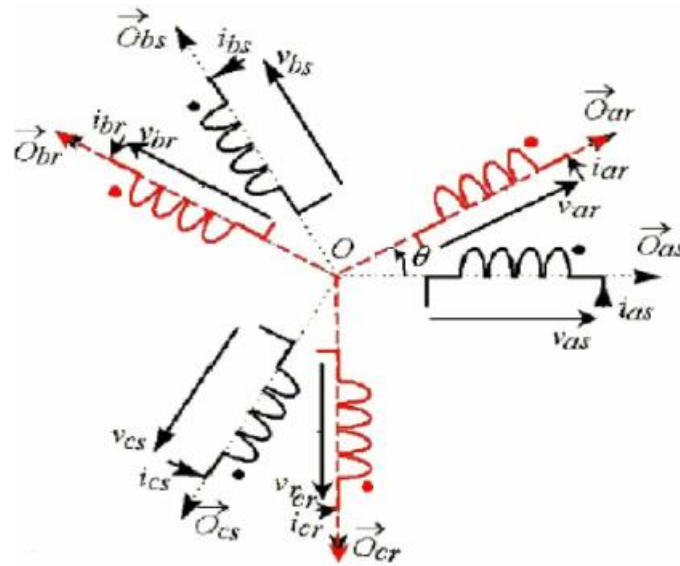


Figure II.7 : Représentation schématique de la MADA.

II.6.1.2 Modèle de la MADA:

II.6.1.2.1 Equations électriques de la MADA:

La loi de Faraday et la loi d'Ohm permettent de relier les tensions sur les enroulements aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages. Avec les conventions utilisées, les deux équations matricielles suivantes expriment les tensions sur les différents enroulements [57], [58].

$$[\mathbf{V}_s] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{I}_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] ; \quad [\mathbf{V}_r] = [\mathbf{R}_r][\mathbf{I}_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad \text{II.1}$$

Les flux sont donnés par :

$$\begin{aligned}
\phi_{ds} &= L_s I_{ds} + M I_{dr} \\
\phi_{qs} &= L_s I_{qs} + M I_{qr} \\
\phi_{dr} &= L_r I_{dr} + M I_{ds} \\
\phi_{qr} &= L_r I_{qr} + M I_{qs}
\end{aligned} \tag{II.2}$$

En appliquant la transformée de Laplace, et en remplaçant (I.2) dans (II.1), on obtient

$$\begin{cases}
[V_s] = [R_s][I_s] + P([L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]) \\
[V_r] = [R_r][I_r] + P([L_{ss}][I_r] + [M_{sr}][I_s])
\end{cases} \tag{II.3}$$

AVEC:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}$$

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

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

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

Où :

$[V_s], [V_r]$: Vecteurs de tensions statorique et rotorique. $[I_s], [I_r]$: Vecteurs de courants statorique et rotorique.

✓ $[\phi_s], [\phi_r]$: vecteurs de flux statorique et rotorique.

- ✓ $[R_s], [R_r]$ vecteurs de résistances statorique et rotorique.
- ✓ $[L_{ss}], [L_{rr}]$: vecteurs d'inductances statorique et rotorique.
- ✓ $[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles, $[M_{sr}^t] = [M_{sr}]$

R_s, R_r : Résistances statorique et rotorique par phase.

L_s, L_r : Inductances propres d'une phase statorique et rotorique.

M_s, M_r : Inductances mutuelles entre deux phases respectivement statorique et rotorique.

M : maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique (les axes des deux phases coïncident). P : opérateur de Laplace. α : Ecart angulaire entre deux phases, statorique et rotorique correspondant.

II.6.1.2.2 Equations mécaniques de la MADA:

L'expression générale du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_e = \frac{1}{2} P [I^t] \frac{d[L]}{dt} [I] \quad \text{II.4}$$

Avec

$[I]$: Matrice de courant total. $[L]$: Matrice inductance totale. P : est le nombre de pôle.

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

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

$$[C_e] = P [I_s] \quad \text{II.5}$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - K_f \quad \text{II.6}$$

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

II.6.1.2.3 Application de la transformation de Park à la MADA:

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park $[i_{dqo}]_s$ par pour les équations du stator et $[i_{dqo}]_r$ pour celles du rotor, on obtient :

Pour le stator :

$$[i_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][i_s] ; [i_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{dqo}]_s \quad \text{II.7}$$

$$[v_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][v_s] ; [v_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[v_{dqo}]_s \quad \text{II.8}$$

$$[\phi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][\phi_s] ; [\phi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\phi_{dqo}]_s \quad \text{II.9}$$

Pour le rotor :

$$[i_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][i_r] ; [i_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[i_{dqo}]_r \quad \text{II.10}$$

$$[v_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][v_r] ; [v_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[v_{dqo}]_r \quad \text{II.11}$$

$$[\phi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][\phi_r] ; [\phi_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[\phi_{dqo}]_r \quad \text{II.12}$$

Avec :

$$\begin{aligned} [i_{dqo}]_s &= [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{os}]^T ; [i_{dqo}]_r = [i_{dr} \ i_{qr} \ i_{or}]^T \\ [v_{dqo}]_s &= [v_{ds} \ v_{qs} \ v_{os}]^T ; [v_{dqo}]_r = [v_{dr} \ v_{qr} \ v_{or}]^T \\ [\phi_{dqo}]_s &= [\phi_{ds} \ \phi_{qs} \ \phi_{os}]^T ; [\phi_{dqo}]_r = [\phi_{dr} \ \phi_{qr} \ \phi_{or}]^T \end{aligned}$$

a- Equation des tensions:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \quad \text{II.13}$$

En introduisant les équations (II.7), (II.8), et (II.9) on obtient :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[v_{dqo}]_s = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{dqo}]_s + \frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}[\phi_{dqo}]_s) \quad \text{II.14}$$

D'où :

$$[v_{dqo}]_s = [R_s][i_{dqo}]_s + [P(\theta_s)][P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt}([\phi_{dqo}]_s) + [P(\theta_s)] \left[\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) \right] [\phi_{dqo}]_s \quad \text{II.15}$$

Avec :

$$[P(\theta_s)] \left[\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) \right] = \left(\frac{d\theta_s}{dt} \right) \begin{bmatrix} 0 & -10 \\ 100 & \\ & 000 \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

On écrit :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\phi_{ds}) - \omega_s \phi_{qs} \\ [v_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\phi_{qs}) + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad \text{II.17}$$

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

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

Les deux systèmes d'équation (II.17) et (II.18) s'écrivent sous la forme matricielle commesuit :

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

b- Equation du couple électromagnétique:

Après qu'on a effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes, on trouve celle-ci [9] :

$$C_e = P(\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \quad \text{II.19}$$

II.6.3 Choix du référentiel: [65]

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

II.6.3.1 Référentiel lié au stator:

Il se traduit par les relations suivantes :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \quad ; \quad \frac{d\theta_s}{dt} = 0$$

On aura le système d'équation suivant :

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

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

II.6.3.2 Référentiel lié au rotor:

Dans ce référentiel, on aura :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

Avec :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad \omega_s = \omega$$

Le système d'équation devient :

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

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

II.6.3.3 Référentiel lié au champ tournant:

Il se traduit par les relations suivantes :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s = \omega_r$$

On aura le système d'équation suivant :

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

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

II.7 Application à la MADA

Les machines à bagues à courant alternatif ont été réalisées dans le passé en diverses variantes, dont quelques usines ont débouché sur des applications industrielles importantes. Parmi les nombreuses utilisations de la machine, celle qui nous intéresse particulièrement est la machine à double alimentation.

La machine à double alimentation s'apparente fortement, du point de vue technologie, à la machine asynchrone à rotor bobiné classique, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car ce dernier est toujours d'actualité. Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de la vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, ou encore sa possibilité

de démarrer sans demander un courant important du réseau. Ces machines sont donc classiques, et ne posent pas de problèmes particuliers de réalisation [42].

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [46]. 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 être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [46] :

- ❖ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- ❖ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- ❖ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.

Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant. Une troisième application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs : un au rotor et un au stator (Figure II.8).

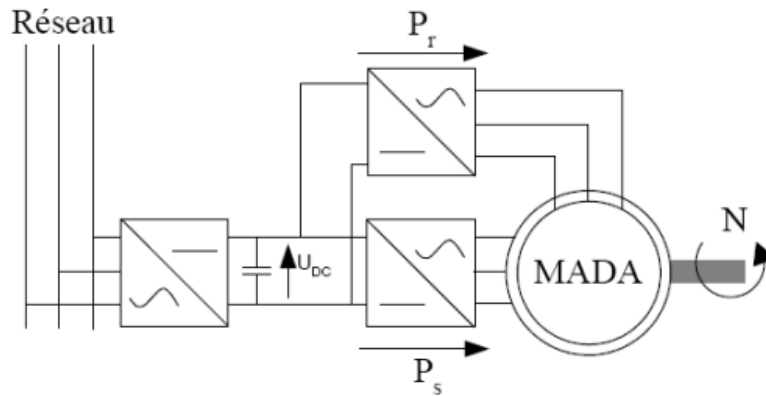


Figure II.8 : MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante. Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages :

- La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée.
- Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor.
- Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine.
- Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [48], [49] :

- ✚ La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- ✚ La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- ✚ Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charge etc.

II.8 Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable [50].

II.8.1 Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- ❖ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ❖ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- ❖ La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

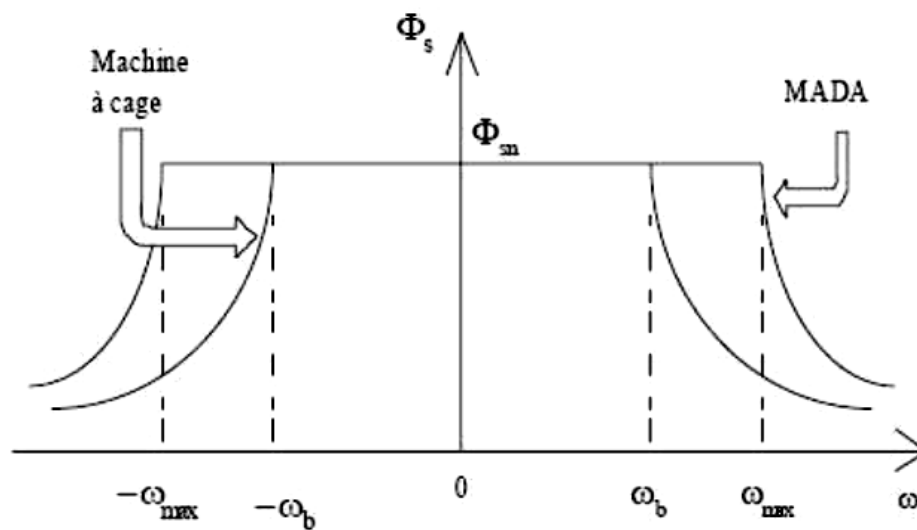


Figure II.9 : Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation : machine à cage et MADA

II.8.2 Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- ✓ Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- ✓ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- ✓ Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [50].
- ✓ Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone

conventionnelle celle-ci 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 sont exigée afin de garantir une stabilité à la machine [48],

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre un aperçu général sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et leur application a été donné ainsi que les différents types de fonctionnement. On a présenté aussi le principe et les régimes de fonctionnement de le MADA. Cette machine porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).



Chapitre III:
Commande vectorielle de la
MADA

III.1.Introduction

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variables et à fréquence constante (fonctionnement générateur) [66].

Dans ce chapitre, nous intéressons à la modélisation et la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.

III.2. Principe de la commande vectorielle

La MADA est un système non-linéaire, où son des puissances réactive est obtenu à travers un produit croisé entre les tensions et les courants. Ceci rend la commande de la MADA difficile. La commande vectorielle (la commande par orientation de flux) est utilisée afin d'éliminer cette difficulté. Le principe de cette commande est similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, à savoir le contrôle indépendamment des puissances active et réactive générées au stator de la machine. La puissance active dépend uniquement du courant rotorique I_{rq} et la puissance réactive dépend uniquement du courant I_{rd} (figure IV. 1) [52].

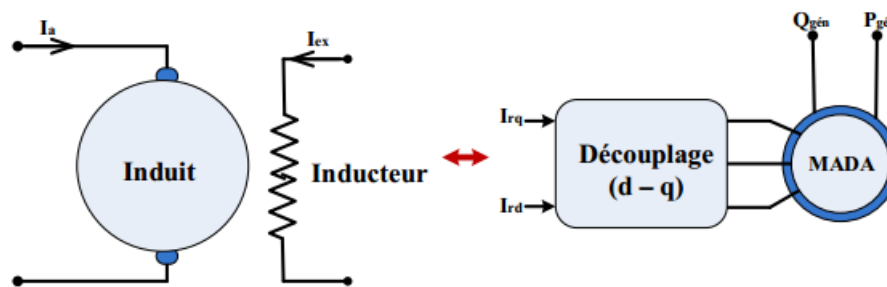


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle

III.3.Modèle de la MADA à flux statorique oriente suivant l'axe d

Nous avons choisi un référentiel diphasé $d-q$ lié au champ tournant (ce qui nous permettra d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent), et d'orienter le flux statorique φ_s suivant l'axe d , par l'alignement du vecteur du flux statorique sur l'axe d . Ainsi, les équations de flux et de courants peuvent s'écrire respectivement :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} = 0 \end{cases} \quad \text{III.1}$$

Avec : un flux statorique direct constant $\varphi_{ds} = \varphi_s$.

Et un flux statorique en quadrature orienté $\varphi_{qs} = 0$.

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Rappelons le système d'équations différentielles décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{III.3}$$

Si on néglige la résistance R_s , qui est une hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée dans la production d'énergie éolienne, les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante :

$$\begin{cases} u_{ds} = 0 \\ u_{qs} = u_s = \omega_s \varphi_{ds} \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad \text{III.4}$$

On remplace les équations courantes statoriques directs et en quadratures (III.2) par leurs expressions dans les équations de flux rotorique, on trouve :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right) i_{dr} + \frac{M \varphi_s}{L_s} \\ \varphi_{qr} = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right) i_{qr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \sigma i_{dr} + \frac{M \varphi_s}{L_s} \\ \varphi_{qr} = L_r \sigma i_{qr} \end{cases} \quad \text{III.5}$$

$$\text{Où : } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$$

On remplace les équations de flux rotorique (III.5) par leurs expressions dans les équations des tensions rotorique (III.4), on trouve :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r L_r \sigma i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_r L_r \sigma i_{dr} + \omega_r \frac{M\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{III.6}$$

En régime permanent, les dérivées des courants rotoriques biphasés s'annulent, ce qui nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - g\omega_s L_r \sigma i_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + g\omega_s L_r \sigma i_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{III.7}$$

En appliquant la transformation de Laplace à ces deux équations, on obtient :

$$\begin{cases} U_{dr} = [R_r + L_r \sigma S] I_{dr} - g\omega_s L_r \sigma I_{qr} \\ U_{qr} = [R_r + L_r \sigma S] I_{qr} + g\omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{III.8}$$

U_{dr} et U_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{R_r + L_r \sigma S} (U_{dr} + g\omega_s L_r \sigma I_{qr}) \\ i_{qr} = \frac{1}{R_r + L_r \sigma S} \left(U_{qr} - g\omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{MV_s}{L_s} \right) \end{cases}$$

III.3.1. Les équations le couple électromagnétique et les puissances statoriques:

En remplaçant l'expression du flux de (III.1) et les expressions des courants statoriques de la relation (III.2), le couple électromagnétique s'exprime comme suit :

$$C_e = -P\varphi_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \quad \text{III.9}$$

Dans un repère biphasé, les puissances actives et réactive statoriques d'une machine asynchrone équation. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$P_s = v_{qs} i_{qs}$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} \quad \text{III.10}$$

On remplace les équations courantes statoriques directs et en quadratures (III.2) par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive (III.10), on trouve :

$$P_s = -\frac{u_s M}{L_s} \cdot i_{qr} \quad \text{III.11}$$

$$Q_s = \frac{u_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{U_s \cdot M}{L_s} \cdot i_{dr}$$

$$\text{Où : } \varphi_s = \frac{u_s}{\omega_s}$$

Il ressort de l'expression (III.11) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{u_s^2}{\omega_s L_s}$ imposée par le réseau. Le schéma simplifié du modèle mathématique de la MADA.

III.4. Commande indirecte des puissances active et réactive de la MADA

Cette méthode consiste à récapituler l'opération de contrôle à partir de l'inversement de la fonction de transfert du système à réguler, pour établir les tensions rotoriques de référence en fonction des puissances active et réactive au niveau du stator. On recherche donc à former les équations des puissances active et réactive d'un côté et des tensions rotoriques d'autre part en fonction des courants rotoriques tout en tenant compte du modèle mathématique de la génératrice [67].

III.4.1. Commande en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est fondamentalement basée sur la proposition d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle comporte à asservir non plus les puissances mais plus précisément indirectement les courants rotoriques en n'utilisant pas non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [68].

En gardant les mêmes hypothèses, En combinant les différentes équations ci-dessus, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. et on trouve [69] :

$$\begin{cases} U_{dr} = g \omega_s \frac{L_r \sigma}{M V_s} P - \left(\frac{R_s + L_r \sigma}{\frac{M V_s}{L_s}} S \right) Q + \left(\frac{R_r V_s}{\omega_s M} + \frac{L_r \sigma V_s}{\omega_s M} S \right) \\ U_{qr} = \left(\frac{R_r + L_r \sigma}{\frac{M V_s}{L_s}} S \right) P - g \omega_s \frac{L_r \sigma}{M V_s} Q + \frac{g L_r \sigma V_s}{M} \end{cases}$$

Les courants de références déjà déterminés par les puissances statoriques de références imposés à la machine.

$$\begin{cases} i_{qr}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s M} P_s^{ref} \\ i_{dr}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s M} - \frac{L_s}{V_s M} Q_s^{ref} \end{cases}$$

III.4.2. Commande en boucle fermée

Pour évoluer et corriger le système de commande précédent, nous allons mettre une boucle de régulation complémentaire des puissances active et réactive dans le schéma bloc de la figure 3.3 de telle sorte que chaque axe de régulation contient deux régulateurs PI, l'un pour contrôler la puissance et l'autre pour le courant rotorique [67].

III.5. Résultats de simulation

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

- Machine connectée au réseau et entraînée par une vitesse fixe 1440 *tr/min* avec un échelon négatif pour la puissance active ($P=-3000W$) entre les instants $t=1,5s$ et $t=2,5s$ et un échelon positif entre les instants $t=3,5s$ et $t=4,5s$ ($P=+3000W$)

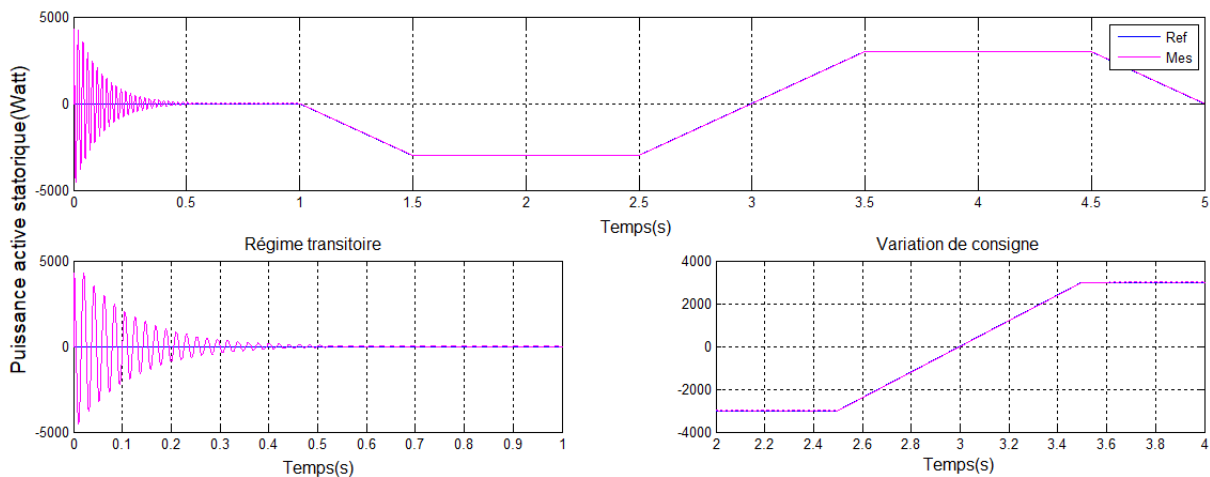


Figure III.3 Puissance active statorique

- Toujours la machine connectée au réseau et entraînée par une vitesse fixe 1440 *tr/min* avec un échelon positif pour la puissance réactive ($Q=+3000Var$) entre les instants $t=1,5s$ et $t=2,5s$ et un échelon négatif entre les instants $t=3,5s$ et $t=4,5s$ ($Q=-3000Var$)

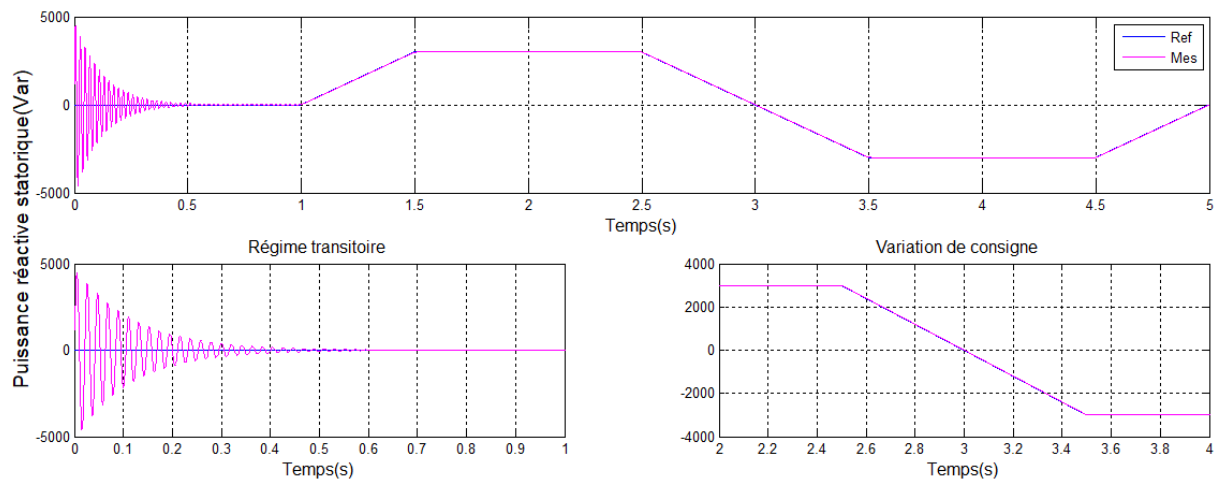


Figure III.4 Puissance réactive statorique

Interprétation des résultats

D'après les courbes des figure (III.4) qui représentent les résultats de simulation, il est bien clair que la technique de commande vectorielle permet un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique active et réactive. Les résultats obtenus par la simulation, montre clairement que l'utilisation de la commande arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées qui veut dire une bonne suivie des consignes de puissance active et réactive.

III.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d . La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

Chapitre IV :
Commande par la logique
floue de la MADA



IV.1.Introduction

La logique floue est une description mathématique d'un processus basée sur la théorie des ensembles flous. Cette théorie introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh. A cette époque la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0), on commence à se répandre sur une grande échelle. Par contre, la logique floue permettait de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0. Initialement .Son but est, comme en automatique classique, de traiter des problèmes de commande de processus c'est-à-dire de gérer un processus en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus, mais son approche est différente de celle de l'automatique classique. Elle se sert le plus souvent des connaissances des experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus [70].

Le but de ce chapitre est de représenter un premier temps un bref rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue, et de développer un algorithme de commande par LOGIQUE FLOUE basée sur les régulateurs flous afin d'améliorer les qualités de poursuite et d'assurer la robustesse de la commande.

IV.2. Principe de la logique floue

Dans la perspective des sciences de l'ingénieur nous pouvons, admettre que dans les situations où les méthodes traditionnelles de modélisation à partir d'observation physique s'avèrent non satisfaisante. Les sciences subjectives, particulièrement la logique floue, peuvent rendre beaucoup de services, lorsque les connaissances sur la façon de résoudre un problème, de piloter un grand système, d'effectuer un réglage, etc. sont disponibles. Cela suppose que l'on sache définir des méthodes rigoureuses de représentations des connaissances. En pratique la résolution d'un problème concret peut avoir recours à l'utilisation conjointe des méthodes objectives traditionnelles et celles subjectives [71].

IV.3. Notions fondamentales de la logique floue

Dans cette section, nous présentons les notions de base de la logique floue. Nous aborderons uniquement les points les plus importants pour la compréhension d'un raisonnement flou à savoir :

IV.3.1 Ensembles flous

Dans la théorie des ensembles conventionnels, une chose appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. Toutefois, dans la réalité, il est rare de rencontrer des choses dont le

statut est précisément défini. Par exemple, où est exactement la différence entre une personne grande et une autre de grandeur moyenne ? C'est à partir de ce genre de constatation que Zadeh a développé sa théorie. Il a défini les ensembles flous comme étant des termes Linguistiques du genre : zéro, grand, négatif, petit ... Ces termes existent aussi dans les ensembles conventionnels [75].

Cependant, ce qui différencie ces deux théories sur les ensembles provient des limites des ensembles. Dans les ensembles flous, il est permis qu'une chose appartienne partiellement à un certain ensemble, ceci s'appelle le degré d'appartenance. Dans les ensembles conventionnels, le degré d'appartenance est 0 ou 1 alors en logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle comprise entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance μ) [72]. Un exemple simple d'ensembles flous est la classification des personnes selon leur âge en trois ensembles : jeune, moyen et vieux. La façon d'établir cette classification est présentée à la figure (IV.1)

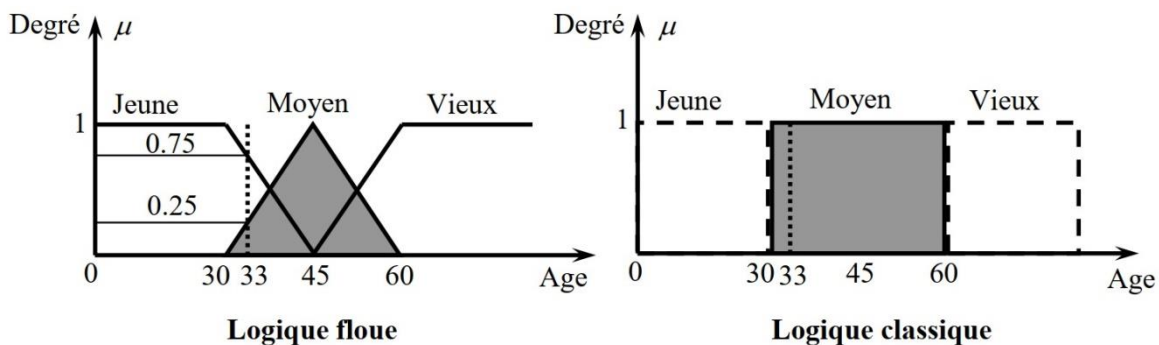


Figure IV.1 : Classification des ensembles flous

Cette figure montre que les limites entre ces trois groupes ne varient pas soudainement, mais progressivement. Par exemple, une personne de 33 ans appartient à l'ensemble "jeune" avec une valeur $\mu = 0.75$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble "moyens" avec une valeur $\mu = 0.25$. La figure (IV.1) donne donc le degré d'appartenance d'une personne, selon son âge, à un certain ensemble flou. Pour cette raison, ce type de figure s'appelle une fonction d'appartenance. On peut ainsi résumer la terminologie dans l'illustration suivante [73]

Variable linguistique	Âge
Valeur d'une variable linguistique	Jeune, Moyen, Vieux, ...
Ensembles flous	"jeune", "moyen", "Vieux", ...
Plage de valeurs	(0, 30, 45, 60, ...)

Fonction d'appartenance	$\mu_E(x) = a$	$0 \leq a \leq 1$
Degré d'appartenance	a	

L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue x et $\mu_E(x)$ est le degré d'appartenance de l'élément x à l'ensemble flou A figure (IV.1) [74].

IV.3.2 Caractéristiques d'un sous ensemble flou

Soit A un sous ensemble flou de X . On définit les caractéristiques suivantes propres à cet ensemble flou, (figure IV.2) [77, 76]

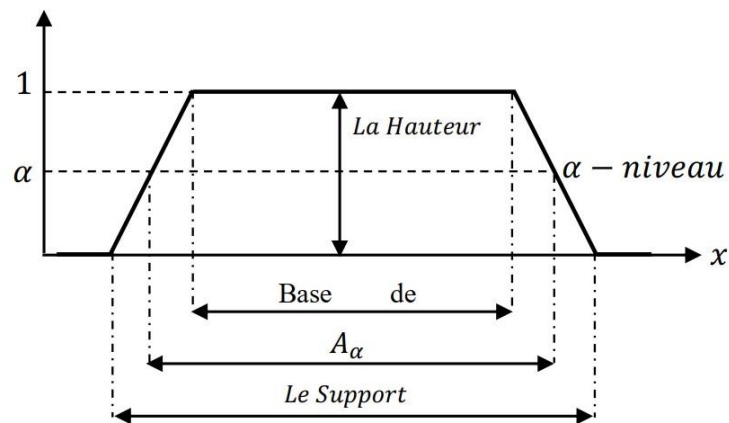


Figure IV.2 : Caractéristiques d'un ensemble flou.

Le Noyau : le noyau d'un ensemble flou A est l'ensemble qui contient tous les éléments qui appartiennent sûr et certain à A , leurs degrés d'appartenance sont égaux à 1. Quand le Noyau est réduit à un point, celui-ci est appelé valeur modale. Il est donné par :

$$N(A) = \left\{ x \in X / \mu_A(x) = 1 \right\} \quad \text{IV.1}$$

Le Support : le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle. Il est donné par :

$$S(A) = \{ x \in X / \mu_A \neq 0 \} \quad \text{IV.2}$$

La Hauteur : c'est la valeur maximale de la fonction d'appartenance sur le domaine X qui est égale à 1. Il est donné par :

$$H(A) = \max_x (\mu_A(x)) \in X \quad \text{IV.3}$$

Le cardinal : est définie par la somme des degrés d'appartenance :

$$|A| = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) \quad \text{IV.4}$$

Pour un domaine continu, la cardinalité sera définie par :

$$|A| = \int_x \mu_A(A) dx \quad \text{IV.5}$$

Couple de niveau α : On appelle couple de niveau α ou α -coupede l'ensemble flou A les éléments qui possèdent un degré d'appartenance supérieur ou égal α . Le sous ensemble A_α de X défini par :

$$A_\alpha = \{x / \mu_A(x) \geq \alpha\} x \in [0 \quad 1] \quad \text{IV.6}$$

IV.3.3 Fonctions d'appartenances

IV.3.3.1 Différentes formes de fonction d'appartenance

Nous avons vu que chaque ensemble flou peut être représenté par sa fonction, d'appartenance. Si l'ensemble de référence est discret, les fonctions d'appartenance sont des valeurs discrètes de l'intervalle $[0, 1]$. Si l'univers du discours est un ensemble continu, nous pouvons représenter ces valeurs analytiquement comme fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenances peuvent avoir différentes formes :

- ♥ Monotones (décroissantes ou croissantes), comme le montre les figure (IV.3 et IV.4) ;
- ♥ Triangulaires (figure IV.5.a)
- ♥ Trapézoïdales (figure IV.5.b)
- ♥ En forme de cloche (Gaussiennes), (figure IV.5.c)

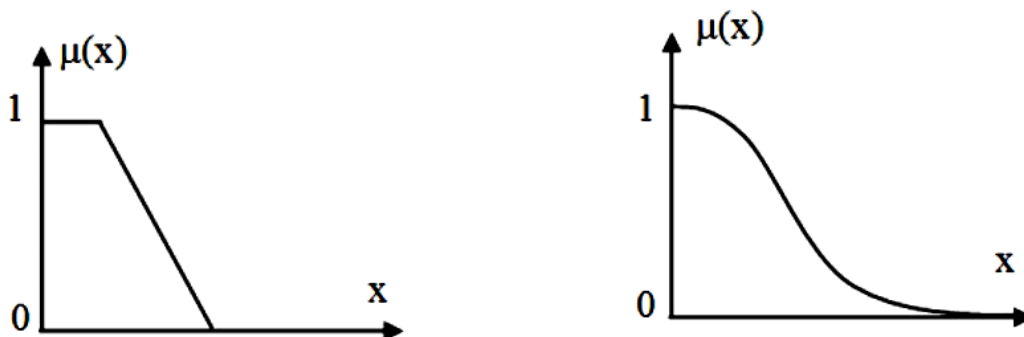


Figure IV.3 : Exemples des fonctions d'appartenances monotones décroissantes

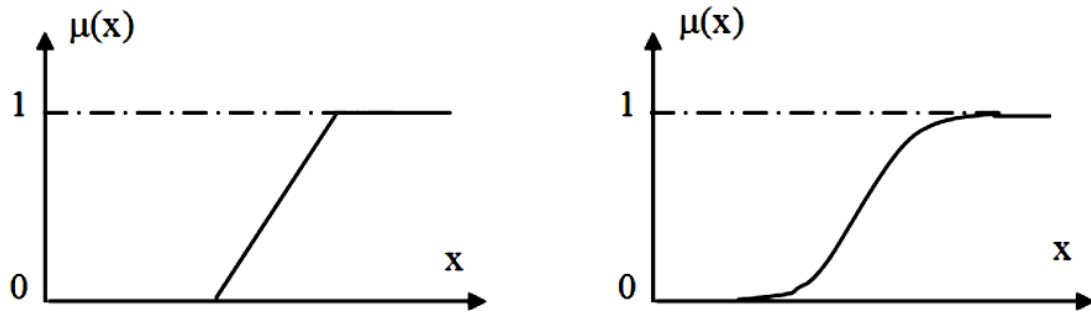


Figure IV.4 : Exemples des fonctions d'appartenance monotones croissantes.

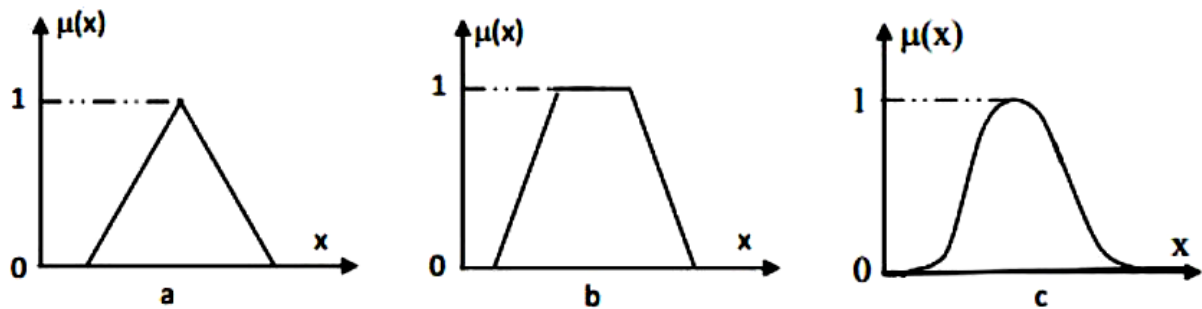


Figure IV.5 : Exemples des fonctions d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale et gaussienne).

IV3.3.2 Formulation mathématique des fonctions d'appartenance

On présente ici seulement les deux fonctions triangulaire et trapézoïdale (IV.6).

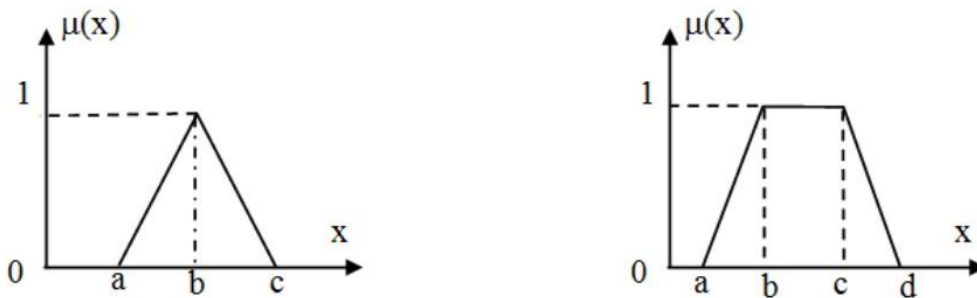


Figure IV.6 : Fonctions d'appartenance triangulaire et trapézoïdale.

Fonction triangulaire : L'allure de cette fonction est définie par trois paramètres {a, b, c

$$\mu(x) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \text{IV.7}$$

Fonction trapézoïdale : Elle est définie par quatre paramètres {a, b, c, d}

$$\mu(x) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right) \text{IV.8}$$

IV.3.4 Variables linguistiques [52]

Ce sont des variables dont les valeurs ne sont pas des nombres, mais des mots ou des phrases exprimés en langage naturel. La raison pour laquelle on utilise cette représentation, est que le caractère linguistique est moins spécifique que le caractère numérique.

Une variable linguistique x est généralement caractérisée par un triplé $\{x, (x), X\}$ où x désigne le nom de la variable (température, taille, vitesse), définie sur un univers de discours X , et (x) son ensemble de termes ou valeurs linguistiques. Dans notre cas, l'univers de discours X est toujours un sous-ensemble des réels. Par exemple, si l'erreur est considérée comme variable linguistique définie dans le domaine

$X = [-10 ; 10]$, ses valeurs linguistiques peuvent être définies comme suit :

T (erreur) = (NégativeGrande (NG), NégativePetite (NP), EnvironZéro (EZ), PositivePetite (PP), PositiveGrande (PG))

Ces valeurs linguistiques peuvent être considérées comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées sur la Figure IV.7 [78, 79].

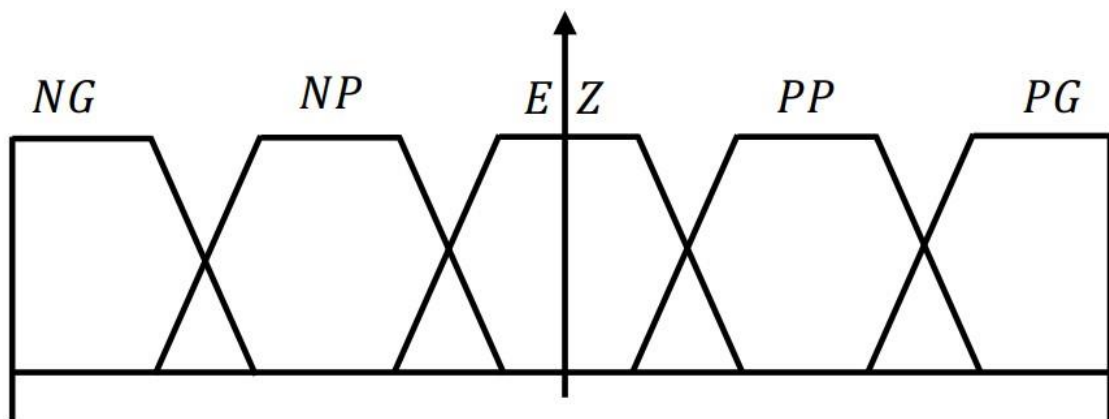


Figure IV.7 : Fonctions d'appartenance de T (erreur) = $\{NG, NP, EZ, PP, PG\}$.

IV.3.5 Opérateurs de la logique floue

Supposant deux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ de deux variables floues x et y caractérisant la température de l'air et la force du vent, l'exemple "l'air est froid et le vent est fort" ou encore "si l'air est froid ou le vent n'est pas faible", il faut fermer la porte. Les compositions « ET » et « OU » en plus de la négation apparaissent et doivent être définies. Pour pouvoir décider de fermer la porte ou non il faut que deux conditions soient vérifiées en

mêmetemps. Alors, il est important de pouvoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance [80]

L'opérateur ET

L'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum (Intersection) des deux fonctions d'appartenance.

$$\mu_c(z) = \mu_{AetB}(z) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \text{IV.9}$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 0 comme élément absorbant et 1 comme élément neutre [52].

L'opérateur OU

En général, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance

$$\mu_c(z) = \mu_{AouB}(z) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad \text{IV.10}$$

Cet opérateur est commutatif, associatif, admet 1 comme élément absorbant et 0 comme élément neutre [52]

L'opérateur NON

Il est caractérisé en logique floue par la fonction

$$\mu_c(z) = \mu_A(z) = (1 - \mu_A(x)) \quad \text{IV.11}$$

Dans certaines circonstances, il est judicieux de choisir d'autres opérateurs en plus de OU, ET, NON [52]

Produit cartésien

Soit A_1, \dots, A_n des ensembles flous, dans les univers de discours u_1, \dots, u_n respectivement. Le produit cartésien de A_1, \dots, A_n est un ensemble flou dans l'univers de discours $u_1 * u_2 * \dots * u_n$ dont sa fonction d'appartenance est exprimée par

$$\mu_{A_1 A_2 \dots A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n)\} \quad \text{IV.12}$$

$$\mu_{A_1 A_2 \dots A_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \mu_{A_1}(u_1), \dots, \mu_{A_n}(u_n) \quad \text{IV.13}$$

IV.3.6 Raisonnement flou

Le mode naturel est trop complexe. Ces mesures sont soumises à des imprécisions, vagues et éventuellement incertaines. Le raisonnement de ces connaissances en logique classique ne suffit pas, on fait appel à un raisonnement flou [52].

IV.3.6.1 Implication floue

Une expression conditionnelle du type “SI x est A ALORS y est B ”, où A et B sont des ensembles flous sur les univers U et V respectivement une relation floue R sur le produit cartésien

IV 3.6.2 Modus ponens généralisé [80, 81]

Le but du raisonnement approximatif est de construire un processus déductif ayant pour objectif la détermination de conclusion précise à partir de faits imprécis et d'un ensemble de règle floues. Un tel processus est très adéquat pour la description qualitative du comportement des systèmes. Un cas particulier de raisonnement est le MPG dont le mécanisme d'inférence est

SI x est A ALORS y est B

x est \hat{A}

IV.14

y est \hat{B}

Les valeurs de y sur V sont données par la projection de $R = \square A' \cap (A \rightarrow \square B)$ sur V , soit. En passant aux fonctions d'appartenance :

$$\forall y \in V, \mu_{\hat{B}}(y) = \sup_{x \in U} \min(\mu_{\hat{A}}(x), \mu_{A \rightarrow B}(x, y)) \quad \text{IV.15}$$

Si A' est un singleton flou, i.e., $A' = \{x_0\}$ avec $\mu_{A'}(x) = 1$ pour $x = x_0$ et 0 ailleurs, alors B' est donné par l'expression réduite :

$$\mu_{\hat{B}}(y) = \mu_{A \rightarrow B}(x_0, y) \quad \text{IV.16}$$

IV.4. Structure d'une commande à logique floue [52]

Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur par retour d'état, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques pour être traitées par des opérateurs de la logique floue. Les variables d'entrées sont dans un premier temps

converties en variables floues en définissant pour chacune d'elle une fonction d'appartenance. Par la suite, on convertit la commande floue résultante de l'inférence à commande réel pour les appliquer au procédé.

Un régulateur par logique floue comprend les quatre parties suivantes : la base des règles, la Fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification. Il comprend aussi des gains de normalisation et de dénormalisation qui sont ajoutés respectivement à l'entrée et à la sortie du contrôleur flou afin qu'il soit transportable et adaptable même avec des paramètres différents,

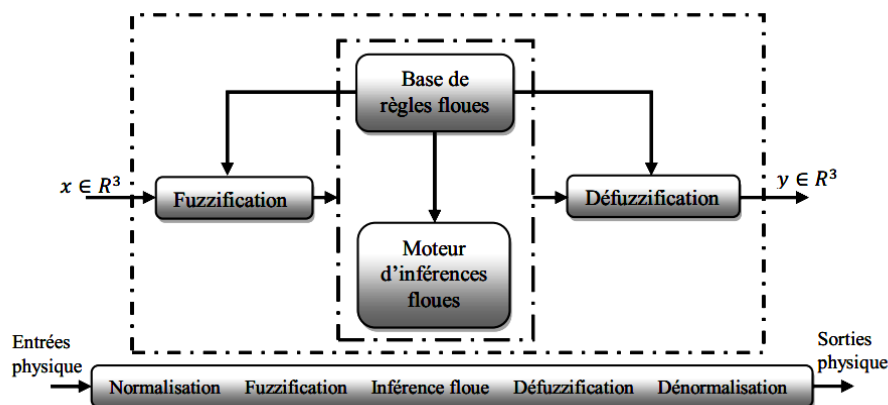


Figure IV.8 : Schéma synoptique général d'un contrôleur flou [52].

IV.4.1 Fuzzification

L'objectif de la Fuzzification est de transformer les grandeurs physiques (numériques) d'entrée en des grandeurs floues (termes linguistiques ou Symboliques) qui peuvent être traitées par les inférences, c'est-à-dire que les grandeurs physiques d'entrée sont réduites à des grandeurs normalisées dans une plage de variation, souvent $[1,-1]$, appelée univers de discours. Ensuite, les grandeurs normalisées sont converties en des ensembles flous qui sont représentés par des fonctions d'appartenances avec des valeurs linguistiques. Le nombre d'ensembles dépend de la résolution et l'intervention du réglage désiré. Dans la littérature de la commande floue, deux approches de Fuzzification sont généralement utilisées, à savoir : la Fuzzification singleton et la Fuzzification non-singleton [52, 80, 81, 82].

IV.4.2 Règles de contrôle

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent généralement la connaissance humaine sous forme de règles du type (Si *prémisse* Alors *conclusion*). La prémisse de la règle

(l'antécédent) est constituée des conditions qu'il faut satisfaire afin de réaliser la conclusion de la règle (la conséquence).

IV.4.3 Inférence des règles floues [52]

L'inférence floue ou la logique de prise de décision est le cœur du contrôleur flou qui possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire (inférer) les actions de la commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférences de la logique floue. On applique les règles d'inférence sur les variables floues issues de la Fuzzification pour créer et déterminer les nouvelles variables floues de sortie (la commande du système), en se basant sur des opérations floues appliquées aux fonctions d'appartenances.

Il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenances. On introduit la notion de mécanisme ou méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une inférence permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière. Pour le réglage par la logique floue, on utilise en général l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max-Min (Méthode de Mamdani).
- Méthode d'inférence Max-Produit (Méthode de Larsen).
- Méthode d'inférence Somme-Produit.

Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue « ET, OU, et ALORS ».

Operateurs flous Méthodes d'inférence	ET	OU	ALORS
Max-Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme-Produit	Produit	Moyenne	Produit

Tableau IV.1 : Méthodes usuelles de l'inférence floue.

IV.4.4 Défuzzification :

La défuzzification consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence (loi de commande) en des grandeurs numériques (valeurs physiques), c'est-à-dire que les ensembles flous résultants de l'inférence sont convertis en des valeurs

numériques. Ensuite, ces valeurs sont dé normalisées et appliquées au processus. On distingue plusieurs méthodes de défuzzification, méthode de maximum, méthode de la moyenne des maximas, méthode du centre de gravité, méthode des hauteurs pondérées et celle des hauteurs pondérées modifiés. La méthode la plus fréquemment utilisée reste celle des centres de gravité [80, 81, 52].

IV.5 Application de la commande par la logique floue à la MADA [52]

Pour appliquer cette commande à notre système, on a utilisé la même structure de commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance présentée dans le chapitre précédent avec un changement des régulateurs PI par des régulateurs flous de mêmes types (régulateur de type Mamdani à sept classes), qui possèdent les mêmes fonctions d'appartenances. La différence réside dans les gains de normalisation (facteurs d'échelles). Le mode de fonctionnement est le même que celui des contrôleurs de courants.

L'objectif de notre travail est d'appliquer cette commande pour contrôler en permanence et indépendamment les puissances actives et réactive générées par la machine asynchrone à flux orienté. Les hypothèses de simulation ont été effectuées sous les mêmes conditions, et avec les mêmes profils dans le but de voir les nouvelles qualités de poursuite et de régulation ainsi que la robustesse de la commande.

- ✓ Pour la boucle de courant, les variables d'entrées sont :

L'erreur de courant

$$e_I = I_{rq}^{ref} - I_{rq} \quad \text{IV.17}$$

La variation de l'erreur de courant

$$\Delta_{eI} = e_I(k) - e_I(k-1) \quad \text{IV.18}$$

Le schéma bloc de la commande avec les régulateurs flous est illustré par la figure ci-dessous :

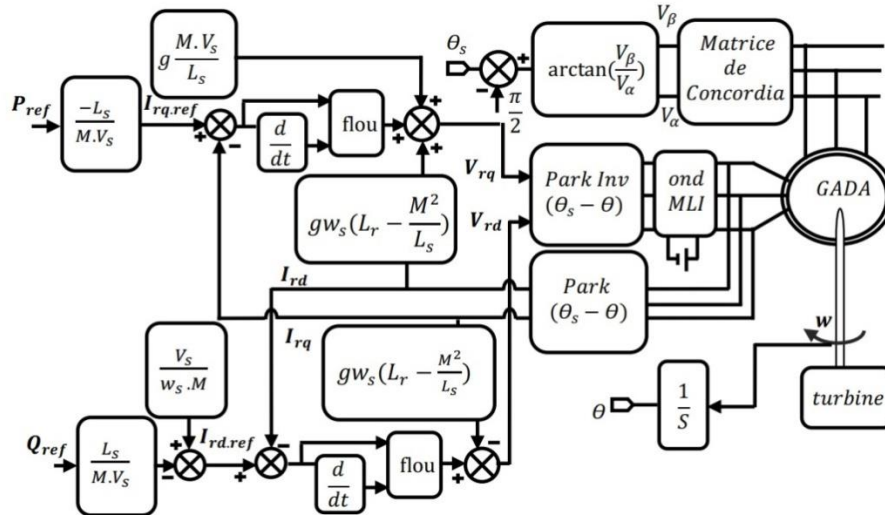


Figure IV.9 : Schéma bloc de la structure de commande flou.

IV.5.1 Comportement du système

Considérons la réponse typique d'un système du deuxième ordre ou plus, lors de l'application d'un échelon de puissance, illustrée par la figure (V.10)

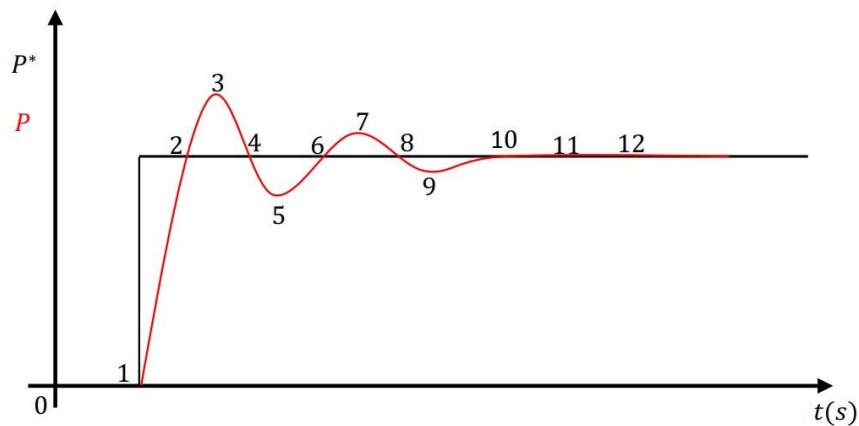


Figure IV.10 : Réponse typique d'un système à un échelon de puissance.

En repérant les points d'intersection entre le signal de consigne et la réponse, ainsi que les points où celle-ci est maximale ou minimale, on peut déduire les actions appropriées que doit imposer le contrôleur pour obtenir le minimum de dépassement et un régime transitoire le plus faible possible. De manière analogue, en observant l'erreur du courant ainsi que la variation de cette erreur, notées respectivement e et Δe , on peut obtenir des déductions identiques pour les variations de la sortie ΔU que le contrôleur doit faire suivre au système à l'aide de la trajectoire dans le plan de phase ($e, \Delta e$)

IV.5.2 Structure de base d'un contrôleur flou de courant

La majorité des contrôleurs flous pour les systèmes mono variables simples se composent des entrées du contrôleur flou qui sont généralement l'erreur (la différence entre la consigne et la sortie du processus) et sa variation (traduction de la dynamique de système). La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par Mamdani, comme le montre la figure suivante :

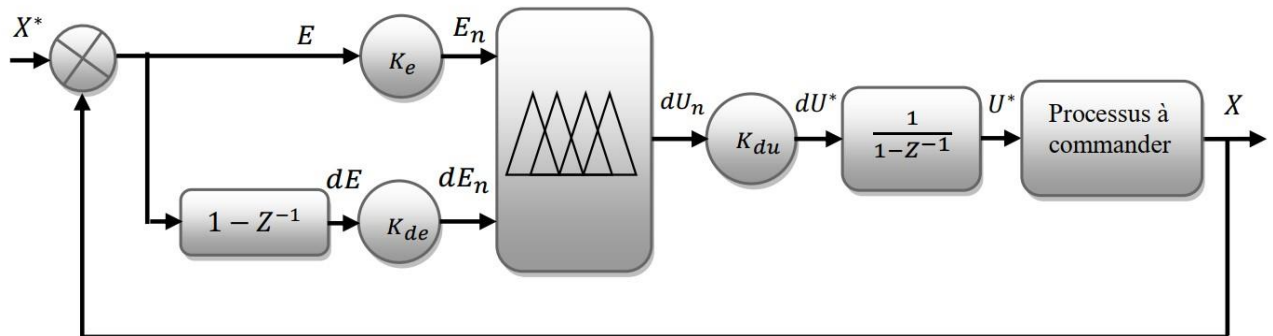


Figure IV.11 : Schéma bloc de la structure du contrôleur du type PI-flou.

D'après le schéma ci-dessus, le système de régulation floue (contrôleur flou) se compose essentiellement [81, 82] :

- D'un bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps.
- Des facteurs d'échelle (k_e , k_{de} , etk_{du}): qui sont des gains de normalisation et de dé-normalisation. Le choix adéquat de ces derniers permet de garantir la stabilité et l'amélioration des performances dynamiques et statiques ciblées du système à régler, de plus, les gains d'entrées (k_e , k_{de}) réduisent les grandeurs physiques d'entrées dans une plage de variation appelée univers de discours.
- D'un bloc de Fuzzification de l'erreur et de sa variation. Pour le choix de la forme des fonctions d'appartenance, nous avons opté pour les formes triangulaires et trapézoïdales comme indiquée sur les figures (IV-8). Le choix des variables linguistiques sont représentées par : Négatif grand noté **NG** ; Moyen Négatif noté **NM** ; Négatif petit noté **NP** ; Environ de zéro noté **EZ** ; Positif petit noté **PP** ; Positif Moyen noté **PM** ; Positif grand noté **PG**.
- D'un bloc de défuzzification de la variation de la commande. Les sorties du mécanisme d'inférence qui sont des variables floues doivent être reconverties en des grandeurs réelles de sorties pour que le système puisse les utiliser. Dans cette étape,

une valeur réelle de la variable de sortie est obtenue en employant la méthode du centre de gravité.

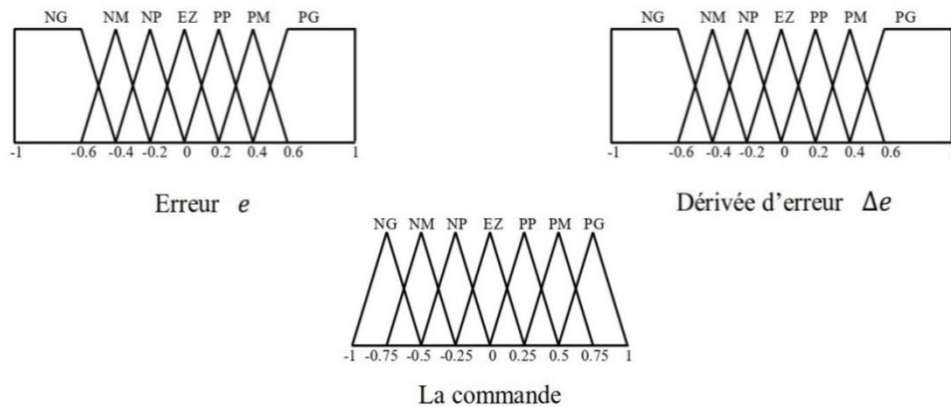


Figure IV.12 : Les fonctions d'appartenances utilisées par le contrôle

- Les règles d'inférences permettant de déterminer la variable de sortie pour le réglage descourants regroupés dans la table ci-dessous. La méthode d'inférence utilisée est la méthode « min-max » de Mamdani :
 - opérateur ET : formation du minimum, - opérateur OÙ : formation du maximum.
 - implication ALORS : formation du minimum, - agrégation : formation du maximum.

La commande		Erreur						
		NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
	NG	NG	NG	NG	NG	EZ	EZ	EZ
	NM	NG	NG	NM	NM	EZ	EZ	EZ
	NP	NG	NG	NP	NP	PP	PP	PM
	EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	NP	PP	PP	PG	PG
	PM	EZ	EZ	EZ	PM	PM	PG	PG
	PG	EZ	EZ	EZ	PG	PG	PG	PG

Tableau IV.2 : Table des règles de décision pour le contrôleur des puissances.

- D'un bloc intégrateur utilisé pour intégrer la variation de la commande numérique résultante et de son application au système que nous voulons commander.

IV.6. Résultats de simulation

Les figures ci-dessous montrent les performances par logique floue type des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

- Machine connectée au réseau et entraînée par une vitesse fixe 1440 *tr/min* avec un échelon négatif pour la puissance active ($P = -3000W$) entre les instants $t = 1,5s$ et $t = 2,5s$ et un échelon positif entre les instants $t = 3,5s$ et $t = 4,5s$ ($P = + 3000W$).

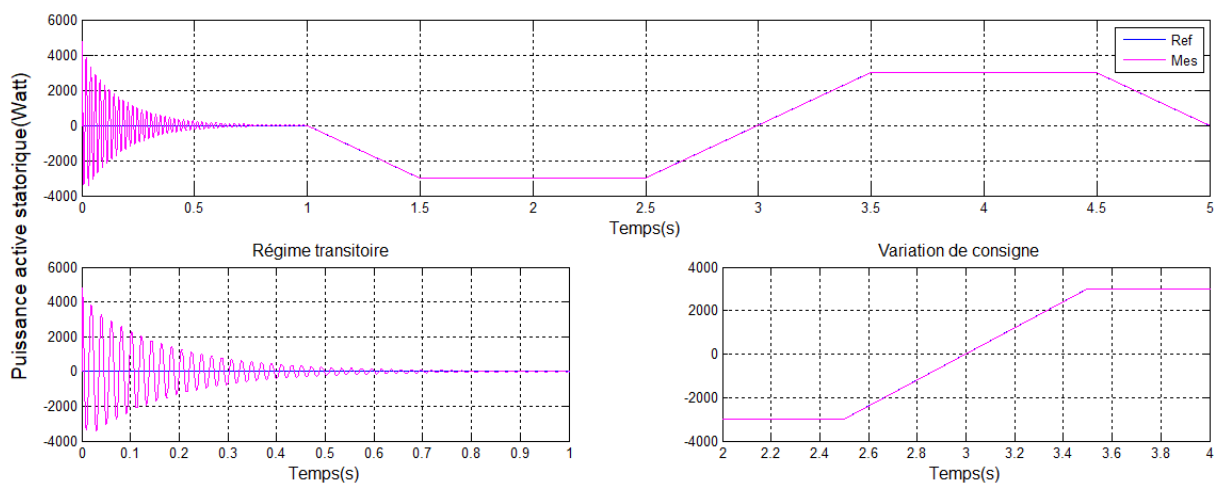


Figure IV.13 Puissance active statorique (flou type 1)

- Toujours la machine connectée au réseau et entraînée par une vitesse fixe 1440 *tr/min* avec un échelon positif pour la puissance réactive ($Q = +3000Var$) entre les instants $t = 1,5s$ et $t = 2,5s$ et un échelon négatif entre les instants $t = 3,5s$ et $t = 4,5s$ ($P = -3000Var$)

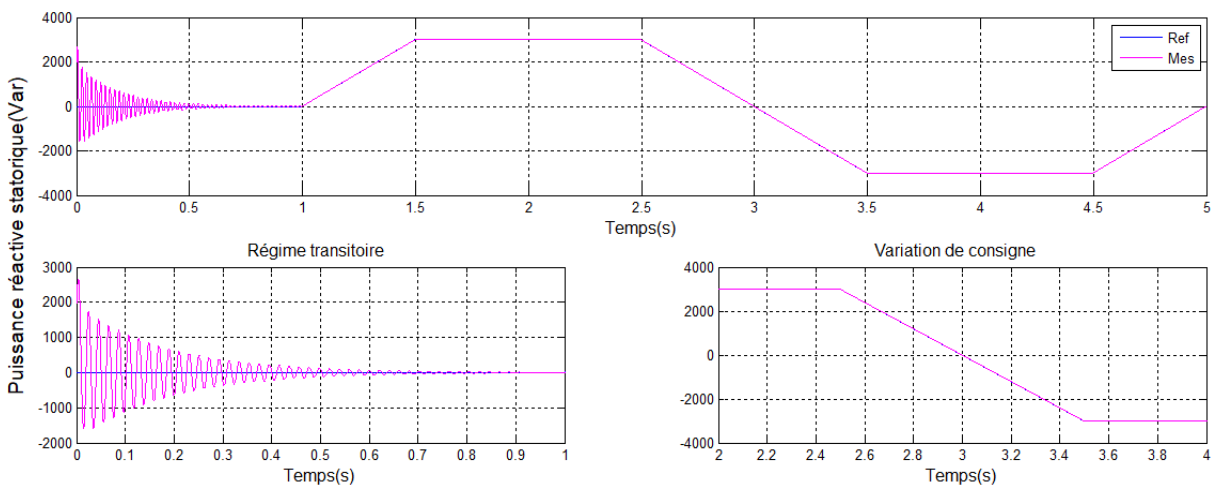


Figure IV.14 Puissance Réactive statorique (flou type 1)

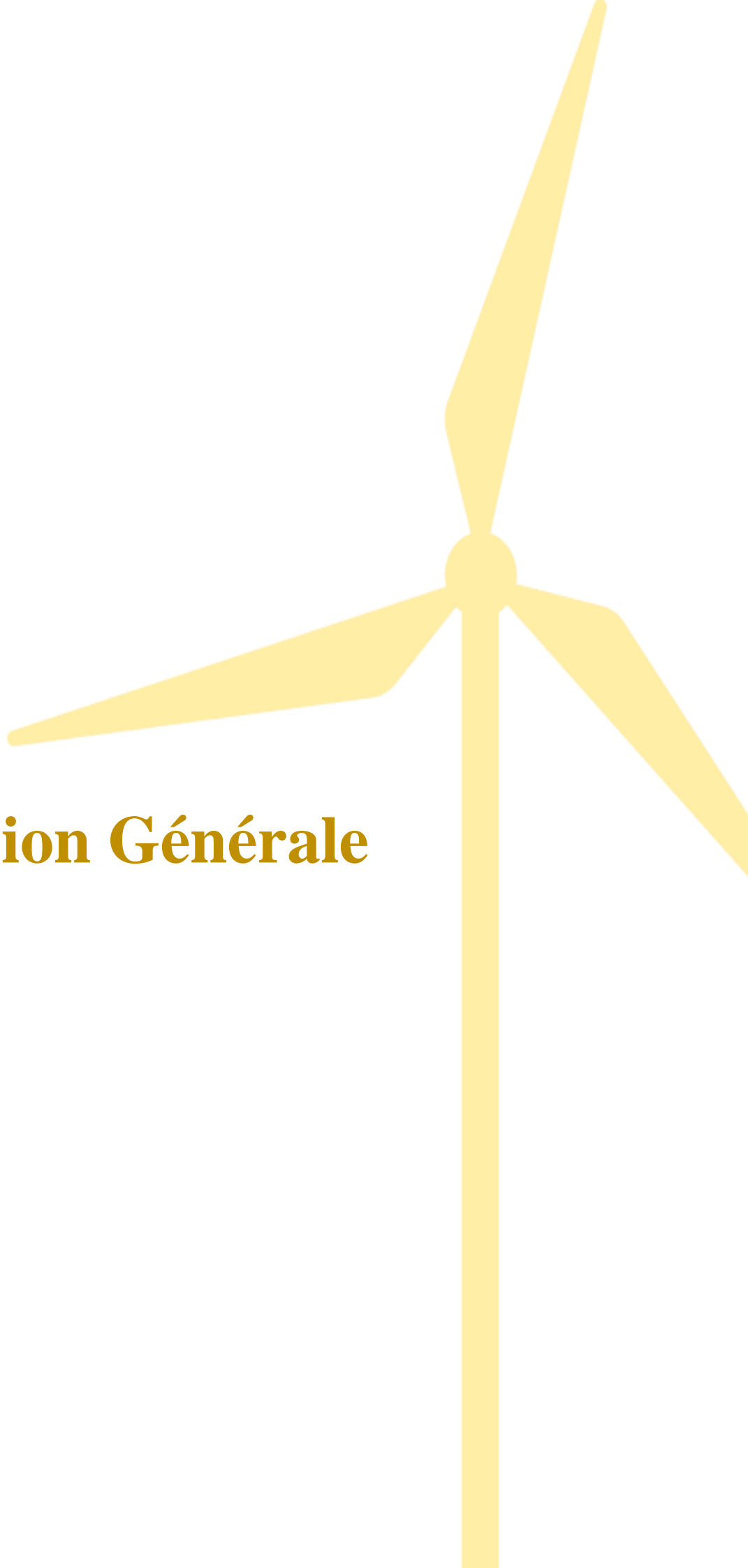
Interprétation des résultats

D'après les courbes des figures (IV.13 et IV.14) qui représentent les résultats de simulation, il est bien clair que la techniques de commande floue type 1 permettent un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique active et réactive. Les résultats obtenus par la simulation, montre clairement que l'utilisation de cette commande arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées, mais avec une amélioration remarquable des résultats obtenus par floue type 1 par rapport à la commande vectorielle à savoir : une réponse rapide pour le régime transitoire et pour le changement des consignes avec une minimisation maximale d'erreur entre les valeurs de consignes et celle mesurées (presque nulle), et une réduction importante des oscillations des puissances.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie de base de la logique floue où plusieurs points ont été traités: définitions, propriétés, types et relations des ensembles flous, structure d'un contrôleur flou, systèmes flous de intervalle et finalement nous avons donné une application commande des puissances par logique floue de La MADA. Les résultats de simulation montre que la commande par logique floue présente une bonne poursuite.

Conclusion Générale



Ce mémoire traite la commande et la simulation des puissances par la logique floue et vectoriel application à la machine asynchrone à double alimentation. C'est dans cet entendement qu'a été réalisé ce travail. En effet, l'objectif principal de ce mémoire est la réalisation de la commande des puissances par la logique floue.

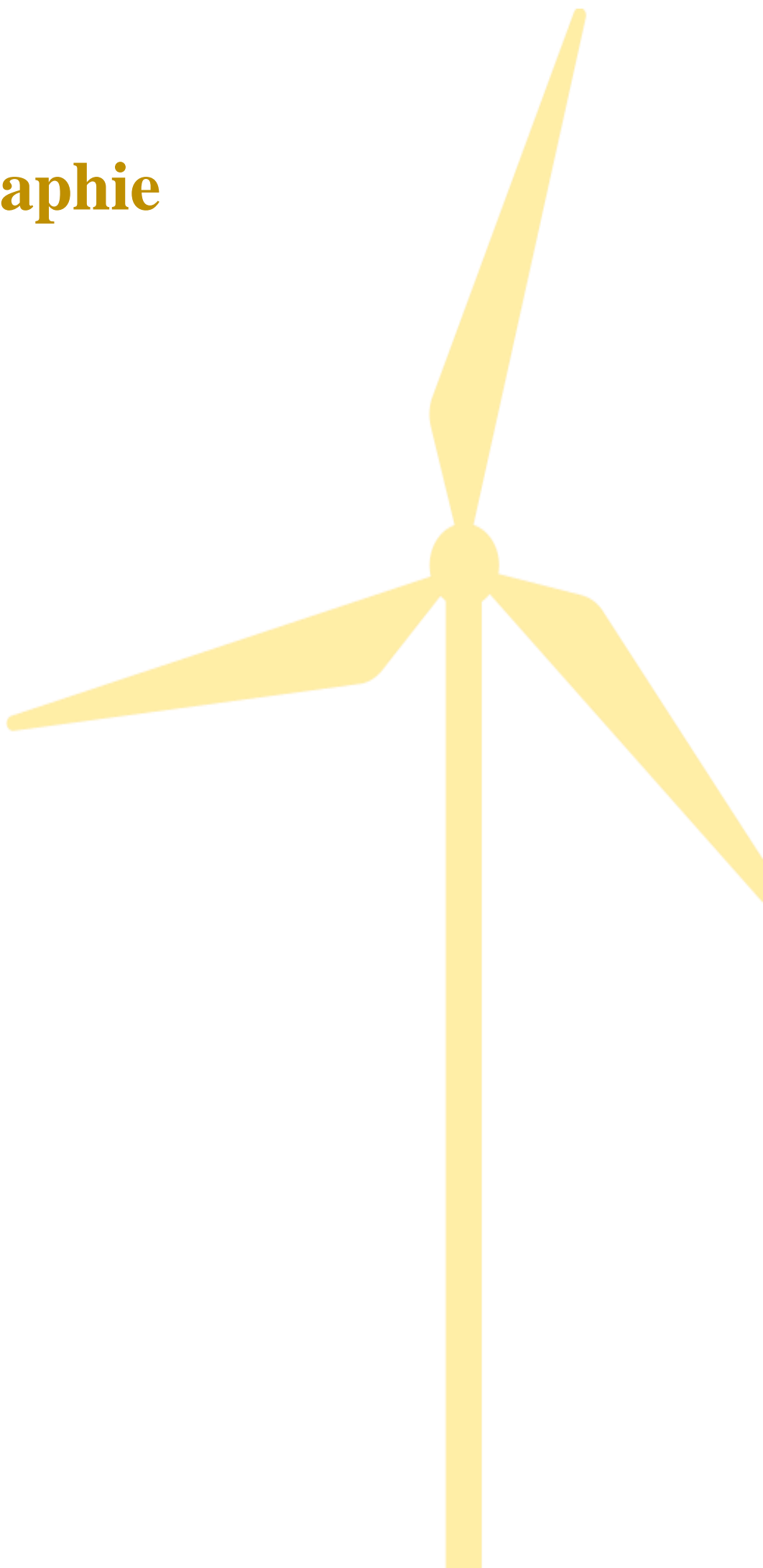
Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude générale de la chaîne de conversion éolienne, ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté l'étude et la modélisation de la MADA. En effet, la mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sur MATLAB/SIMULINK nous confirment la non linéarité du modèle de la MADA et le fort couplage qui existe entre les puissances active et réactive statoriques de cette dernière.

Ensuite, dans le troisième chapitre à savoir l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Qui permet de découpler le modèle de la MAD afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la MADA et le réseau. Une méthode a été envisagée : la commande indirecte à base des régulateurs PI.

Dans le quatrième chapitre de ce mémoire, à savoir la commande par la logique. Cette méthode ont permis de contourner le problème de la variation des paramètres du système et assurent une commande plus adaptée à ces changements paramétriques, en exploitant les connaissances de l'expert humain.

Bibliographie



- [1] Redjem Radia « Étude d'une Chaîne de Conversion d'Énergie Éolienne » Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine Faculté des Sciences de L'ingénieur Département d'Electrotechnique, 2009.
- [2] Khaled Ferkous «Étude d'une Chaîne de Conversion d'Énergie Éolienne» Mémoire de Magistère Université Mentouri Constantine, Faculté Des Sciences Exactes Département De Physique, 2009.
- [3] F. POITIERS «Étude 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, 2003.
- [4] J. Martain « Énergie éolienne » Technique de l'ingénieur Vol. B1360 1990, Rapport ECRIN, 2002.
- [5] Ch. Belfedal « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne étude et expérimentation» Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2007.
- [6] K. Idjdarene, « Contribution à l'étude et la commande de génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes » thèse de doctorat en cotutelle entre l'université A. Mira de Bejaia Algérie, et l'université de Lille1, France, 2010.
- [7] Hamecha Samira «Étude Et Commande D'une Éolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents» Mémoire de Magister Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'Électrotechnique 2013.
- [8] Brendan Fox et Coll «Énergie Éolienne et Intégration au Réseau»,2007.
- [9] Marc Rapin, Jean-Marc Noel «Énergie Éolienne (Principes Etude de Cas»,2010.
- [10] CherfiaNaïm « Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens » Mémoire de Magister Département d'Electrotechnique Université de Constantine, 2010.
- [11] Rajveer Mittal, K.S.Sandu, D.K.Jain «Battery Energy Storage System for Variable Speed Driven PMSG for Wind Energy Conversion System» International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol. 1, No. 3, August 2010, ISSN: 2010-0248

- [12] H. Camblong «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.
- [13] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey «A survey on variable-speed wind turbine system» Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.
- [14] Mayouf Messaoud « ETUDE COMPARATIVE DES ARCHITECTURES ET STRATEGIES DE France D'UN AEROGENERATEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS » Magister en Electrotechnique Université de Batna, 2014.
- [15] Mohammad S. Widyana «Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications» Thèse de doctorat Université de Berlin 2006, D83
- [16] Y. Chen, P. Pillay, A. Khan « PM Wind Generator Topologies » IEEE Transaction on industry application, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.
- [17] F. Sahin « Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine » Thèse de doctorat de l'Université d'Eindhoven, 2001.
- [18] 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, 19 Décembre 2003, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, n°. ED 0366-125.
- [19] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. Carlos Burgos « Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid » IEEE Transaction on energy conversion vol 21, n°, 1, Mars 2006.
- [20] Gabriel-Octavian Cimuca «Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateur éoliens » Thèse doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Lille France, N°ordre : 2005-27.
- [21] M. Adem « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse. Avril 2005.

- [22] Fatima Lounnas « contribution à la modélisation et à la commande d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double stator » thèse de doctorat en sciences en électrotechnique, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2021.
- [23] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson «Doubly-fed a.c. machines: classifications and comparison», 9th European Conference on Power Electronics and Applications – EPE 2001, Graz, Austria, August 2001.
- [24] T.H. Ortmeier and W.U. Borger «Control of Cascaded Doubly Fed Machines for Generator Applications», IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-103, N° 9, Sep. 1984, pp. 2564–2571.
- [25] ToualBelkacem« Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice»
- [26] R. Ramakumar, A. Naeter, «Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas», Power Engineering Society General Meeting IEEE, 6-12 June 2004, Vol.2, PP. 2103 – 2105.
- [27] L. Chang, «Systèmes de conversion de l'énergie éolienne», IEEE Canadian Review, Summer/Eté 2002, PP. 1-5.
- [28] 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.
- [29] SATHYAJITH, Mathew. Wind energy: Fundamentals, resource analysis and economics. Springer Science & Business Media, 2006.
- [31] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi «Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640
- [32] <https://docplayer.fr/69179534-Etude-comparative-entre-eolienne-a-axe-horizontal-et-eolienne-a-axe-vertical.html>.2014
- [33] [https://www.ecosources.info/dossiers/ Eolienne_verticale_Darrieus.2009](https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus.2009)
- [34] <https://notech.franceserv.com/eoliennes.html>.2017
- [35] KhalfouniHayet, Seddiki Ferroudja «Etude et simulation d'une installation éolienne», Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [36] <https://www.natura-sciences.com/s-adapter/la-france-se-met-a-loffshore.html> 2022.

- [37] https://www.abcbourse.com/marches/en-espagne-l-eolien-porte-par-des-vents-favorables_562034 2022.
- [38] GLOBAL WIND REPORT 2022
- [39] G. Salloum « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Mars 2007.
- [40] S. Khojet El Khil « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Décembre 2006.
- [41] A. Chaiba « Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension » Thèse de magister de l'université de Batna, 2004.
- [42] R. Abdessamed, M. Kadjoudj « Modélisation des machines électriques » presses de l'université de Batna, 1997.
- [43] S. Drid « Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie & Expérimentation » Thèse de doctorat de l'université de Batna, Novembre 2005.
- [44] S. Drid, M.S. Nait-Said and M. Tadjine « Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Based on the Feedback Linearization Approach » First International Conference on Electrical Systems PCSE'05 May 9-11 2005, Electrical Engineering Institute, Oum El Bouaghi University, Algeria.
- [45] Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [46] F. Poitiers « Étude 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 de l'université de Nantes, 2003.
- [47] A. Boyette « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy, Décembre 2006.
- [48] Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.

- [49] P. E. Vidal « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat, Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [50] G. Salloum « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Mars 2007.
- [51] A. L. Nemmour « Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation » Thèse de magister de l'université de Batna, 2002.
- [52] R. Rouabih «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitessevariable basé sur une machine asynchrone double alimentée» Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2016.
- [53] Tir Zoheir «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade»mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [54] Z. Laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque – éolien horsréseau » Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, 2010
- [55] S. Belakehal «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables» Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010
- [56] Metatla Samir «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA» mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.
- [57] Maghsel S «contribution à l'amélioration et la commande d'une turbine éolienne» mémoire de magistère, UNIV du 20 aout 1995 –Skikda, 2012.
- [58] S.EL-Aimani« Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseade Moyenne Tension » Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centralede Lille (ECL), 2005.
- [59] R.Abdessamad, M.Kadjoudj « Modélisation des machines électriques » Presse de l'université deBatna, Algérie, 1987
- [60]. M.Pinard« Commande Electronique des Moteurs Electriques » DUNOD, Série EEA, 2004.

- [61] S.EL-Aimani « Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseauté Moyenne Tension » Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique.EcoleCentralede Lille (ECL), 2005.
- [62]D.Kairous « *Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien à Machine Asynchrone à Double Alimentation* ». Thèse doctorat, l'Université d'Oran, Algérie 2013.
- [63] D. Hadiouche « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 20 décembre 2001.
- [64] S.Abeddaim, A.Betka, S Drid, M Becherif, « Implementation of MRAC controller of a DFIG basedvariable speed grid connected wind turbine ». *Energy Convers Manage.* 79 (2014), pp. 281–288.
- [65]Mokrane Smaili «Modélisation Et Commande D'un Aérogénérateur à Machine Asynchrone à Double Alimentation En Vue De Simulation Des Problèmes De Cogénération » Mémoire de Ingénierie Université du Québec En Abitibi-Témiscamingue, 2013.
- [66] ChafikDass, Ali ben Bouali« commande vectorielle d'une machine asynchrone » Mémoire d'ingénieur école militaire polytechnique UER électrotechnique, 1999.
- [67] C.Naim «Etude d'une chaine de conversion de l'énergie Eolienne» thèse doctorat université des frères Mentouri de Constantine ,2018.
- [68]S.Metatla «optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA» Ecole nationale supérieure polytechnique ,2009.
- [69]k.Hamouda «modélisation et commande vectoriel d'un système éolien base sur un générateur asynchrone a doublé alimentation» mémoire de master en physique énergétique, université d'Adrar ,2013.
- [70] F.Chevrie, F.Guely « cahier technique n= 191 : la logique floue » groupe Schneider, 1998.
- [71] N. Meziani, G. Challal « Commande par la logique floue d'une machine asynchrone » Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2014.
- [72] B. Kosko, Neural Network, Fwzy Systems «A Dynamical System Approach tc Machine Intelligence» Prentice-Hall, Englewood Cliffs N J, 1991.

- [73] C. MINH « commande numérique de machines asynchrones par logique floue » Université Laval.
- [74] G.Ciccarela, M.Dila Mora, A.Germani «A Luenberger-Like observer For Nonlinear systems» Int.J.Control, vol.57 n.3, 1993.
- [75] Chekima Djamel «Commande d'un Moteur Asynchrone par Logique Floue» Mémoire de Master, Université d'EL-Oued, 2014.
- [76] S. Mokeddem « Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base D'Algorithmes Génétiques» Thèse Doctorat, Universitéferhatabbas de setif, 2010.
- [77] N.Talbi «Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Non linéaires» Thèse de doctorat, Uni de Constantine 2014.
- [78] H. Ouakka «Contribution à l'Identification et la Commande Floue d'une Classe de Systèmes Non Linéaires» Université Sidé Mohamed Ben Abdullah. 2009.
- [79] A. El Ougli «Intégration des techniques floues à la synthèse de contrôleurs adaptatifs» Université Sidé Mohamed Ben Abdullah. 2009.
- [80]NaouelHamdi «Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes » Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 2008.
- [81]LatrecheMohammedTahar«CommandeFloue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) Utilisée dans un Système Eolien» Mémoire deMagister Université FerhatAbbas de Sétif Département d'Electrotechnique, 2012.
- [82]R. Ketata « Méthodologie de régulation numérique incluant, la logique floue» Thèse deDoctorat de l'I.N.S.A de Toulouse, Juillet 1992.
- [83] H.Bennani, «Machine asynchrone a double alimentation(les lois de commande en régime permanent) », Mémoire M.Sc, Canada, 2011.
- [84] H.Abdelhakim, «Commande Adaptative floue type -2 d'un bras Manipulateur», mémoire de magistère en électronique option robotique, université de Batna ,2012.

ANNEXE

Les paramètres de la machine

```
%Rs=0.012; Rr=0.021; Ls=0.0137; Lr=0.0137; M=0.135; p=2; J=0; f=0;
```

```
Rs=1.2; Rr=1.8; Ls=0.1554; Lr=0.1568; M=0.15; p=2; J=0.2; f=0.001;
```

```
ws = 2*50*pi;
```

```
wm = (1440*pi*p)/30;
```

```
wr = (ws-wm);
```

```
%Rs=4.85; Rr=3.805; Ls=0.274 ;Lr=0.274;f=0.008;p=2;J=0.031;M=0.258;
```

```
%Rs=1.75; Rr=1.68; Ls=0.295 ;Lr=0.104;f=0.0027;p=2;J=0.01;M=0.165;
```

```
%***** les constantes de temps *****
```

```
Ts = Ls/Rs;
```

```
Tr = Lr/Rr;
```

```
sigma = 1-((M*M)/(Ls*Lr));
```

```
Rt = Rs+((M*M)/(Lr*Tr));
```

```
b = ((1/Tr)+((M*M)/(Ls*Lr*Ts)))/sigma;
```

```
%***** les matrices de la représentation *****
```

```
a = M/(sigma*Ls*Lr);
```

```
A1 = [-1/Ts 0 M/Ts 0;
```

```
0 -1/Ts 0 M/Ts;
```

```
a/Ts 0 -b 0;
```

```
0 a/Ts 0 -b];
```

```
A2 = [0 1 0 0;
```

```
-1 0 0 0;
```

```
0 -a 0 0;
```

```
a 0 0 0];
```

```
A3 = [0 0 0 0;
```

```
0 0 0 0;
```

```
0 a 0 1;
```

```
- a 0 -1 0];
```

```
B = [1 0 0 0;
```

```
0 1 0 0;
```

```
-a 0 1/(sigma*Lr) 0;
```

```
0 -a 0 1/(sigma*Lr)];
```

```
%*****REGULATION*****
```

```
%k=(Lr*Tr)/(((Rs*Lr*Tr)+(M*M)));
```

```
k=((1)/(Rr));
```

```
Vs=220*sqrt(2);
```

```
tau=(sigma*Ls*k);
```

```
eps=3.75;
```

```
w=224;
```

```
%eps=30;
% w=28;
%eps=15;
% w=56;
% crrecteur de courant Irq Ird;

% tr=0.0032; kii=((3)/tr*k; kpi=((3*tau)/(tr*k));
% tr=0.0095; kii=((3*Rr)/(tr));kpi=((3*Lr*sigma)/(tr));
kii=((w^2)*Lr*sigma)
kpi=((2*w*eps*Lr*sigma)-Rr)

V1=70000; V2=60000;
% V1=38500; V2=42500;
```

Résumé:

Ce mémoire présente la commande par la logique floue application à la machine asynchrone à double alimentation (MADA), Donc dans ce travail, on s'intéresse particulièrement à l'application de la commande vectorielle et la commande par la logique floue à la MADA. Les résultats de simulation par Matlab seront présentés, ils ont montrés l'efficacité du régulateur flou type-2 para port les autres commandes.

Mots clés : Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) – Commande vectorielle Logique floue.

Abstract:

This paper presents a power control of the doubly fed induction machine (DFIM), we are particularly interested in the application of indirect vector control and the fuzzy logic controller of DFIM, The simulation results will be presented by Matlab , they have shown the effectiveness of the fuzzy controller Type -2.

Key words: Doubly Fed Induction Machine (DFIM) - Control by Field Oriented - Fuzzy logic.

ملخص:

تقدم هذه الأطروحة دراسة التحكم الغامض المطبق على الآلة الغير متزامنة ذات التغذية المزدوجة. لذلك في هذا العمل قمنا بتطبيق التحكم الاشعاع الغير مباشر و التحكم الغامض. وبعد الدراسة والمحاكاة بواسطة Matlab اظهرت النتائج فعالية التحكم الغامض بالنسبة لباقي التقنيات الاخرى.

كلمات مفتاحية: ماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية - تقنية التدفق الموجه - المنطق الغامض .

تمت بحمد الله