

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESAUX ELECTRIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : MAHROUG RIDHA

DAHMANI AZZEDDINE

Intitulé

**Commande des puissances active et réactive
générée par une génératrice asynchrone a
double alimentation «GADA»**

Soutenu devant le jury composé de :

BELOUNIS Ouassila	Université M'sila	Président
BARRABEH FOUAD	Université M'sila	Encadreur
ROUABHI Riyadh	Université M'sila	Co-Encadreur
BENYOUNES	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018/2019

Remerciement

Avant tout nous remercions الله, le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'études.

Mes sincères remerciements à tous les enseignants de L'université de M'sila notamment à nos encadreur **Mr. Fouad Berrabah** Professeur à l'Université de M'sila et chef de département de génie électrique.

Par ailleurs, nous remercions vivement **Mr. Riyadh Rouabhi** professeur à l'Université de M'sila pour l'orientation et l'assistance.

Ensuite nous remercions les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de nos travaux :

- Madame : **BELOUNIS .O.** (président).
- Monsieur : **BENYOUNES.** (Examineur).

Enfin, merci également à tous les collègues et tous les amis.

,

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	I
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	01
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE	
1 INTRODUCTION	03
2 HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	03
3 DESCRIPTIF ET QUALITES DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	08
3.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	08
3.2 PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE.....	09
4 LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES.....	10
4.1 EOLIENNES A AXE VERTICAL	10
4.2 EOLIENNES A AXE HORIZONTAL	11
5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	12
6. LA PUISSANCE EOLIENNE DANS LE MONDE	14
7. ETAT DE L'ART SUR LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE.....	15
7.1 SYSTEMES UTILISANT LA MACHINE ASYNCHRONE	15
I.7.1.1 MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL	15
I.7.1.2 MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE STATOR	17
I.7.1.3 MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION TYPE "ROTOR BOBINE"	18
I.7.1.4 MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION TYPE "BRUSHLESS" ...	22
I.5 CONCLUSION.....	23
CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION	
1 INTRODUCTION	24
2 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION.	25
2.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES.....	25
2.2 EQUATIONS MATHEMATiques DE LA MADA DANS LE REPERE (<i>a, b, c</i>)	25
2.2.1 EQUATIONS ELECTRIQUES	26
2.2.2 EQUATIONS MAGNETIQUES	27
2.2.3 EQUATION MECANIQUE	28
2.3 CHANGEMENT DE REPERE	28

Sommaire

2.3.1	LA TRANSFORMATION DE PARK.....	28
2.3.2	EQUATIONS MATHEMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (d, q)	29
2.3.3	EQUATIONS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES DANS LE SYSTEME D'AXES (D, Q)	30
2.3.4	EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE.....	31
2.4	MODELE D'ETAT DE LA MADA.....	32
2.5	BLOC DE SIMULATION DE LA MADA	33
2.6	RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME.....	33
2.6.1	FONCTIONNEMENT MOTEUR.....	34
2.6.2	FONCTIONNEMENT GENERATEUR.....	35
2.7	SYNTHESE ET MODELISATION DE L'ALIMENTATION DE LA MADA.....	38
2.7.1	MODELISATION DE LA REDRESSEUSE TRIPHASEE DOUBLE ALTERNANCE A DIODES.....	38
2.7.2	MODELISATION DU CIRCUIT DE FILTRAGE	40
2.7.3	MODELISATION DE L'ONDULEUR.....	41
2.7.4	STRATEGIES MLI TRIANGULO-SINUSOÏDALE.....	44
3.	CONCLUSION.....	46

Chapitre III: COMMANDE VECTORIELLE DU PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE

1.	Introduction.....	47
2.	COMMANDE VECTORIELLE.....	48
3.	PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE	49
3.1	DIFFERENTS REPERES DE REFERENCE	50
4.	MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE.....	52
4.1	RELATIONS ENTRE LES COURANTS STATORIQUES ET ROTORIQUES	53
4.2	RELATIONS ENTRE LES PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS	53
4.3	RELATIONS ENTRE LES TENSIONS ET COURANTS ROTORIQUES	54
4.4	ETABLISSEMENT DES ANGLES NECESSAIRES AUX TRANSFORMATIONS	55
4.5	TYPE DE REGULATEURS UTILISES	56
5.	LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE LA COMMANDE VECTORIELLE	56
5.1	COMMANDE DIRECTE.....	56
5.2	COMMANDE INDIRECTE.....	57
5.3	COMMANDE INDIRECTE SANS BOUCLE DE PUISSANCE.....	57
5.4	COMMANDE INDIRECTE AVEC BOUCLE DE PUISSANCE	58
6.	MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION GADA.	59

Sommaire

7.	RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE....	61
7.1	INTERPRETATION DES RESULTATS	62
I.5	CONCLUSION.....	63
Chapitre IV : COMMANDE PAR LOGIQUE FLOU ACTIVE ET REACTIVE GENERER		
1.	Introduction.....	64
2.	HISTORIQUE DE LA LOGIQUE FLOUE.....	64
3.	COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE	65
4.	NOTIONS DE BASE DE LA LOGIQUE FLOUE	65
4.1	ENSEMBLES FLOUS	65
4.2	FONCTIONS D'APPARTENANCES	66
4.3	CARACTERISTIQUES D'UN SOUS ENSEMBLE FLOU	67
5.	STRUCTURE D'UNE COMMANDE A LOGIQUE FLOUE	69
5.1	FUZZIFICATION	70
5.2	BASE DE REGLES..	70
5.3	MECANISME D'INFERENCE FLOUE	71
5.4	DEFUZZIFICATION.....	72
6.	APPLICATION DE LA COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE A LA MADA.	72
7.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA COMMANDE FLOUE	73
7.1	AVANTAGES	73
7.2	INCONVENIENTS	73
8.	DESCRIPTION DU CONTROLEUR FLOU DE PUISSANCE.....	74
9.	RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE	76
10.	CONCLUSION.....	77
	CONCLUSION GENERALE	78
	BIBLIOGRAPHIE.....	79

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Depuis l'aube de l'humanité, la production de l'énergie était basée en une grande partie sur les combustibles comme le bois, les fossiles (charbon, pétrole, gaz...), puis l'uranium. Mais le grand problème accompagnant l'utilisation de ces matières est l'émission de gaz et les dégagements massifs de composés divers ; ce qui déséquilibre notre planète et pousse vers un cycle ouvert non renouvelable [TAR 15].

L'énergie éolienne est parmi les énergies renouvelables ayant connues la plus forte expansion lors de la dernière décennie grâce aux avantages qu'elle apporte. Cette source est apparue non pas pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme une énergie complémentaire aux énergies traditionnelles [FAR 14, Han 12, HAC 12, ROU 16].

PROBLEMATIQUE

L'importance de la production d'énergie éolienne actuellement, a amené les spécialistes de ce domaine de faire appel à des recherches approfondies et précieuses en vue de développer l'efficacité de ces systèmes pour avoir un meilleur transfert d'énergie et une bonne qualité de l'énergie produite par l'utilisation d'un architecteur optimal pour le système, et des techniques de commandes appropriées pour qu'ils soient capables de rattraper la conséquence des perturbations paramétriques et extérieures du système.

En effet, le travail sera consacré sur l'étude d'un système de conversion d'énergie éolienne qui se base sur une machine asynchrone double alimentation (MADA), et où la configuration du système, le type de convertisseur ainsi que la technique de commande adaptée seront considérés.

OBJECTIF DE LA MEMOIRE

L'objectif de notre travail est de présenter :

- Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans un fonctionnement moteur ou génératrice.
- Modélisation des deux convertisseurs qui raccordent le rotor de la machine (MADA) au réseau.
- Synthèse d'une loi de commande vectorielle à base de régulateurs PI appliquée au convertisseur côté rotor pour contrôler les puissances active et réactive générées par le stator de la MADA aux valeurs désirées.

Introduction générale

STRUCTURE DE LA MEMOIRE

Ce travail qui comprend quatre chapitres, est organisé de la manière suivante.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur le système de conversion d'énergie éolienne (Historique de l'énergie éolienne, descriptif et qualités de l'énergie éolienne et les différents types des éoliennes ainsi que ses Avantages et ses inconvénients...).ensuite, nous présentons les différentes configurations d'alimentation de la machine que ce soit pour des applications moteur ou génératrice. La configuration où le stator est alimenté par le réseau et le rotor alimenté par un onduleur, sera retenue dans la suite de l'étude. En plus, une classification des différents types de cette machine seront présentées.

Le second chapitre, est consacré au modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation et son convertisseur, on présente les résultats de simulation pour fonctionnement comme moteur et génératrice.

Dans le troisième chapitre ; nous présenterons un algorithme de commande appeler la commande vectorielle aux moyens des régulateurs PI basée sur l'orientation du flux statorique pour linéariser le modèle de la machine et découpler le contrôle des puissances générées. Cette commande permettra de contrôler indépendamment les puissances actives et réactives générées.

Au quatrième chapitre nous présentons un autre technique de commande qui se n'appelle la commande par la logique floue basée sur des régulateurs flous afin d'améliorer les qualités de poursuite et d'assurer la robustesse du système alors garder instantanément un bon rendement et un découplage parfait du contrôle entre les puissances générées par la MADA. Les performances de cette technique de commande seront justifiées par des résultats obtenus par simulation.

En fin, le travail sera clôturé par une conclusion générale, ainsi que par des suggestions et quelques perspectives pour les travaux de recherches futurs dans ce domaine.

CHAPITER I :
Généralité sur le
systeme de conversion
d'énergie éolienne

1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes [PAU 04, AKK 10, DEN 10, AGG, [LIN].

Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens [ARE 05, ELB09, SEJ 06].

2. Historique de l'énergie éolienne.

Le vent a été identifié comme une source d'énergie utile autour de cinq mille ans, quand il fut capturé par les voiles et utilisé pour propulser les bateaux en Égypte.

L'énergie du vent a été transformée en énergie mécanique afin de propulser des navires (3000 ans av. J.-C.), d'entraîner divers types de moulins à céréales et à huile ou encore des pompes à eau au Moyen Age [MUL 02]. Il existe beaucoup d'incertitudes par rapport aux origines des moulins et des turbines entraînées par le vent dans diverses civilisations (Égypte, Grèce, Empire Romain, etc.). Par contre, des preuves irréfutables confirment leur existence dès 644 ap. J.-C. [HAU 06]. Leurs premières traces ont été relevées en Perse où elles présentaient un axe de rotation vertical [HAU 06] [HEI 06] [MAN 02]. Comme exemple sur les premiers turbines utilisés, celle de Figure.1.1. Elle montre un principe simple d'utilisation dans les bateaux à voile en Perse [KAI 13].

Ce n'est qu'après les développements de la technologie électrique, à la fin du 19^{ème} siècle, que les éoliennes ont été considérées pour la production d'énergie électrique. Ces nouveaux systèmes sont alors appelés "aérogénérateurs".

Aux États-Unis, la première centrale électrique éolienne a été inventée en 1888 par Charles F. Brush dans l'Ohio (États-Unis). Le système (Figure I.2.a) avait un diamètre de rotor de 17m, et a généré 12 kW. La machine a travaillé pendant 20 ans et était même dotée d'un système de contrôle complet électrique, basé sur les solénoïdes standard qui a continué à exister pendant un siècle.

En 1891, Poul La Cour (au Danemark) conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et mène des recherches en soufflerie. Il découvre que des turbines à rotation rapide composées d'un nombre moins grand de pales génèrent davantage d'électricité que des turbines plus lentes composées de nombreuses pales. Il met au point les premières éoliennes (Figure I.2b) conçues à partir des principes modernes de l'aérodynamique. D'une puissance 25 kW grâce à des rotors à quatre pales, elles affichent une plus grande efficacité.

L'énergie hydraulique, qui est aussi renouvelable, s'est beaucoup plus développée par la suite en raison de ses facilités de stockage spécifiques [Mul.02]. Elle est ainsi restée toujours dominante et les aérogénérateurs ne se sont développés que dans le cadre de recherches ou dans des niches d'application bien spécifiques en petites séries. On peut citer, par exemple, l'éolienne bipale de 20 m de diamètre, commercialisé par la compagnie CEM (dans les années 1920) en France.

Aux États-Unis d'Amérique (EUA), en 1930, des centaines de milliers de petites turbines étaient utilisés pour l'alimentation des fermes, à l'époque leur utilisation étant de charger des batteries. Elles ont aussi servi pour l'alimentation des équipements de puissance dans des domaines de communication [KAI 13].

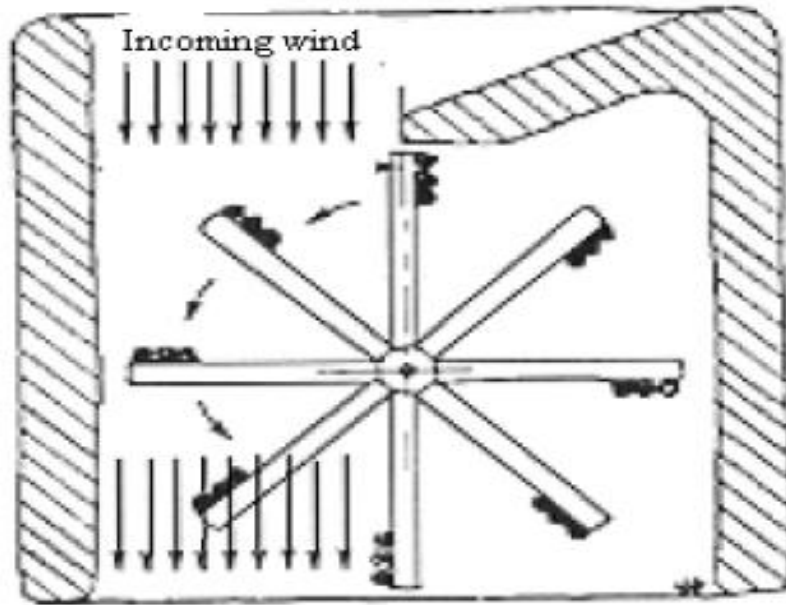
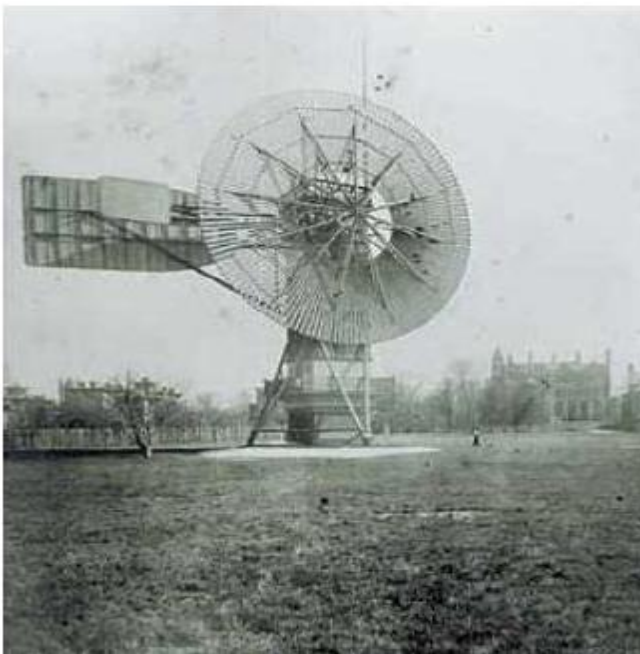


Figure.I.1 - Utilisation de turbine en Perse dans le bateau à voile



-a-



-b-

Figure I.2 - Premières Turbines utilisées pour produire de l'électricité [Jor. 06].Éolienne de Charles F. Brush (à Gauche) Éolienne de Poul La Cour (à droite).

La première turbine conçue pour produire une quantité importante d'énergie a été inventée en Russie en 1931. Le ``Balaclava`` pouvait générer 100 kW, et a été exploitée dans la mer Caspienne pour environ deux ans.

En 1941, un éolien bipale a été construit par l'American Smith-Putman (Figure I.2) capable de générer 1.25MW, jusque quelque années précédentes, elle a été très ambitieux.

Après la deuxième guerre mondiale, le bas prix des dérivés du pétrole et du charbon ont fait en sorte que très peu d'intérêt s'est manifesté envers l'énergie éolienne [Hau.06]. Une petite relance du secteur éolien s'est produite à la fin des années 1960, quand la population occidentale a commencé à s'intéresser aux problèmes environnementaux liés au développement industriel [Man.02] (selon Manwell et al. les premiers mouvements écologistes sont nés grâce au livre intitulé "Silent Spring" de Rachel Carson en 1962).

Il est possible d'affirmer que c'est la crise pétrolière de 1974 qui a fortement relancé les recherches dans le domaine et le développement d'aérogénérateurs. Au début des années 80, un concept simple et robuste de turbine a émergé et est devenu très populaire dans l'industrie éolienne. Le concept simple et robuste comprend une turbine éolienne trois pales, une boîte de vitesses, une machine à induction directement relié à la grille et un système de contrôle.



Figure I.3 - Éolien de Smith-Putman [Jor.06]

De nombreux projets de recherche financés par le gouvernement des E.U.A. ont permis la réalisation des premiers grands aérogénérateurs expérimentaux (de 100kW à 3.2 MW au début des années 1980).

En Europe, et en particulier au Danemark, dès 1974, une commission d'experts danois a déclaré qu'il serait possible de générer 10 % de l'énergie électrique du pays à l'aide d'aérogénérateurs. C'est dans les années 1980 qu'on a pu enfin constater un essor significatif de la commercialisation d'aérogénérateurs.

Pendant cette dernière décennie, les Danois et les Allemands avaient leurs propres systèmes avancés, encouragés par les possibilités d'exploiter les vents forts au nord de l'Europe.

Les systèmes européennes préférés a été des éoliennes à axe horizontal (à trois ou deux pales). En effet, le Danemark est devenu le leader au niveau mondial, a créé un marché et a développé une énorme industrie d'exportation avec 90% de la fabrication vendus à l'étranger. En Allemagne, récemment, RE power a introduit une turbine de 5 MW avec 61,5 mètres de hauteur (Figure I.3). Pour les prochaines années, l'énergie éolienne peut assurer 28,5% de la consommation totale de l'union wuropéenne jusqu'en 2030 selon l'estimation du Conseil Européen de l'Énergie Renouvelable.



Figure I.4 - l'éolien de 5MW (REpower)

3. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.

3.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme 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 (Fig. 1.5) [01].

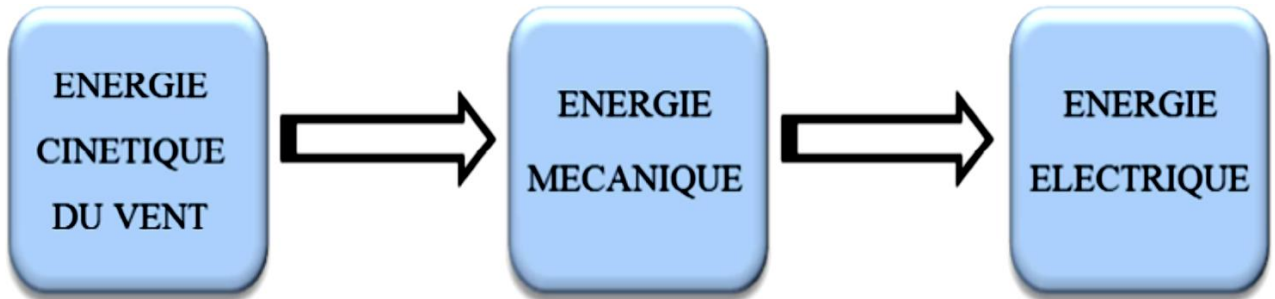


Fig. I.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent .

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. I.6 [04].

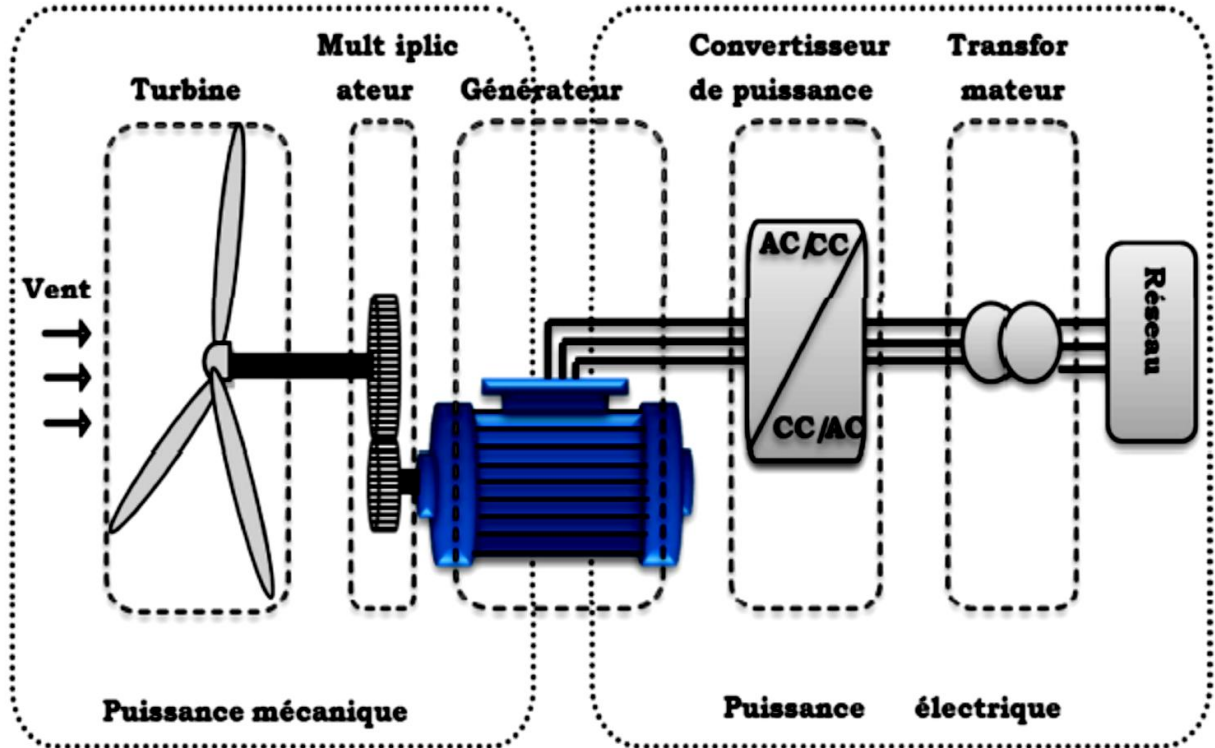


Fig.I.6: Principaux organes du système de conversion éolien [04].

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). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [POI].

3.2 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

✓ Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

✓ La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

✓ Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [WWE 10].

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de

fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

4. Les différents types d'éoliennes

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

4.1 Eoliennes à axe vertical:

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [LEC] :

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble.

L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le Couple moteur (Figure I-7a) [FRE 03].

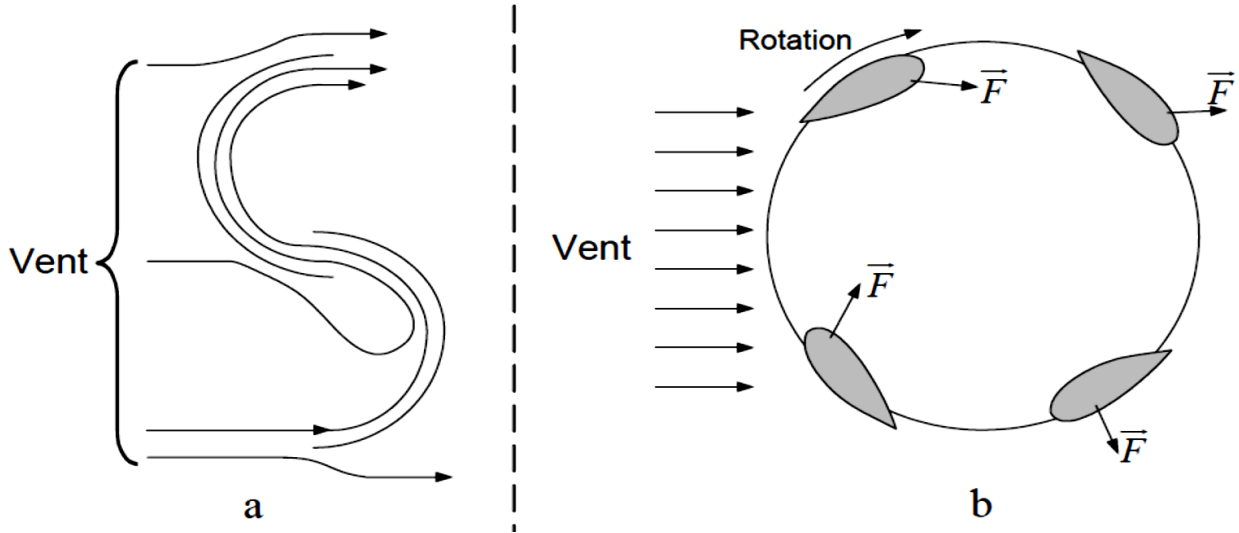


Figure I-7 : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30).

Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I-7) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même.

Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur). Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité.

Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [FRE 03].

4.2 Eoliennes à axe horizontal:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour

générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [VRI 83].

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [MEN 01].

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [MOK 13].

a) Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [BAI 10], [GHD 08] :

La concentration du CO₂ est augmentée de 25% depuis l'ère préindustrielle. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6 °C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5 °C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

~ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement à l'énergie fossile, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

~ L'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂ et 21 millions de tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO₂, qui sont les principaux responsables des pluies acides.

~ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;

~ Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

- ~ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ~ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ~ C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables ;
- ~ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- . Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles sur les sites plus venteux. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- ~ La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

b) Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages:

- ~ L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- ~ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ~ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études montrent 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.
- ~ La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.
- ~ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés[MOK 13].

6. La puissance éolienne dans le monde

Comme il est montré sur la Figure 1-7, la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années le taux de croissance le plus important de l'industrie de la production d'électricité.

Avec une croissance de 86.4% en 2010, la capacité de production d'énergie éolienne dans le monde a atteint 170.29 MW durant la même année. L'électricité éolienne est utilisée principalement en Chine (22% de la puissance mondiale installée en 2010), dont plus de 62.64% dans les pays de l'union européenne.

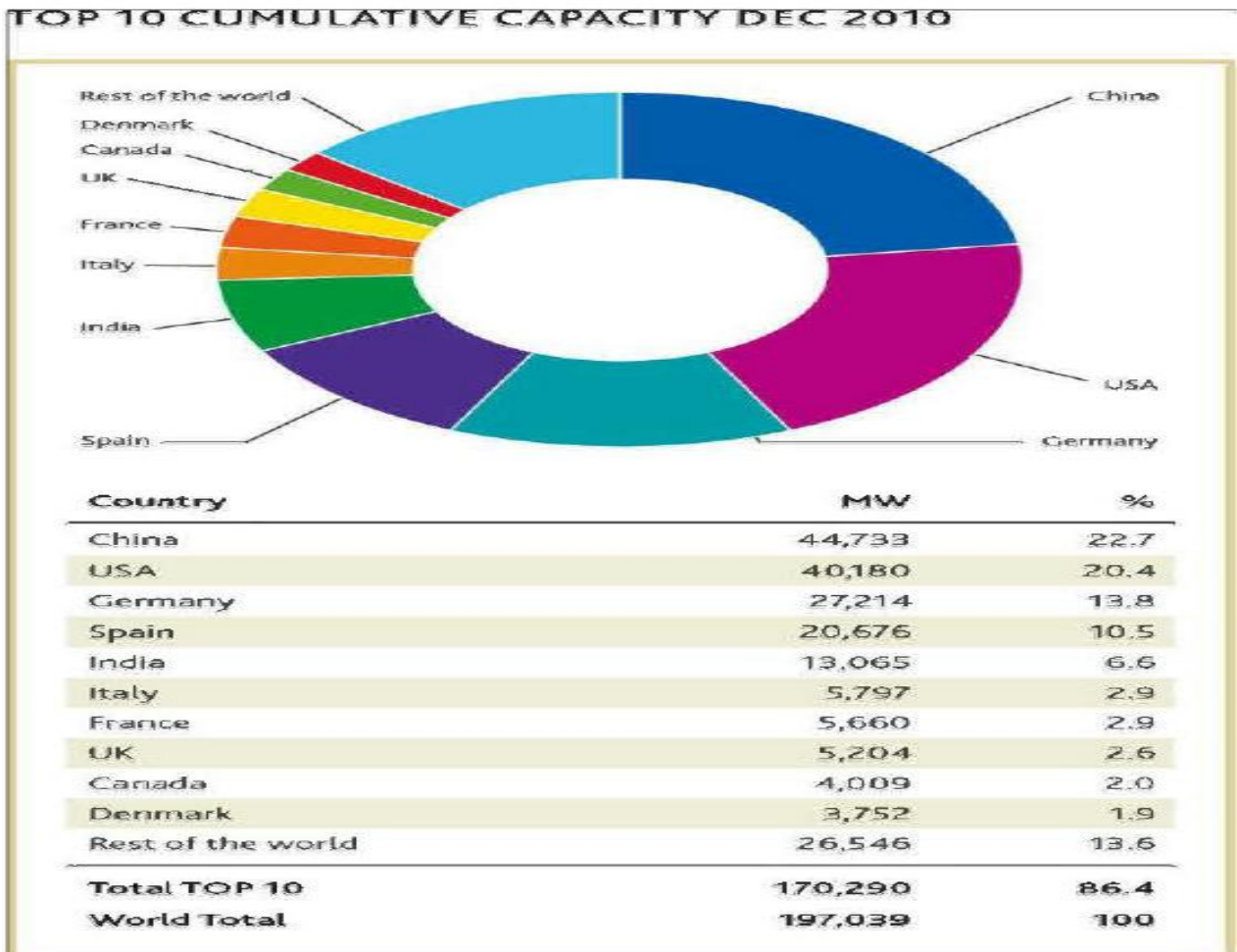


Figure I-8 : Évolution de la puissance éolienne installée dans le monde

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelle, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans

les années 90. Les perspectives sont toutes spectaculaires. L'EWEA, l'association européenne pour l'énergie du vent estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% pour 2040 [MOK 13].

7- Etat de l'art sur la conversion électromécanique

7.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

7.1.1 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. 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-collecteurs 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. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure 1-9 [ANC].

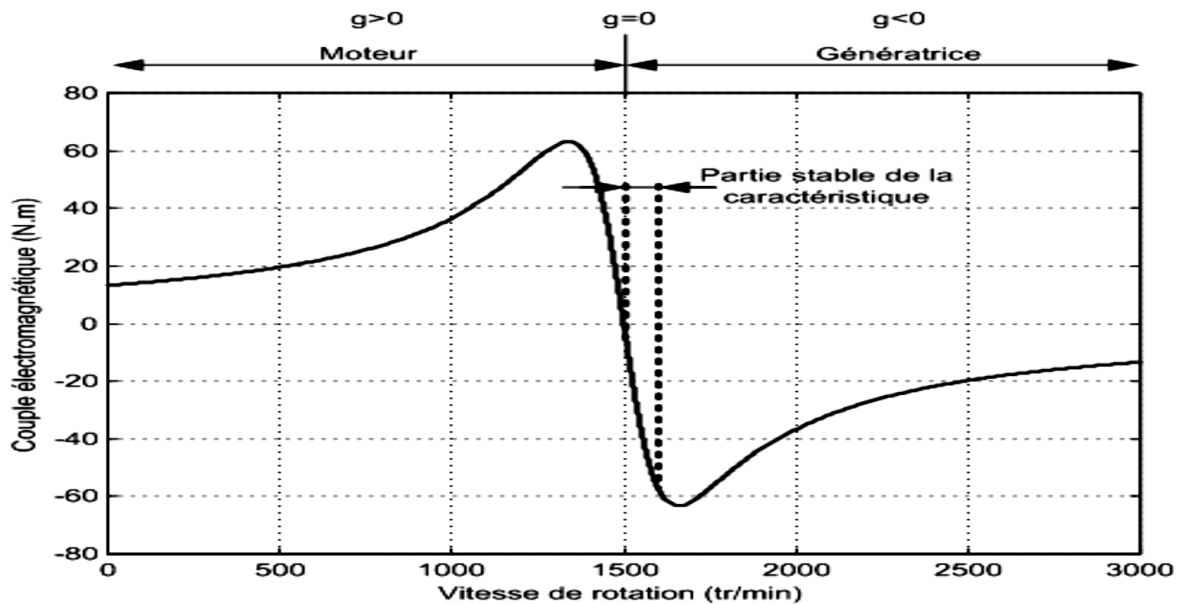


Figure I-9 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

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 ci-dessus, 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-10). La machine à un nombre de paires de pôles fixe et 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 sur 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 la Figure I-10 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [FRE 03].

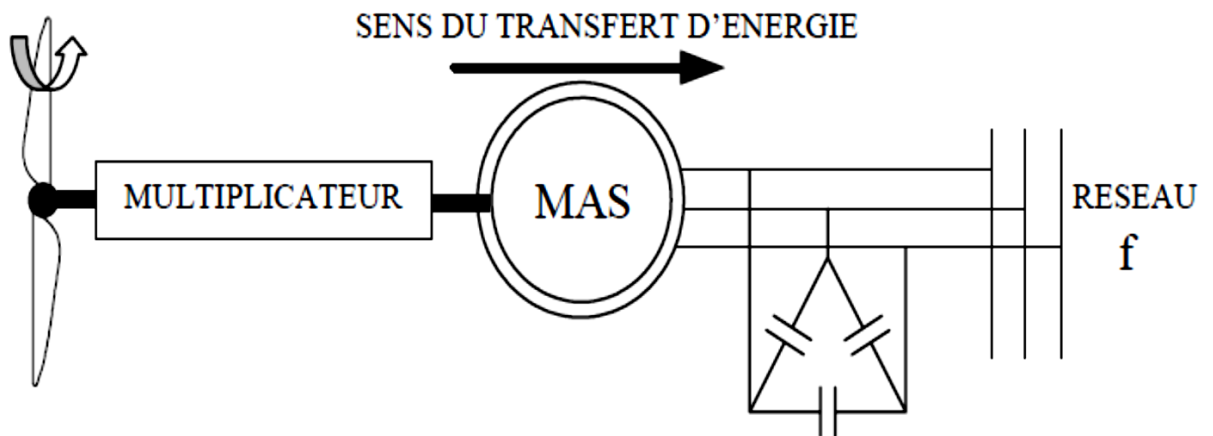


Figure I-10 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

7.1.2 Machine asynchrone à double stator[FER 09].

Cette configuration d'éolienne, permet un point de fonctionnement à deux vitesses. On réalise un double bobinage au stator (Fig. I.11) qui induit un nombre de paires de pôles variable et donc des plages de vitesses différentes. On peut imposer 2 vitesses de synchronisme par changement du nombre de pôles. D'une part, on a un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent. En effet, la puissance est donnée par :

$$P_{mg} = C_{em} \cdot \Omega_s$$

P_{mg} La puissance transmise par la génératrice, C_{em} Le couple électromagnétique, Ω_s La vitesse de synchronisme, C La pulsation du réseau et P le nombre de paires de pôles. A une faible puissance correspond une faible vitesse, la vitesse étant liée au nombre de paires de pôles par:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

A une faible vitesse correspond un nombre de paires de pôles élevé. D'autre part, on a un stator de forte puissance correspondant à une vitesse élevée et donc à faible nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent élevées pour la connexion au réseau ont utilisé des commutateurs.

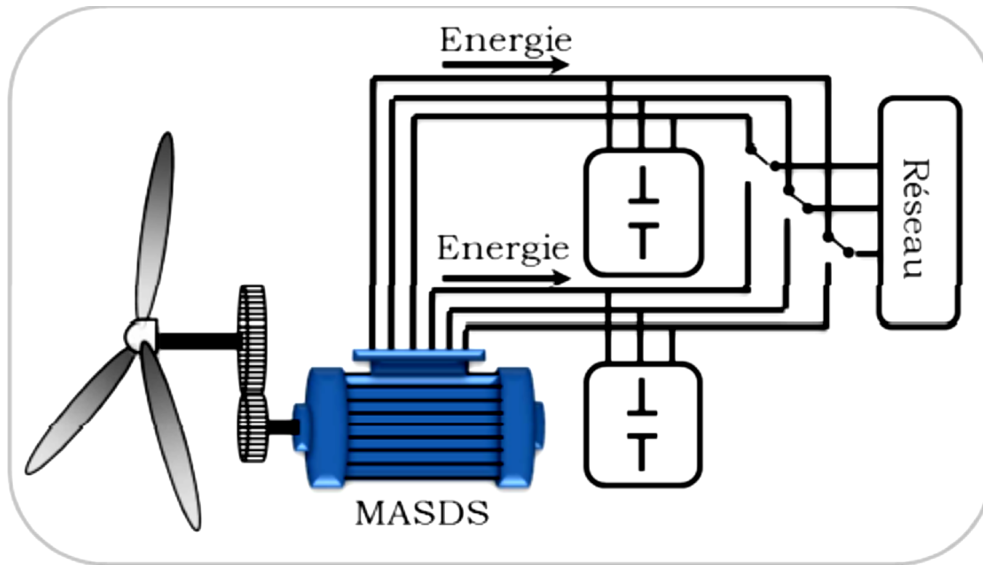


Fig. I.11: Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la MAS à double stator.

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.

7.1.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [ARM 06]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Fig. I.12). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [TIR 10]. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor [POI] [LOP].

La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la

diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage) [TIR 10].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse [MIR 05].

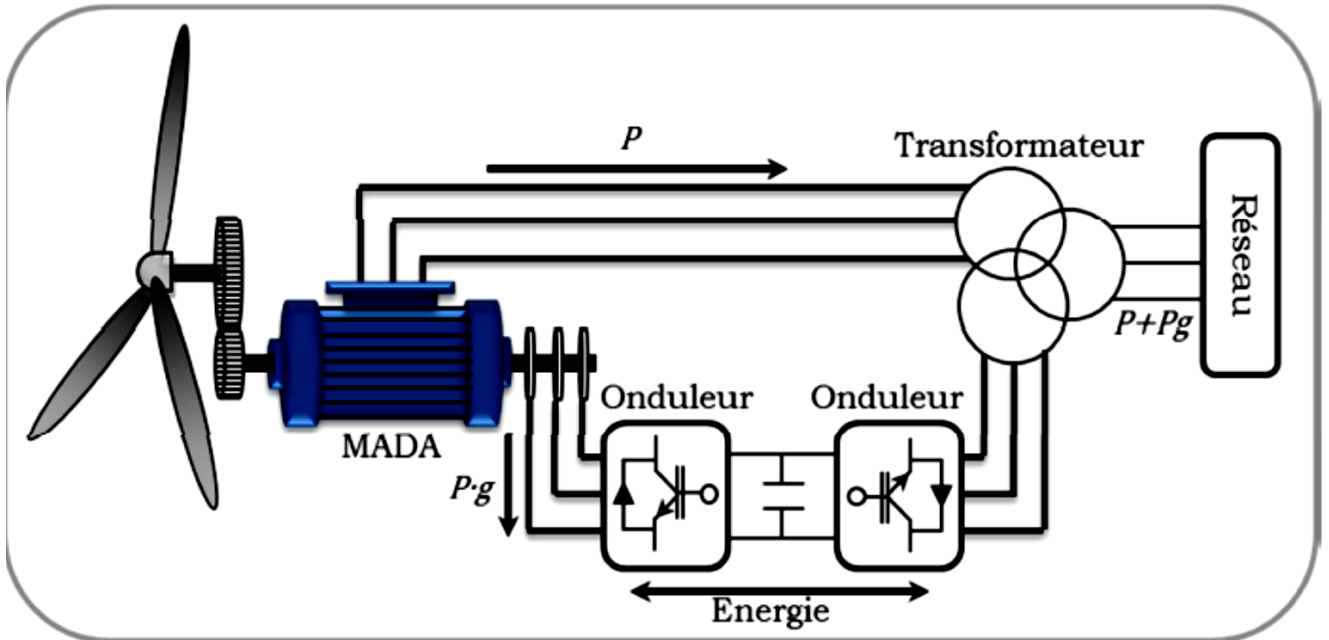


Fig. I.12: schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor.

Résumé des points forts de la MADA sont [LOP] :

- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages [NAO 08].

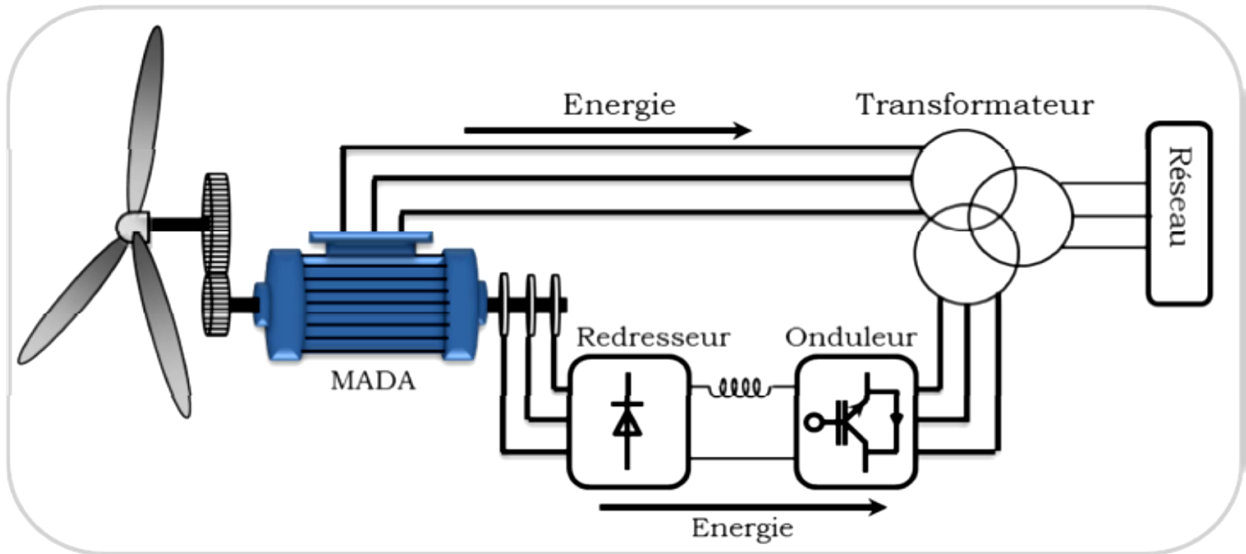


Fig. I.13: MADA - structure Kramer [01].

(b) MADA à énergie rotorique dissipée

La Fig. I.14 représente cette configuration avec le stator connecté directement au réseau et le rotor connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage torique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone [FER 09].

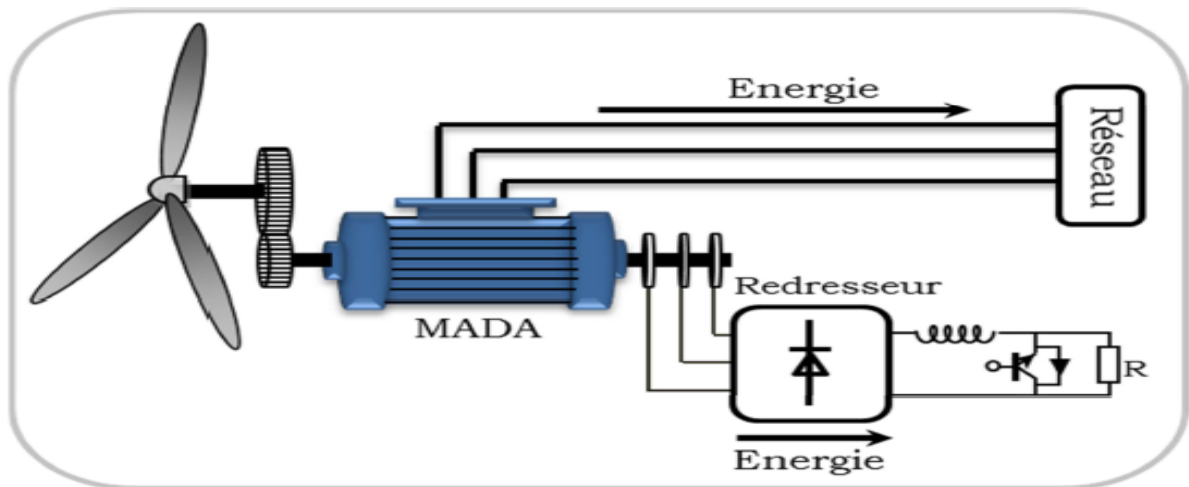


Fig. I.14: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée [POI 03].

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système.

De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande.

Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale du glissement obtenue dans ce procédé est de 10% [POI 03].

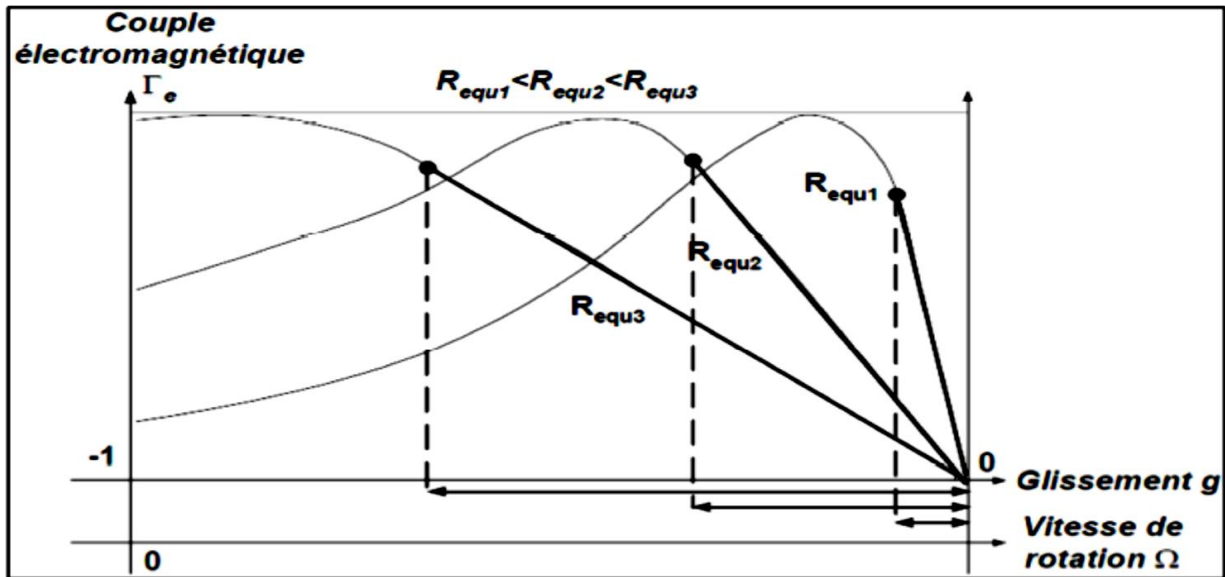


Fig. I.15 : Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

(c) MADA – structure de « Scherbius » avec cycloconvertisseur

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cycloconvertisseur (Fig. I.16) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Fig. I.16 [FER 09].

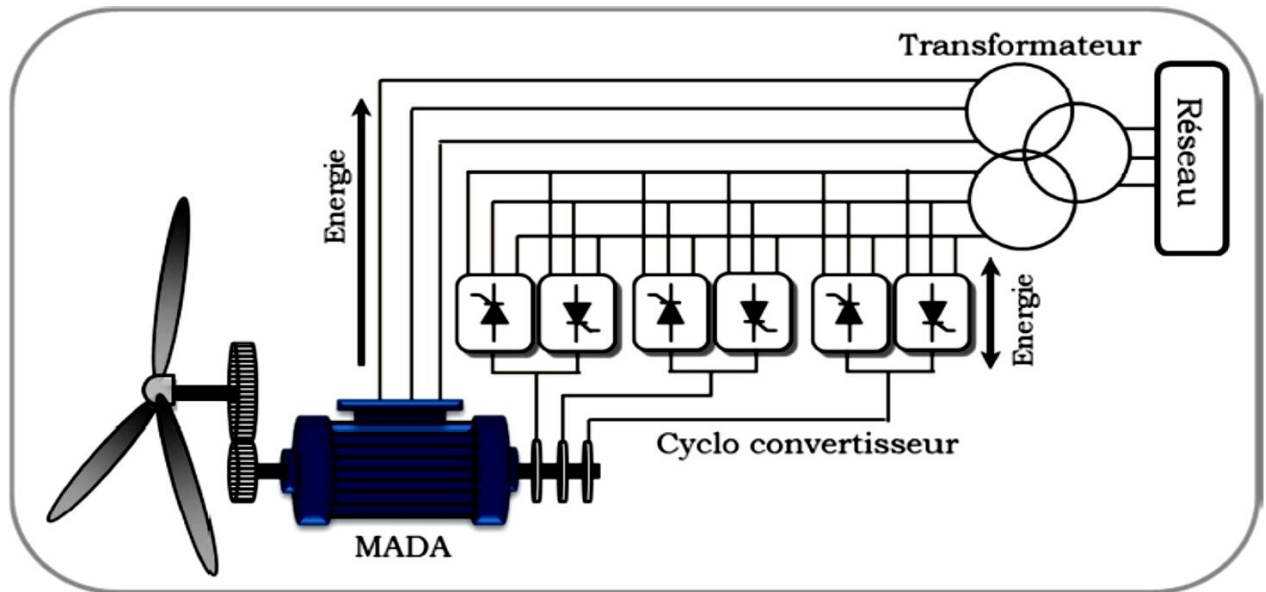


Fig. I.16 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur [WWE 09].

7.1.4 Machine Asynchrone à Double Alimentation Type "Brushless"

Cette machine est constituée de deux bobinages triphasés au stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier le courant d'excitation de la machine. Le stator de forte puissance est connecté directement sur le réseau et le convertisseur est placé entre le stator de faible puissance et le réseau (Fig.I.17) [FER 09].

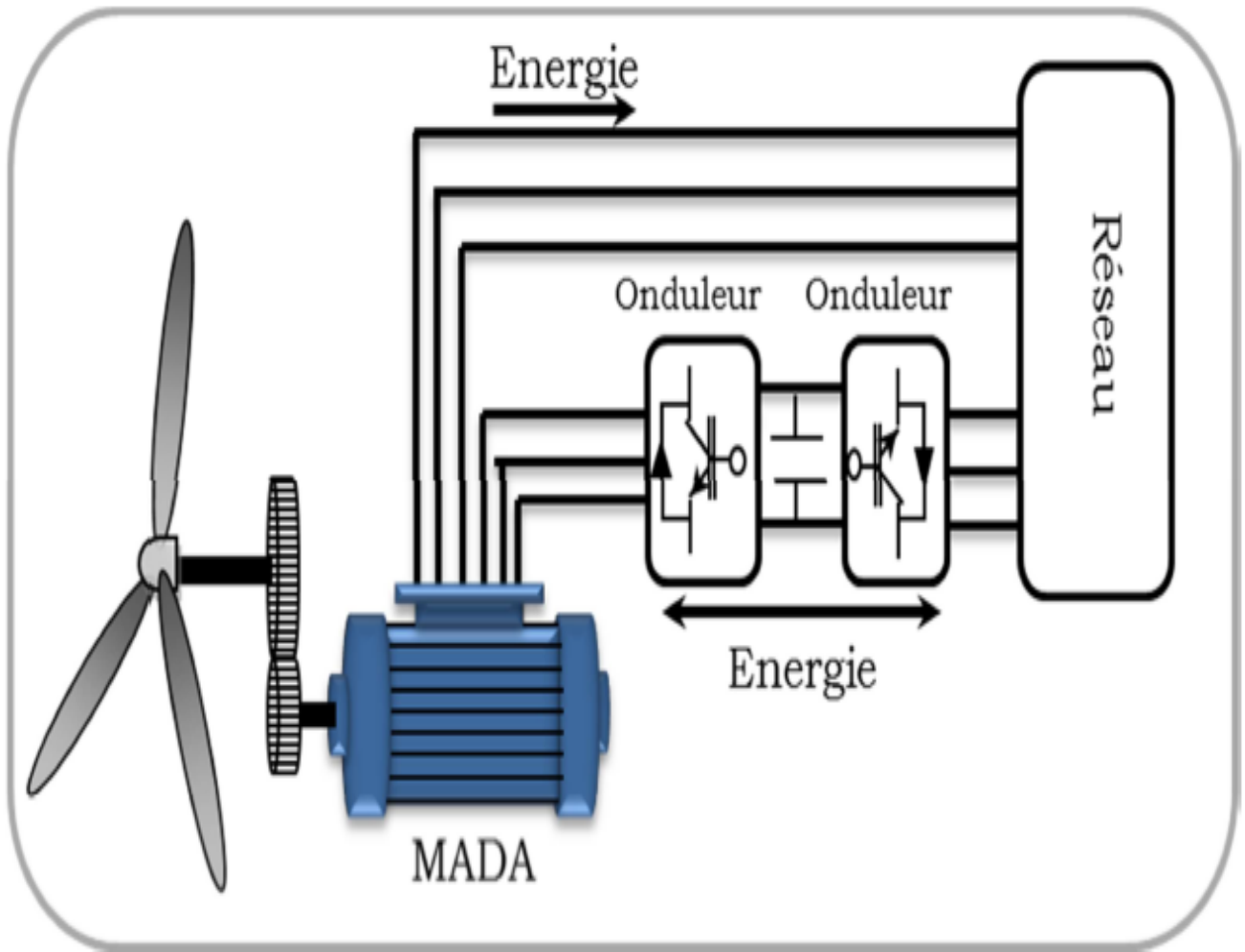


Fig. I.17: Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau [POI 03].

8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés une grande famille de machine sont présentée : machines asynchrones.

Pour le fonctionnement connecté sur un réseau, nous avons vu qu'il était important que la génératrice puisse fonctionner à vitesse variable et que la présence de convertisseurs entre la génératrice et le réseau nuisait au rendement global de l'installation.

CHAPITRE II :
MODELISATION DE
LA MACHINE
ASYNCHRONE
DOUBLE
ALIMENTATION

1. Introduction

L'éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et ainsi la puissance mécanique obtenue, est transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice

La figure suivante montre les trois parties de la turbine à modéliser :

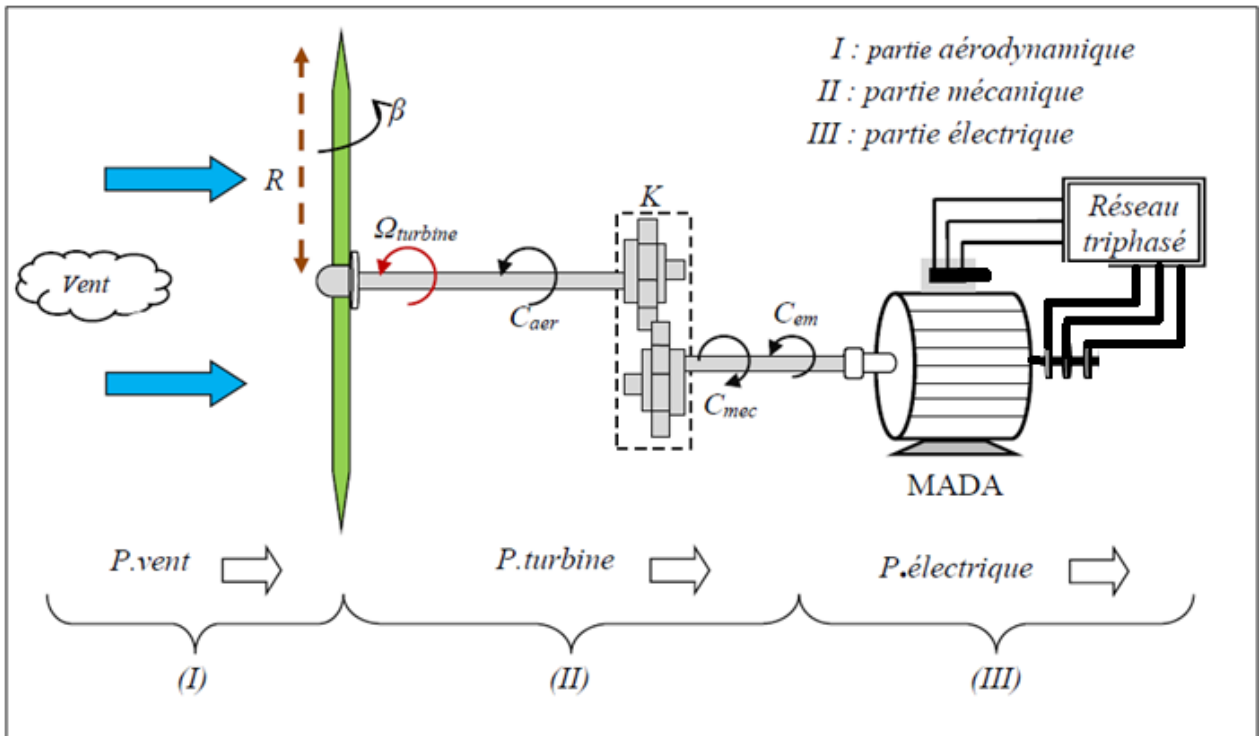


Figure (II.1) : Configuration d'une éolienne

Deux types de machines électriques peuvent être utilisés dans l'industrie des éoliennes (système aérogénérateur) :

- Machines synchrones,
- Machines asynchrones (simple alimentation : MAS ou double alimentation : MADA).

Dans notre étude nous s'intéresserons à la machine asynchrone double alimentation.

2. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION

La machine asynchrone double alimentation est un système non linéaire très complexe. Une commande performante sur cette machine, pour ses différents régimes de fonctionnement, nécessite une modélisation mathématique plus précise pour représenter son comportement de manière satisfaisante et réelle.

2.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Il est très difficile de modéliser la MADA vu sa structure et sa géométrie complexes, d'où la nécessité d'adopter certaines hypothèses qui permettent d'obtenir un modèle simple et le plus proche possible de la réalité. Ces hypothèses sont les suivantes :

- La géométrie de la machine est symétrique, et l'épaisseur de l'entrefer est uniforme.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants. Les pertes par hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau et l'effet des encoches sont négligeables.
- Les résistances et les coefficients d'inductances propres sont constants et les enroulements ne dépendent pas de la température. Les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.
- Les forces magnétomotrices créées par le stator ou le rotor ont une répartition sinusoïdale.

2.2 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (a, b, c)

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la machine asynchrone à double alimentation est une machine classique dont le rotor est accessible et identique au stator. Par conséquent, elle a le même modèle que celui de la machine asynchrone à cage, à l'exception des tensions rotoriques qui ne sont pas nulles.

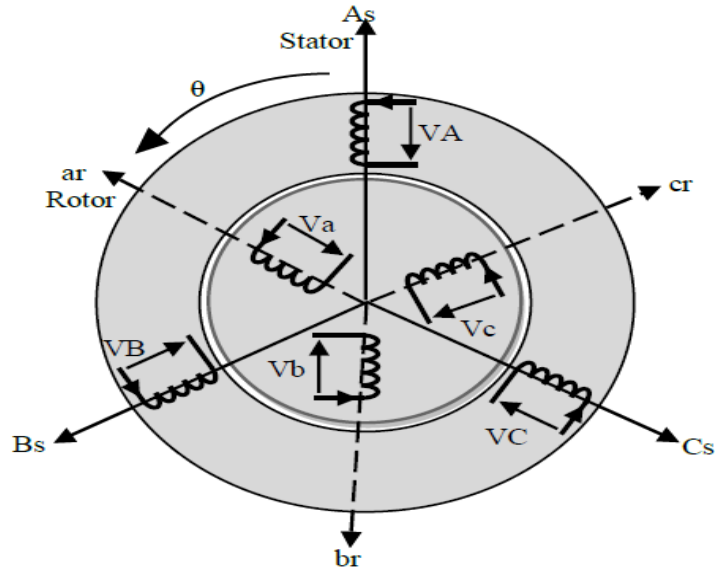


Figure (II.2) : Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.

2.2.1. EQUATIONS ELECTRIQUES

Les équations des tensions électriques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \end{cases} \quad (II.1)$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

V_s, V_r - les tensions simples statoriques et rotoriques.

I_s, I_r - les courants de phase statoriques et rotoriques.

φ_s, φ_r - les flux respectivement statoriques et rotoriques.

2.2.2 EQUATIONS MAGNETIQUES

Les équations des flux magnétiques qui régissent la MADA sont :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Où , L_{rr} sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

M_s, M_r - les inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$ La matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor qui est donnée par la formule

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

M_{max} est l'inductance mutuelle maximum entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient le système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [[L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]] \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

2.2.3 EQUATION MECANIQUE

L'équation mécanique de la machine est donnée comme suit :

$$C_{em} = C_r + f_r \cdot \Omega + J \cdot \frac{d\Omega}{d\theta} \quad (II.5)$$

Avec :

- C_{em} - le couple électromagnétique de la machine;
- C_r - le couple résistant;
- f_r - le coefficient de frottement visqueux de la MADA;
- Ω - la vitesse de rotation de l'axe de la MADA;
- J - l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \cdot [I_s]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}] \cdot [I_r]] \quad (II.6)$$

où p - le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les équations différentielles (II.4), (II.5) et (II.6) représentent le modèle de la MADA dans le repère (a, b, c) .

2.3 Changement de repère :

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park

2.3.1 La transformation de Park :

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente.

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature.

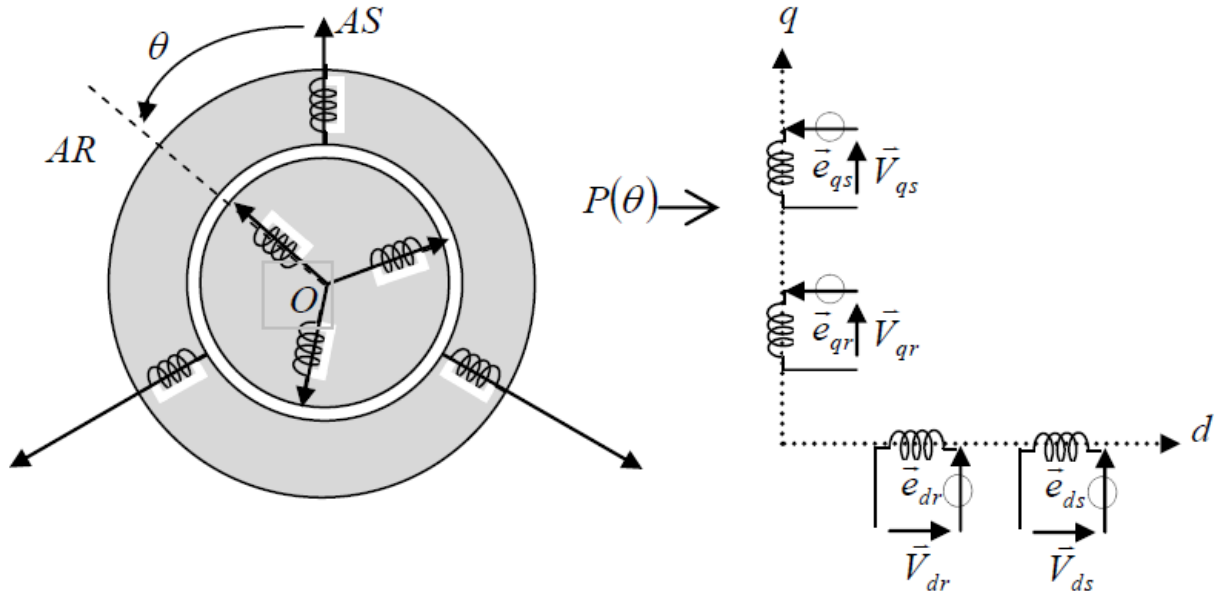


Figure (II.3) : Représentation de la MADA dans le repère de Park

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé en utilise la matrice :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$[P(\theta)]$ permet la conservation des puissances lors du passage du système triphasé au système biphasé.

θ - l'angle entre le repère du système triphasé à transformer et le repère de Park

2.3.2 EQUATIONS MATHÉMATIQUES DE LA MADA DANS LE REPERE (d, q)

L'équation de la transformation de Park pour passer d'un système triphasé à un système biphasé et vice versa est donnée comme suit :

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \Rightarrow [X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dqo}]$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- : indice de l'axe homopolaire.
- d : indice de l'axe direct.
- q : indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La transformation de Park appliquée aux équations statoriques nous donne :

$$[V_{sdqo}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{sabc}] \Rightarrow [V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_{sdqo}]$$

$$[I_{sdqo}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{sabc}] \Rightarrow [I_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdqo}]$$

$$[\varphi_{sdqo}] = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_{sabc}] \Rightarrow [\varphi_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdqo}]$$

La transformation de Park appliquée aux équations rotoriques nous donne :

$$[V_{rdqo}] = [P(\theta_r)] \cdot [V_{rabc}] \Rightarrow [V_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [V_{rdqo}]$$

$$[I_{rdqo}] = [P(\theta_r)] \cdot [I_{rabc}] \Rightarrow [I_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdqo}]$$

$$[\varphi_{rdqo}] = [P(\theta_r)] \cdot [\varphi_{rabc}] \Rightarrow [\varphi_{rabc}] = [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdqo}]$$

2.3.3 Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q) :

$$[V_{sdqo}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} = [R_s][P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdqo}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_{sdqo}] \right]$$

$$[V_{rdqo}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} = [R_r][P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdqo}] + \frac{d}{dt} \left[[P(\theta_r)]^{-1} \cdot [\varphi_{rdqo}] \right]$$

$$[\varphi_{sdqo}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} = [L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{sdqo}] + [M_{sr}] \cdot [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [I_{rdqo}]$$

$$[\varphi_{rdqo}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} = [L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{rdqo}] + [M_{rs}] \cdot [P(\theta_r)]^{-1} \cdot [I_{sdqo}]$$

Avec:

$$\begin{aligned} [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_s)]^{-1}] &= \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [[P(\theta_r)]^{-1}] &= \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

Par conséquent, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases}$$

2.3.4 EQUATION DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd}) \quad (\text{II.10})$$

Avec p - le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances active et réactive statoriques sont :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

2.4 MODELE D'ETAT DE LA MADA

Le système d'équations de tensions de la machine peut être écrit sous la forme matricielle comme suit :

$$[\dot{X}] = [A].[X] + [B].[U] \quad (\text{II.12})$$

$$[X] = [\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, i_{rd}, i_{rq}]^t$$

$$[U] = [v_{sd}, v_{sq}, v_{rd}, v_{rq}]^t$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix}$$

α , β et δ sont des constantes définies comme suit :

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} \quad \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} \quad \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_s L_r} \right)$$

Pour faciliter la simulation, on décompose la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s.[A_2] + w_r.[A_3] \quad (\text{II.13})$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix} \quad [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

2.5 Bloc de simulation de la MADA

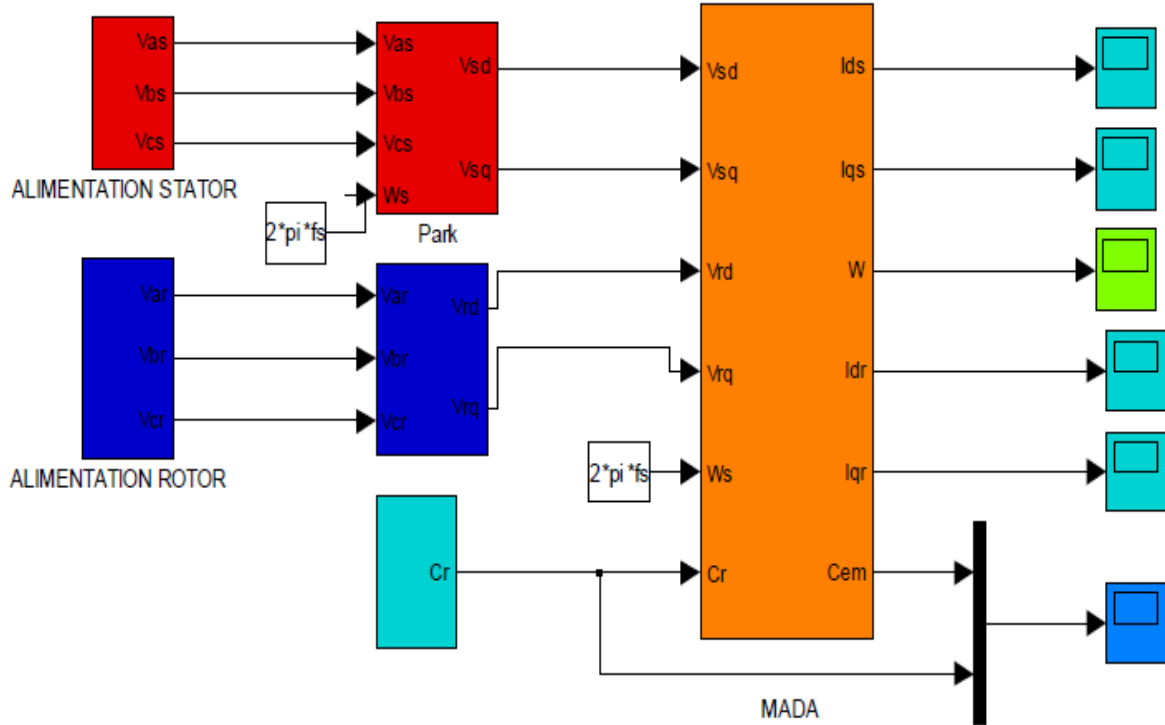


Figure (II.4) : Bloc de simulation de la MADA

2.6 RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME

La simulation de la machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 4 KW pour les deux modes de fonctionnement moteur et générateur a été exécutée à l'aide du logiciel MATLAB. Son modèle est basé sur les équations obtenues au moyen de la transformation de Park, (repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant). Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous.

II.2.6.1 FONCTIONNEMENT MOTEUR

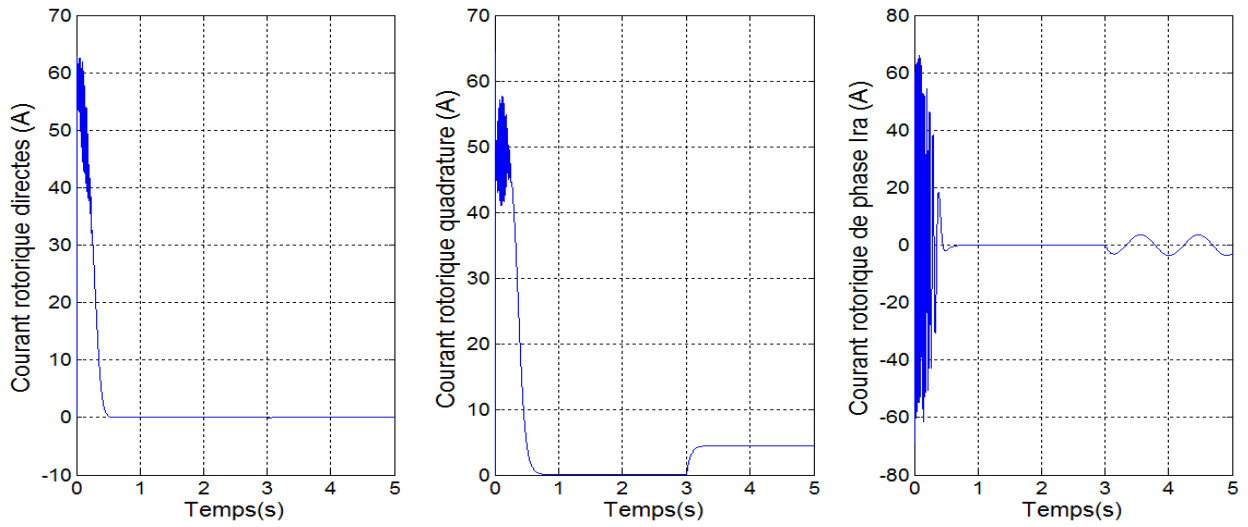


Figure (II.5) : Composantes du courant rotorique.

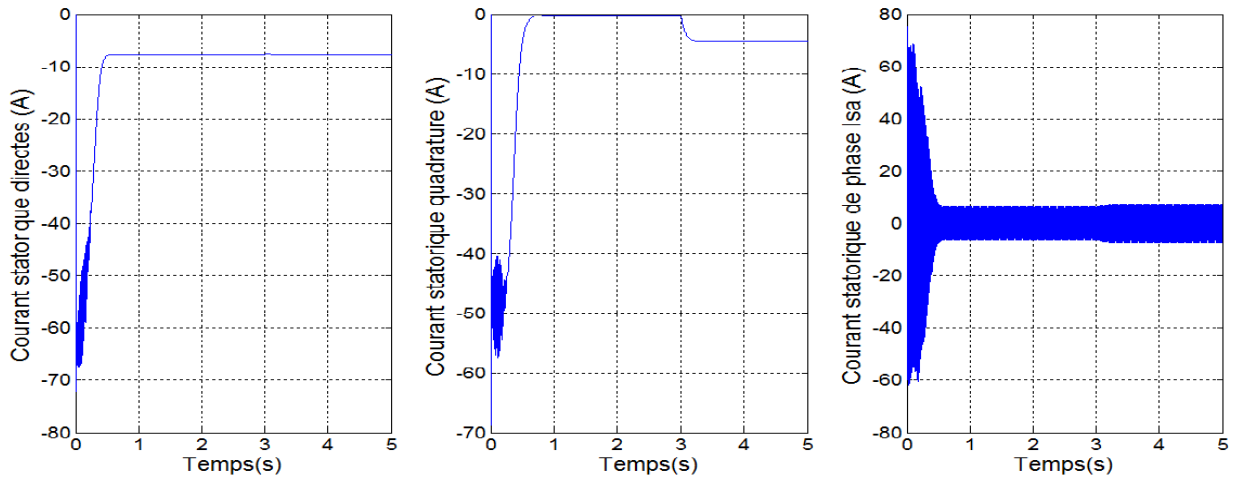


Figure (II.6) : Composantes du courant statorique.

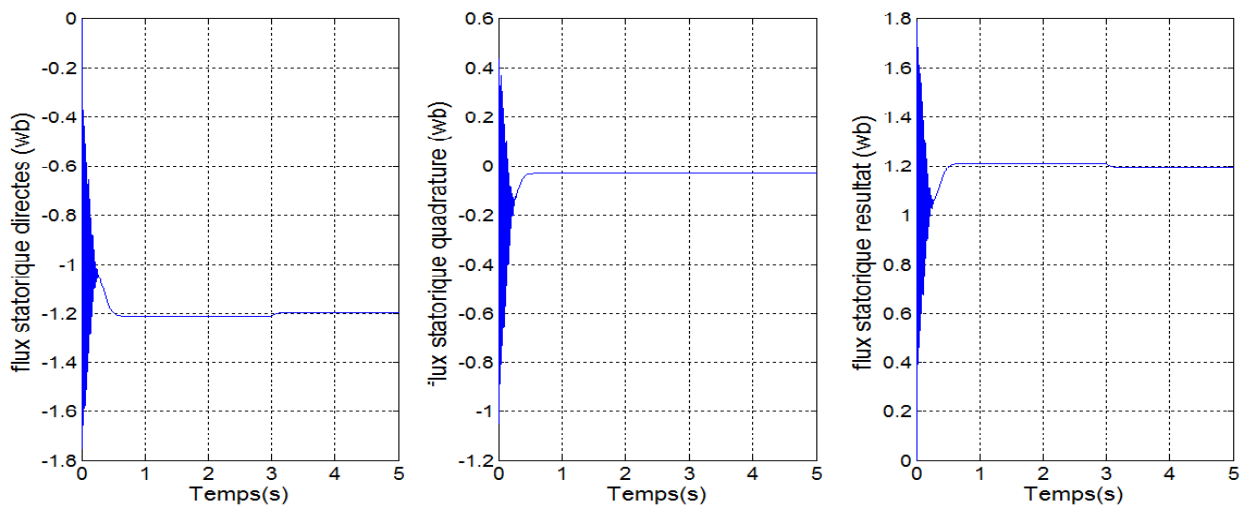


Figure (II.7) : Composantes du flux statorique et leur résultante.

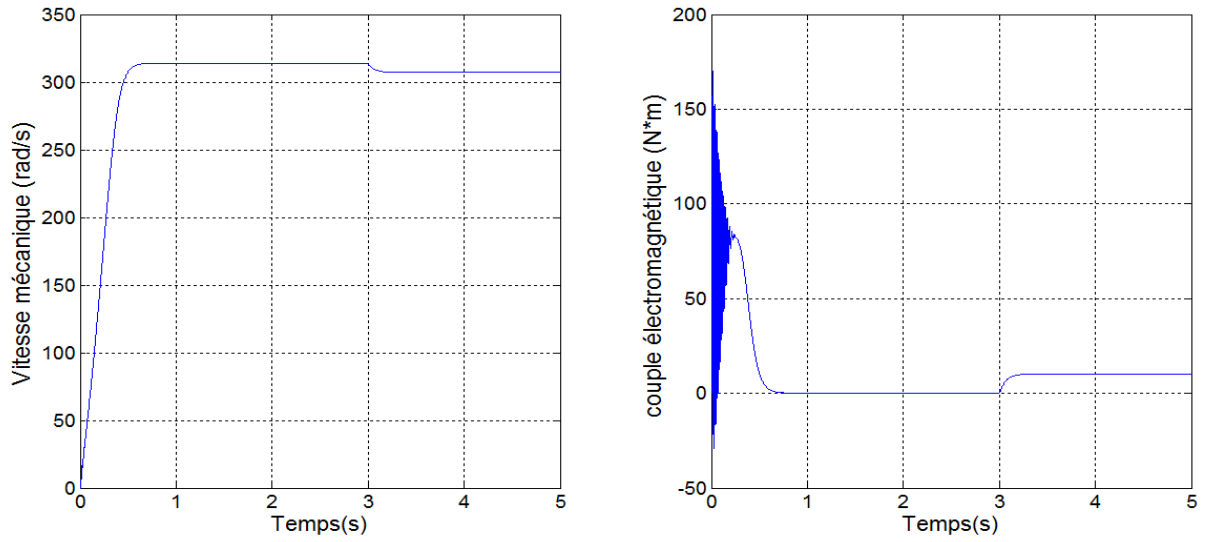


Figure (II.8) : Vitesse et le couple électromagnétique.

2.6.2 FONCTIONNEMENT GENERATEUR

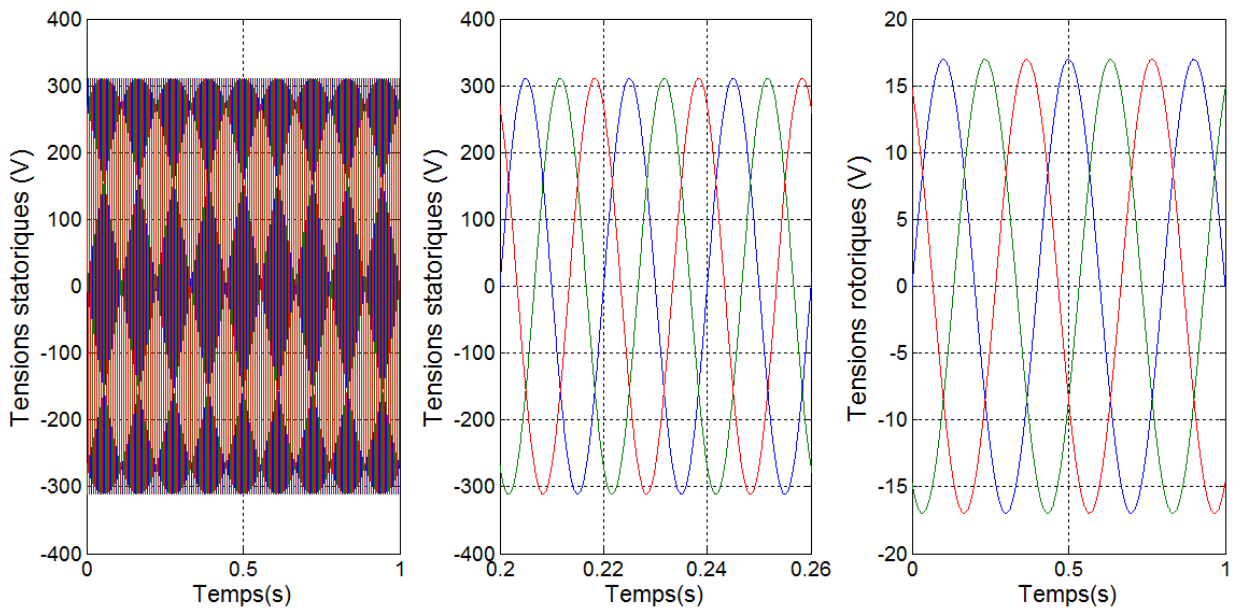


Figure (II.9) : Les tensions d'alimentations au stator et au rotor.

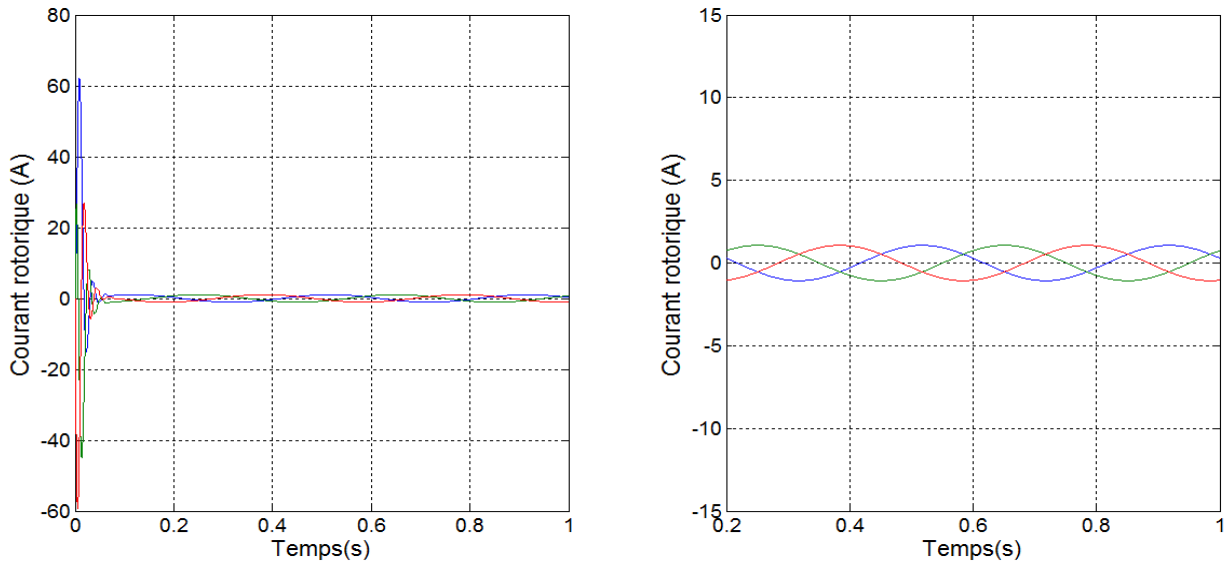


Figure (II.10) : Les courants rotoriques triphasés avec un zoom.

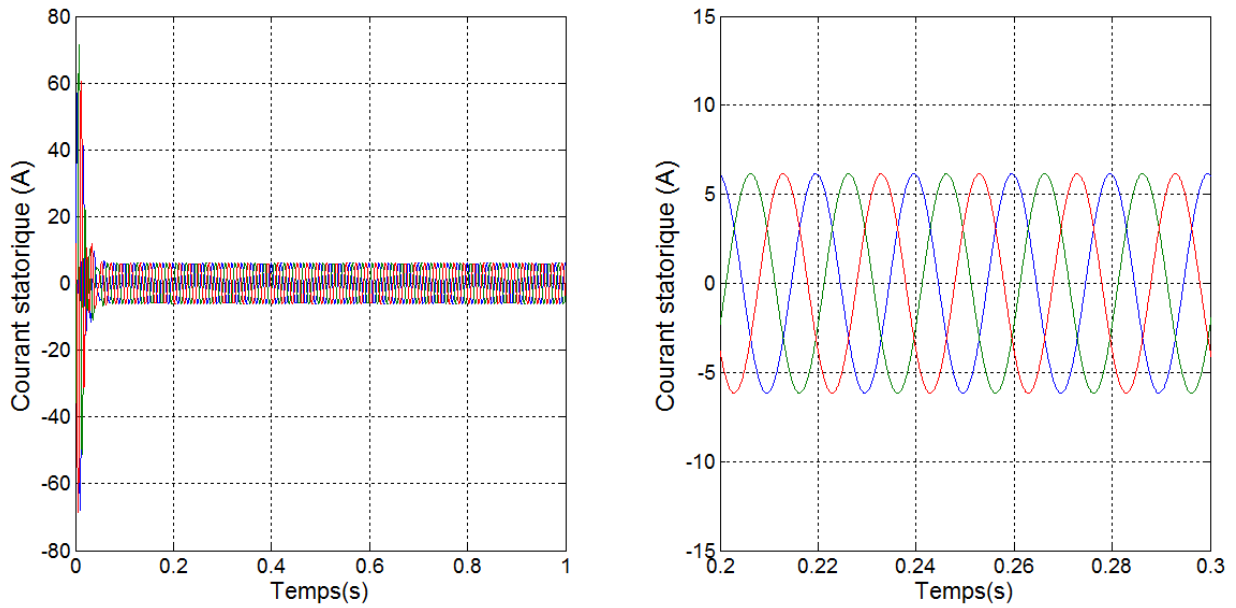


Figure (II.11) : Les courants statoriques triphasés avec un zoom.

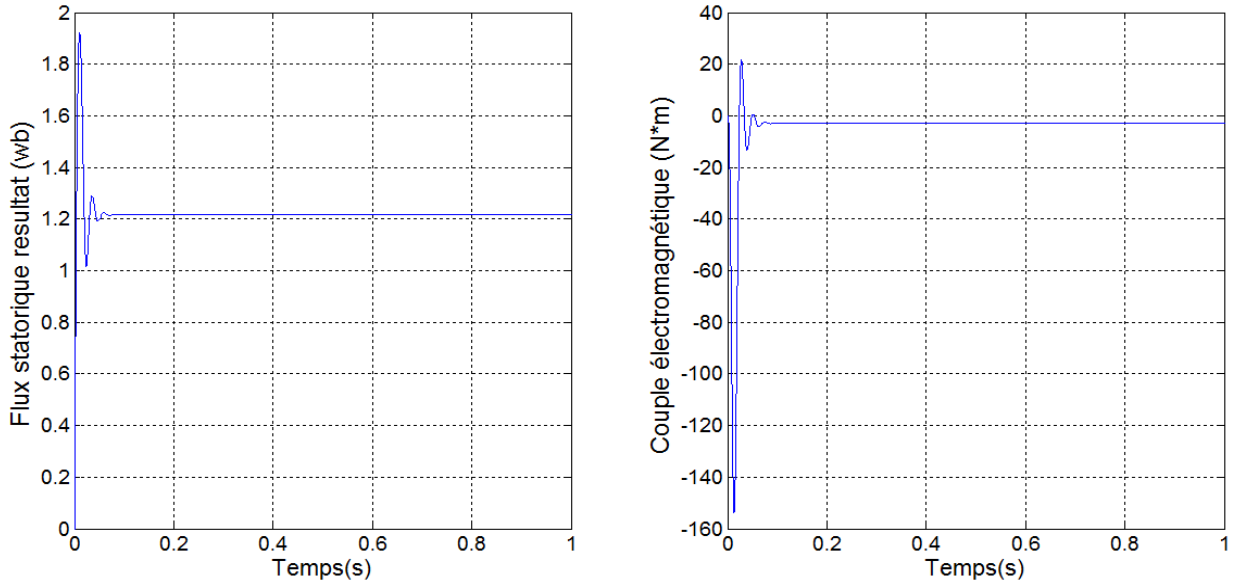


Figure (II.12): Le couple électromagnétique et le flux.

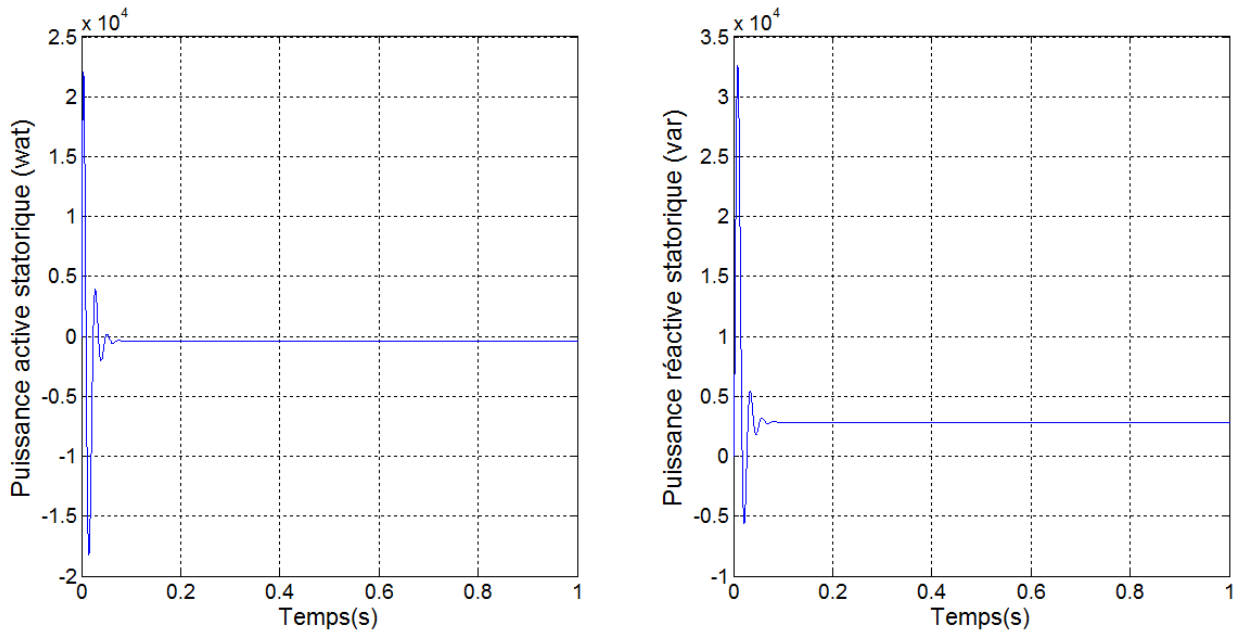


Figure (II.13) : Les puissances active et réactive statoriques.

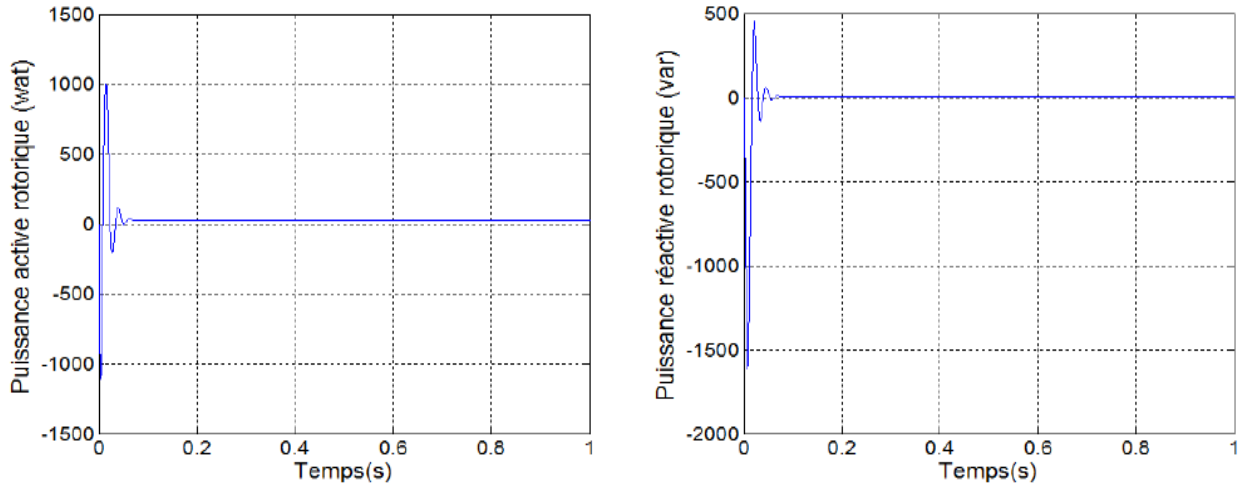


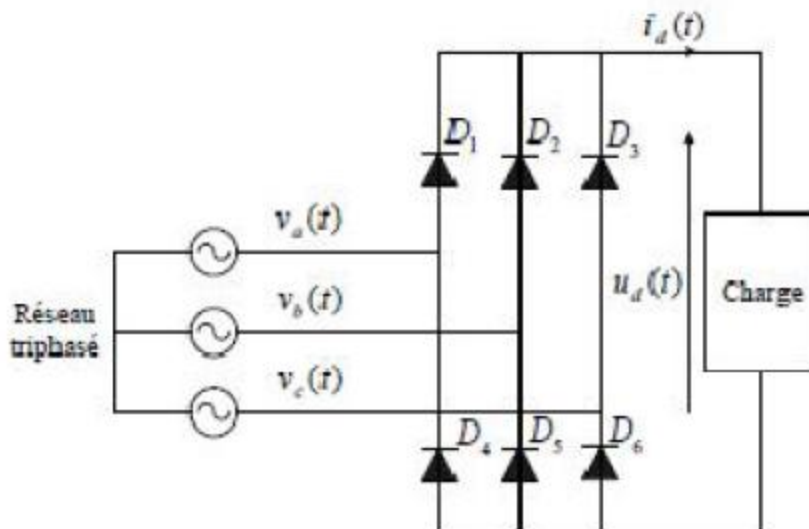
Figure (II.14) : Les puissances active et réactive rotoriques.

2.7 Synthèse et modélisation de l'alimentation de la MADA

2.7.1 Modélisation de la redresseuse triphasée double alternance à diodes

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu. Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

La figure II.15 représente le schéma de principe de la redresseuse triphasée double alternance à diodes.



Figure(II.15) : Schéma d'une redresseuse triphasée double alternance à diodes.

Le redresseur est alimenté par un système de tension triphasé exprimé par :

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

Chacune des trois diodes D1, D2, D3 à cathode commune conduit lorsque le potentiel de son anode est le plus positif, donc :

Di conduit si $V_i = \text{Max}(V_j)$; $i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$.

Chacune des trois diodes D4, D5, D6 à anode commune, conduit lorsque le potentiel de sa cathode est le plus négatif, donc :

Di conduit si $V_i = \text{Min}(V_j)$; $i=4, 5, 6$; $j=1, 2, 3$.

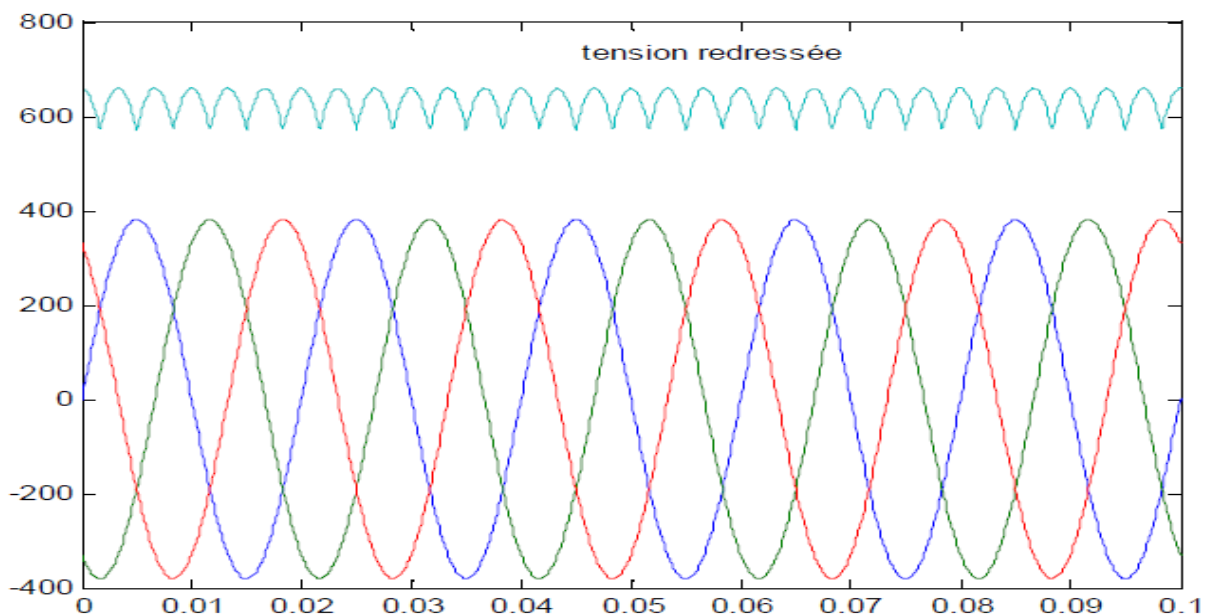
Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque D1 conduit, l'une des deux diodes D5 et D6 conduit également.

La valeur instantanée de la tension redressée est donnée par :

$$V_d(t) = \text{Max}(V_a(t), V_b(t), V_c(t)) - \text{Min}(V_a(t), V_b(t), V_c(t))$$

La figure II.8, montre l'allure des trois tensions à l'entrée du redresseur et la tension redressée.

On constate que cette dernière présente des oscillations.

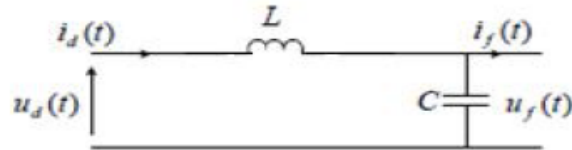


Figure(II.16) : Tensions d'entrée et redressée.

La tension redressée présente un taux d'ondulations. Pour réduire ces ondulations, il faut placer un filtre passe bas entre le redresseur et l'onduleur.

2.7.2 Modélisation du circuit de filtrage

Ce circuit a pour rôle de réduire le taux d'ondulations de la tension redressée. La figure (II.17) représente le circuit de branchement du filtre.



Figure(II.17) : Circuit du filtrage.

On peut modéliser ce circuit par le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L}(U_d(t) - U_f(t)) \\ \frac{dU_f(t)}{dt} = \frac{1}{C}(i_d(t) - i_f(t)) \end{cases}$$

Où :

$U_d(t)$: Tension redressée ;

$U_f(t)$: Tension à la sortie du filtre.

La forme discrétisée du filtre est donnée par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} i_d(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{L}(V_d(t) - V_f(t)) + i_d(t) \\ U_f(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{C}(i_d(t) - i_f(t)) + V_f(t) \end{cases}$$

D' où, la fonction du transfert du filtre est :

$$F_t(s) = \frac{U_f(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{1 + (\sqrt{L.C}.S)^2}$$

Où : S est l'opérateur de Laplace.

Cette fonction est du deuxième ordre, ayant une fréquence de coupure exprimée par :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L.C}}$$

Pour dimensionner le filtre, on choisit une fréquence de coupure suffisamment inférieure à la fréquence de la première harmonique de $U_d(t)$.

2.7.3 Modélisation de l'onduleur

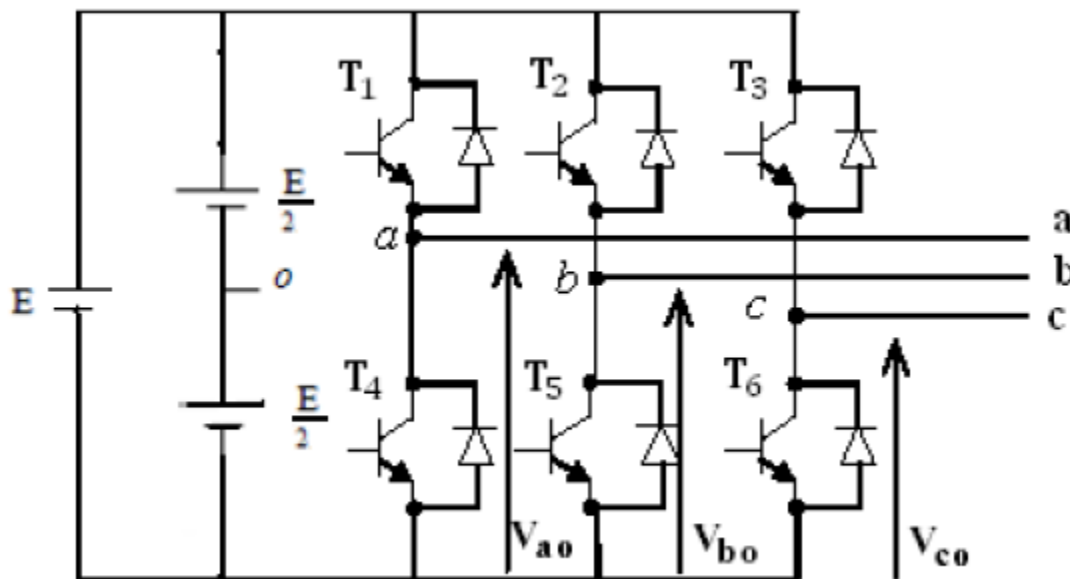
L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue-alternative. Il fonctionne en commutation forcée et il est généralement conçu à base de transistors. Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI).

L'onduleur de tension transforme un signal continu à son entrée en un signal alternatif à sa sortie, tout en contrôlant l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie.

Le réglage de la vitesse d'une machine asynchrone se réalise logiquement par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de tension.

Le schéma de l'onduleur est représenté par la figure II.18. Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras est composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor. Tous les éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux.

En mode commandables, un bras de l'onduleur est représenté par la figure II.19. Il est équivalent à un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension.



Figure(II.18) : Schéma de l'onduleur de tension

Les tensions des phases a , b , c par rapport au point milieu « o » de la source sont données comme suit :

Pour la tension de la phase a :

$$V_{a0} = \frac{E}{2} \text{ Si } T_1 \text{ est fermé ;}$$

$$V_{a0} = \frac{-E}{2} \text{ Si } T_4 \text{ est fermé}$$

Pour la tension de la phase b :

$$V_{b0} = \frac{E}{2} \text{ Si } T_2 \text{ est fermé ;}$$

$$V_{b0} = \frac{-E}{2} \text{ Si } T_5 \text{ est fermé ;}$$

Pour la tension de la phase c :

$$V_{c0} = \frac{E}{2} \text{ Si } T_3 \text{ est fermé ;}$$

$$V_{c0} = \frac{-E}{2} \text{ Si } T_6 \text{ est fermé ;}$$

Les tensions composées sont déterminées comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases}$$

Pour les tensions simples, on peut écrire les relations, comme suites :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases}$$

V_{an}, V_{bn} et V_{cn} Sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),

V_{n0} Est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

En supposant que le système est équilibré, on déduit la relation suivante :

$$i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0 \text{ et } V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

Alors :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0})$$

En remplaçant (II.46) dans (II.44), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(2V_{b0} - V_{a0} - V_{c0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(2V_{c0} - V_{a0} - V_{b0}) \end{cases}$$

On peut aussi écrire ces tensions sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix}$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternative.

$$[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$)

$$\begin{cases} F_i = +1 \text{ si } K_i \text{ est fermé ; } K_i' \text{ est ouvert} \\ F_i = -1 \text{ si } K_i \text{ est ouvert ; } K_i' \text{ est fermé} \end{cases}$$

Il en découle que les tensions simples s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI qui à partir d'une source de tension continue constante impose aux bornes de la machine des créneaux de tension telle que le fondamental de la tension soit plus proche de la référence de tension sinusoïdale. La multiplication du nombre des impulsions formant chacune des alternances de la tension de sortie présente deux importants avantages à savoir :

- repousser vers des fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension, ce qui facilite le filtrage ;
- elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la sortie.

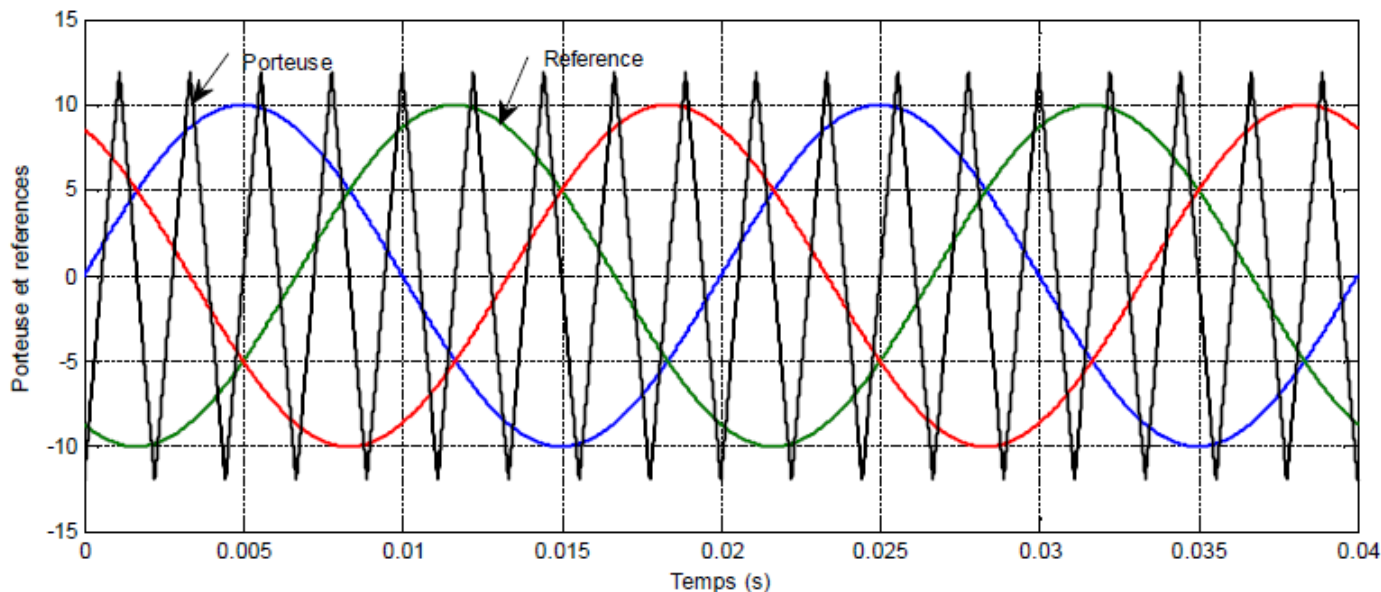
2.7.4 Stratégies MLI triangulo-sinusoïdale

Fondamentalement, les méthodes MLI ont comme principe d'échantillonnage du signal qui contient l'information qui doit être transmise. Il est dit « signal modulant ». Cette information est ensuite convertie en une série d'impulsions dont la largeur est définie, en fonction de l'amplitude du signal modulant aux instants d'échantillonnage .

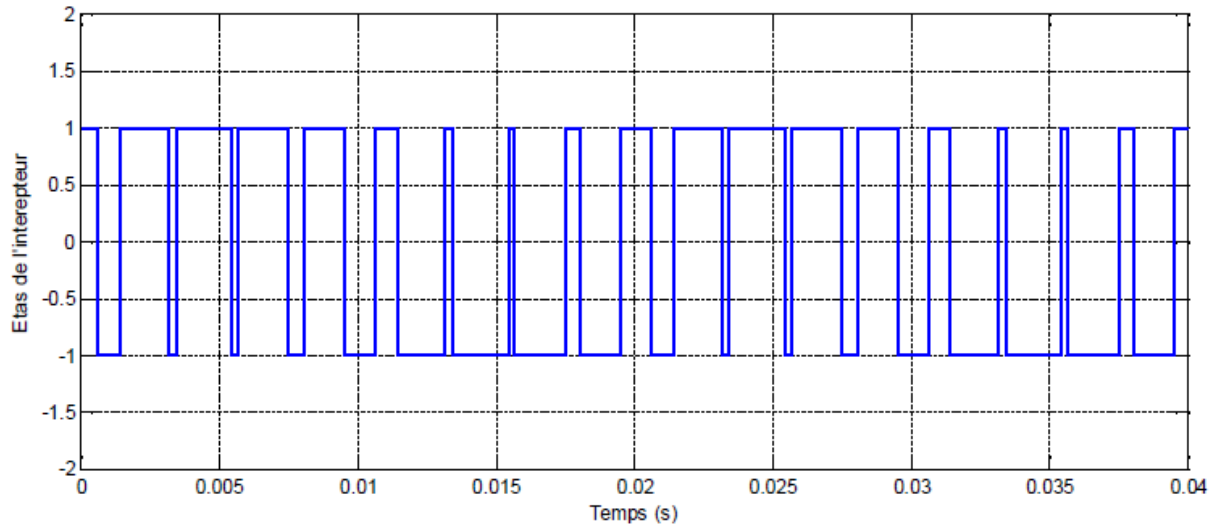
Les différentes techniques MLI développées sont :

- les modulations sinus-triangulaire effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général, triangulaire ;
- les modulations pré calculées pour lesquelles les angles de commutations sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes de spectre fréquentiel ;
- les modulations post calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI vectorielle dans lesquelles les angles de commutations sont calculés en lignes.

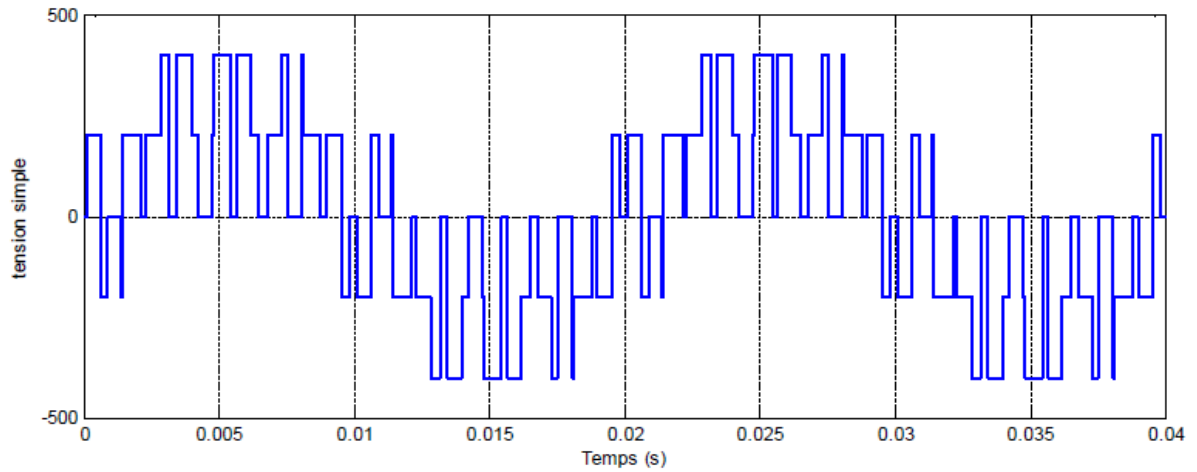
La figure suivante présente les signaux de commande (une onde porteuse triangulaire et une référence sinusoïdale). Les figures II.20, II.21 et II.22 montrent respectivement les états de commutations et les tensions simple de la phase « a » et composée (U_{ab}) à la sortie de l'onduleur.



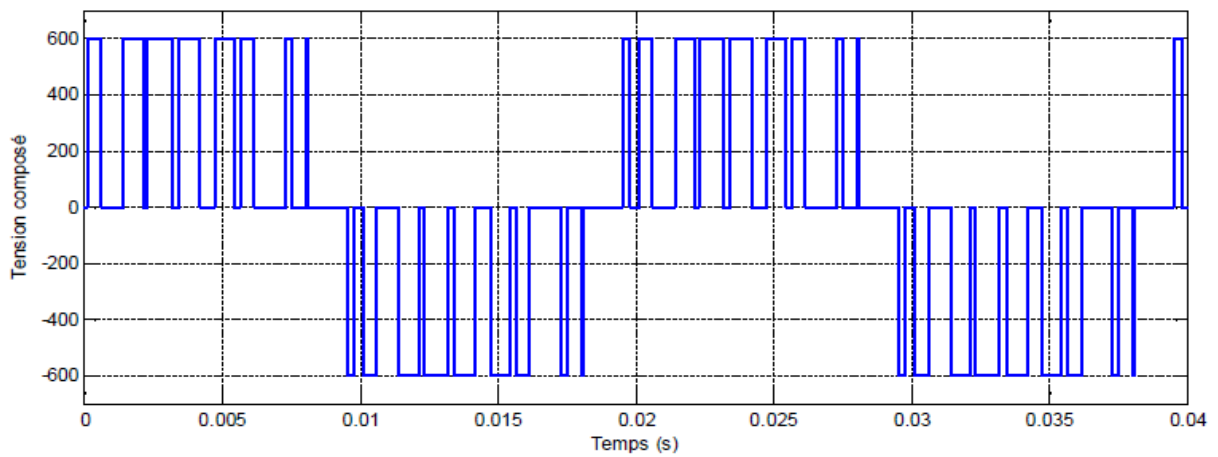
Figure(II.19) : Représentation des signaux de la commande MLI.



Figure(II.20) : Etat de commutation d'un bras.



Figure(II.21) : Tension simple à la sortie de l'onduleur



Figure(II.22) : Tension Composée à la sortie de l'onduleur.

3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable séparément. Cette chaîne qui est constituée d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable et pilotée par le rotor via deux convertisseurs de puissances bidirectionnelles fonctionnant en MLI et reliés au réseau.

Nous avons entamé notre travail par la modélisation de la turbine éolienne et ses deux commandes, la MPPT indirecte pour maximiser le capteur de puissance pendant les faibles vitesses du vent et le "pitch control" pour limiter et nominaliser la puissance convertie pendant les fortes vitesses du vent.

Par la suite, nous avons modélisé, dans une première étape, la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park (Repère biphasé (d, q)) lié au champ tournant qui réduit la complexité du modèle, puis, dans une seconde étape, l'onduleur qui alimente le rotor de la MADA permettant ainsi l'application des commandes pour contrôler les puissances générées par le stator de la machine.

Enfin, on est passé à la modélisation de l'alimentation de l'onduleur qui est un redresseur triphasé, ainsi qu'à sa commande afin de contrôler par la suite le bus continu et le maintenir à une valeur constante dans le but d'améliorer le facteur de puissance du côté réseau.

Les modèles de la chaîne de conversion ont été simulés par le logiciel MATLAB.

Chapitre III:
COMMANDE
VECTORIELLE DU
PUISSANCE
ACTIVE ET
REACTIVE

1. Introduction

Plusieurs recherches universitaires et industrielles ont été réalisées et proposées pour remédier au problème de la commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. La difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrées, de sorties et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse ; et les techniques de commande classiques deviennent insuffisantes surtout dans les applications industrielles exigeant un couple important en basse vitesse [ELB 09].

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques qui nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Le principe du contrôle vectoriel permet de modéliser la MADA pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée ou le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit. A cet effet il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple [CHA 10- AZE 10].

Cependant, le développement des nouvelles technologies de semi-conducteurs et de convertisseurs électroniques ont facilité l'application de nouveaux algorithmes de commande sur le modèle de la machine à courant alternatif dans le repère de Park, avec l'orientation du flux. Ceux-ci permettent de découpler des grandeurs internes de la machine en régime transitoire et permanent. Et, donner une meilleure place dans le domaine de la conversion d'énergie en régime moteur avec le contrôle indépendant du flux et du couple et générateur avec le contrôle indépendant des puissances active et réactive [TOU 10]. Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle appliquée à la MADA.

2. Commande vectorielle

Le découplage entre le couple et le flux est nécessaire, il est assuré par l'application de la commande vectorielle [ROU 16]. Cette commande présente une importance majeure du fait que le couple et le flux de la machine sont contrôlés indépendamment, comme dans une machine à courant continu à excitation séparée. Les courants instantanés statoriques sont transformés dans un repère tournant, aligné au vecteur du flux rotorique, statorique, ou ce de l'entre-fer afin de produire deux composantes du courant, selon l'axe d (composante qui contrôle le flux), et celle de l'axe q (composante qui contrôle le couple), le flux et le couple sont deux variables qui seront découplées et commandées indépendamment.

La commande FOC (Field Oriented Control) présente deux méthodes distinctes l'une qui, en imposant une vitesse de glissement tirée de l'équation dynamique du flux rotorique afin d'assurer l'orientation du flux connue par IRFOC, et l'autre qui utilise l'estimation ou la mesure du flux pour obtenir l'amplitude et l'angle indispensable pour l'orientation du flux.

Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension ;
- commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d, q) :

- le flux rotorique ;
- le flux statorique ;
- le flux de l'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase) indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

Dans notre cas, nous nous intéressons à une commande en tension avec orientation du repère

- (d- q) suivant le flux statorique.

3. Principe de la commande vectorielle

Les machines à courant continu (MCC) occupent encore de nos jours la majeure partie du marché de la variation de vitesse et de la robotique. On utilise les machines à excitation série pour la traction électrique et à excitation séparée pour la robotique. Ces dernières ont une qualité intrinsèque : elles permettent un contrôle séparé du flux et du couple.

$$C_{em} = K_a \Phi(I_f) I_a$$

Où,

$\Phi(I_f)$: flux imposé par le courant d'excitation I_f ;

I_a : courant d'induit.

On remarque qu'à flux constant, le couple peut être réglé par I_a . La production du couple et la création de flux sont indépendants. Nous avons l'objectif d'un pilotage vectoriel [40].

La commande par orientation de flux, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Les deux composantes i_{rd} et i_{rq} sont censés être alors analogues respectivement au courant d'excitation et d'induit dans MCC.

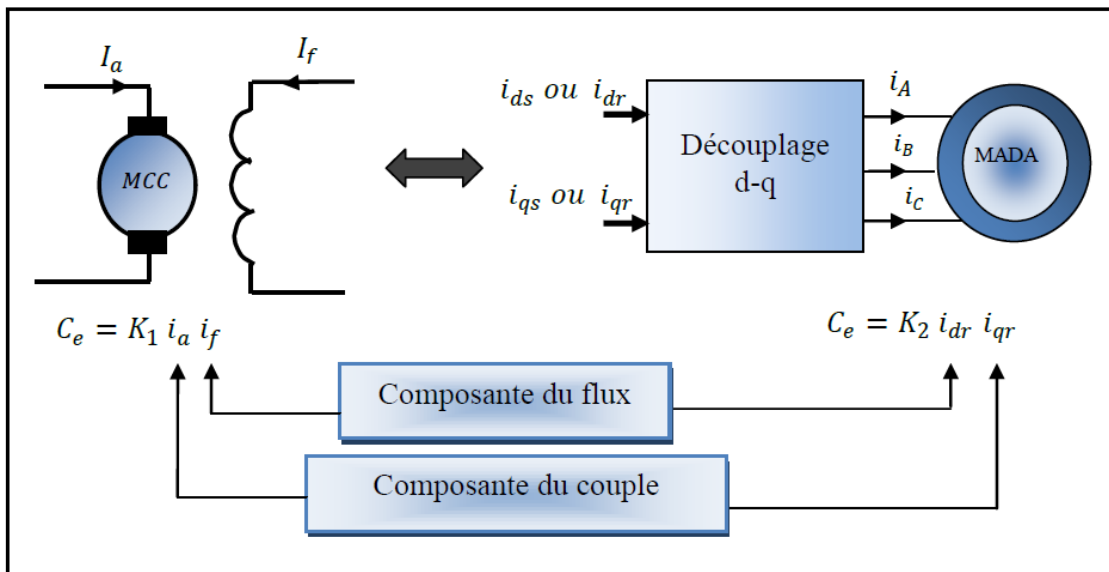


Figure. III.1: Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

3.1. Différents repères de référence

La commande vectorielle est basée sur le choix d'un repère de référence. On peut à priori choisir les axes de référence selon l'un des flux de la machine, à savoir le flux statorique, le flux rotorique ou le flux d'entrefer. Dans le cas où on oriente le flux dans la machine, au stator ou au rotor, suivant l'un des deux axes, d ou q, l'expression du couple sera le produit de ce flux par le courant en quadrature. Nous retrouvons ainsi le principe de la commande vectorielle des machines à courant alternatif.

Pour orienter le flux statorique, il faut choisir un référentiel (d,q) de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l'axe (o,d), soit:

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \text{ et } \Phi_{qs} = 0. \tag{III.1}$$

La figure (III.2) illustre le principe de l'orientation de flux statorique.

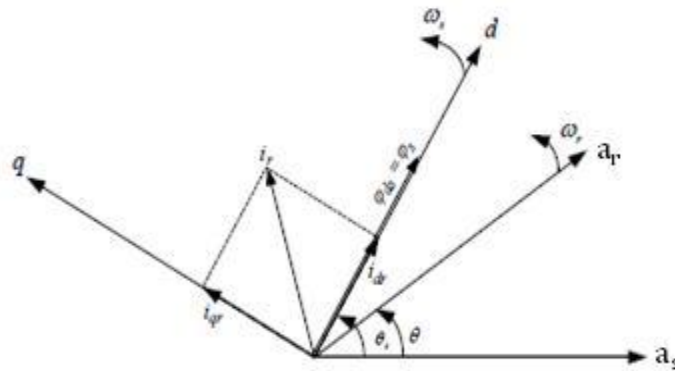


Fig III.2. Orientation du flux statorique.

$$\Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \tag{III.2}$$

A partir de l'équation du flux statorique (III.1) et suivant la condition d'orientation du flux, les courants statoriques s'expriment par :

$$I_{ds} = \frac{(\Phi_{ds} - M I_{dr})}{L_s} \tag{III.3}$$

En substituant (III.2) et (III.3) dans l'expression du couple où les deux composantes de courant rotorique interviennent, on obtient:

$$C_{em} = \frac{PM}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) = \frac{-PM}{L_s} \Phi_{ds} i_{qr} \quad (III.4)$$

D'après cette équation et pour Φ_{ds} constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant i_{qr} . Alors, le couple de la MADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

D'autre part, pour réaliser la loi de commande le flux rotorique est orienté suivant l'axe d. Dans ce cas, le flux Φ_r est aligné avec Φ_{dr} . Alors, on aura :

$$\Phi_{dr} = \Phi_r \quad \text{et} \quad \Phi_{qr} = 0 \quad (III.5)$$

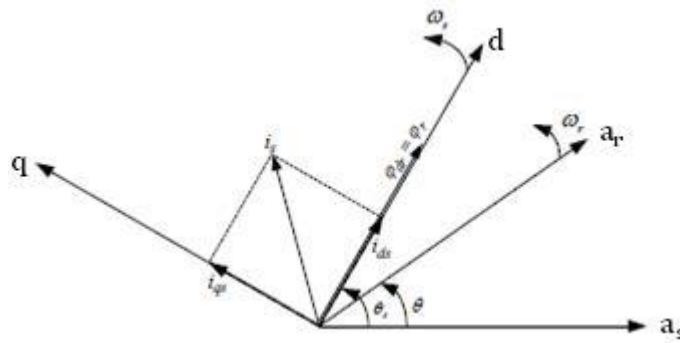


Figure III.3. Orientation du flux rotorique.

Comme $\Phi_{qr} = 0$ et à partir de la relation (III.5), on définit les courants i_{qr} , i_{qs} comme suit :

$$\begin{cases} i_{qr} = \frac{-M}{L_r} i_{qs} \\ i_{qs} = \frac{-L_r}{M} i_{qr} \end{cases} \quad (III.6)$$

Une relation entre la composante en quadrature du flux statorique et le courant I_{qr} peut être formulée. Ainsi, qu'une relation entre le couple électromagnétique et ce même courant sera défini ci-dessous:

$$\begin{cases} \Phi_{qs} = -\sigma \frac{L_s L_r}{M} i_{qr} \\ i_{ds} = \frac{\Phi_{dr}}{M} - \frac{L_r}{M} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

En considérant les expressions (III.6) et (III.7), l'équation du couple devient analogue à la machine à courant continu et peut être décrit comme suit:

$$C_{em} = PM (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) = -P \Phi_{dr} i_{qr} \quad (\text{III.8})$$

Ainsi, les équations (III.7) et (III.8) permettent, pour un point de fonctionnement défini par un couple électromagnétique C_{em} , de réguler les courants i_{qs} et i_{qr} .

Dans ce mémoire, nous développons la commande vectorielle indirecte de la MADA en orientant l'axe (o, d) du repère de Park suivant le flux statorique.

4. MODELE DE LA MADA A FLUX STATORIQUE ORIENTE

Dans cette commande, la machine est conçue de telle façon à ce que le flux statorique dans le repère de Park suivant l'axe q soit nul. Ce choix est justifié par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau de tension et de fréquence constante.

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Avec : un flux statorique direct constant $\Phi_{sd} = \Phi_s$

Et un flux statorique en quadrature orienté $\Phi_{sq} = 0$.

Ces équations peuvent être simplifiées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + w_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - w_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + w_r \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.10})$$

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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = w_s \cdot \Phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - w_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + w_r \Phi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{III.11})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sd} = \Phi_s = L_S I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{array} \right. \quad (\text{III.12})$$

4.1 RELATIONS ENTRE LES COURANTS STATORIQUES ET ROTORIQUES

A partir des équations des composantes directes et en quadrature du flux statorique les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques seront:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sd} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{array} \right. \quad (\text{III.13})$$

4.2 RELATIONS ENTRE LES PUISSANCES STATORIQUES ET COURANTS ROTORIQUES

Dans un repère biphasé, les puissances actives et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme:

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

En remplaçant les courants statoriques directs et en quadratures par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{W_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Il ressort de l'expression (III. 16) 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 q et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à

une constante près $\frac{V_s^2}{W_s \cdot L_s}$ imposée par le réseau.

4.3 RELATIONS ENTRE LES TENSIONS ET COURANTS ROTORIQUES

A partir du système d'équation (III. 12), les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{V_s \cdot M}{W_s \cdot I_s} \\ \Phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rd} = R \cdot I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R \cdot I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{array} \right. \quad (\text{III.18})$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{array} \right. \quad (\text{III.19})$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rd} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \cdot \frac{V_s \cdot M}{L_s} \end{array} \right. \quad (\text{III.20})$$

V_{rd} Et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

Avec :

$\left(\frac{V_s \cdot M}{L_s} \right)$: Le terme de couplage entre les deux axes;

$g \cdot \left(\frac{M^2}{L_s} \right)$ Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

4.4 ETABLISSEMENT DES ANGLES NECESSAIRES AUX TRANSFORMATIONS

Pour déterminer l'angle de transformation de Park pour les grandeurs statoriques, une méthode simple consiste à appliquer la matrice de Concordia aux tensions statoriques pour extraire la phase θ_s que forme le vecteur de tension avec l'axe de la première phase du stator.

Afin d'aligner le flux statorique avec l'axe d , nous retranchons $\frac{\pi}{2}$ de cet angle. Cette méthode est fiable si les tensions statoriques ont des fréquences stables avec peu de fluctuations pour pouvoir effectuer une mesure précise.

Le rotor forme un angle θ_m avec la phase A du stator, l'angle θ_r nécessaire aux transformations des grandeurs rotoriques sera donc :

$$\theta_r = \theta_{sn} - \theta_m.$$

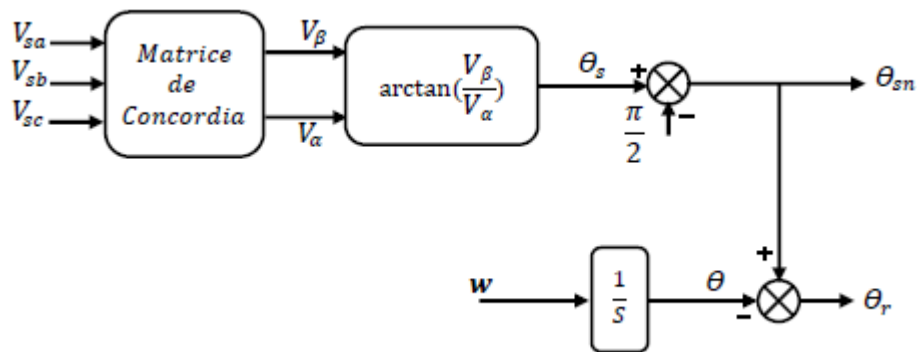


Figure III-4 : Calcul des angles de transformations.

4.5 TYPE DE REGULATEURS UTILISES

Pour la réalisation d'une commande vectorielle en puissances active et réactive de la MADA cas génératrice, Il faut utiliser des régulateurs Proportionnels Intégrales (PI), à cause des avantages qu'ils apportent (rapidité, simplicité, autorisant la fréquence du MLI, etc...).

Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances active et réactive de références et les puissances active et réactive mesurées.

Dimensionnement des régulateurs PI seront calculés par la méthode de compensation de façon à obtenir des performances les plus élevées possibles qui seront présentées dans (*l'annexe B*).

5. LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE LA COMMANDE VECTORIELLE

5.1 COMMANDE DIRECTE

Cette technique consiste à réguler directement et indépendamment les puissances statoriques active et réactive produites à celles de références, en utilisant un seul régulateur sur chaque axe. Les tensions de commande sont la correction des erreurs des

puissances par des régulateurs PI. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante:

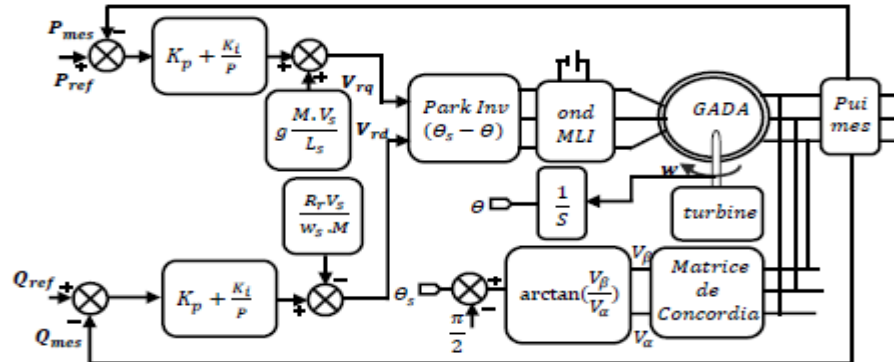


Figure III-5 : Schéma bloc de la structure de commande directe par orientation du flux statorique.

5.2 COMMANDE INDIRECTE

Cette technique est basée sur deux structures: l'une utilise une boucle régulant le courant, alors que l'autre est basée sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

5.3 COMMANDE INDIRECTE SANS BOUCLE DE PUISSANCE

Cette commande ne consiste pas à réguler directement les puissances comme la commande précédente, mais elle est basée sur la régulation indirecte des courants rotoriques mesurées qui seront asservis avec les courants de références déjà déterminés par les puissances statoriques de références imposés à la machine.

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot p_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{w_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases}$$

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe, Ils sont identiques pour chaque axe. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure ci-dessous.

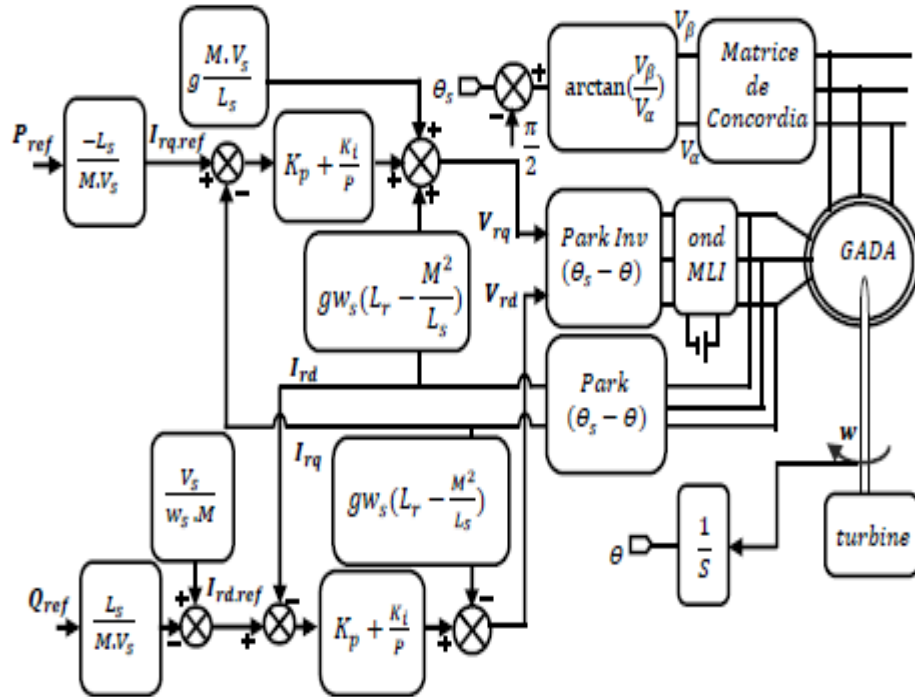


Figure III-6 : Schéma bloc de la structure de commande indirecte sans boucle de puissance.

3.6.2.2 COMMANDE INDIRECTE AVEC BOUCLE DE PUISSANCE

Cette commande consiste à réguler les puissances statoriques et les courants rotoriques en cascade, pour cela nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, l'une réglant la puissance et l'autre le courant. Ce type de régulation donne une bonne dynamique et une erreur statique nulle. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure suivante:

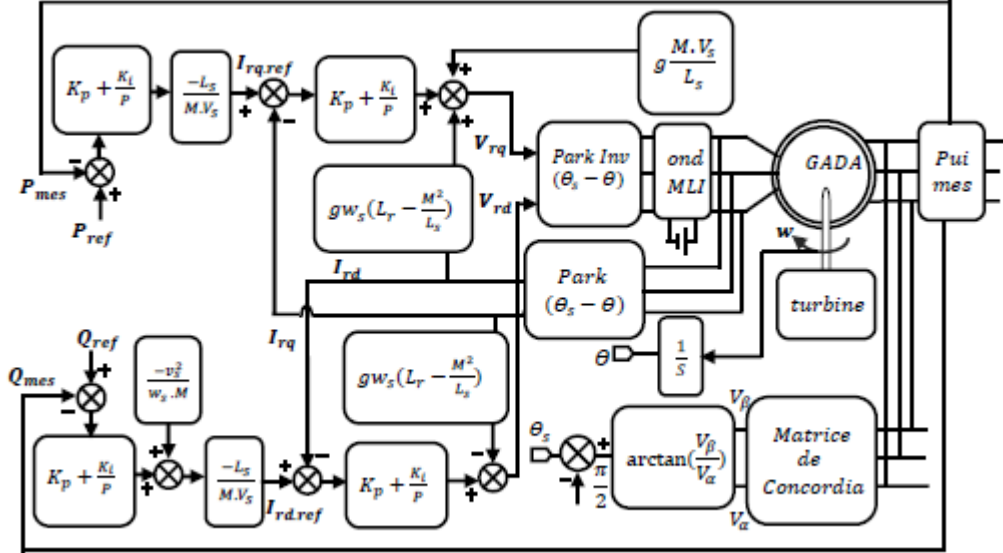


Figure III-7 : Schéma bloc de la structure de commande indirecte avec boucle de puissance.

6. MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION GADA

Le modèle utilisé est le modèle à flux statorique orienté présenté précédemment dont les grandeurs électriques sont toutes exprimées dans un repère fixe lié au stator au repère (d, q) . Le modèle d'état est donné comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \Phi_s \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (III.21)$$

✓ Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:

$$\begin{cases} P_s^{ref} = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rq}^{ref} \\ Q_s^{ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{rd}^{ref} \end{cases} \quad (III.22)$$

$$\begin{cases} I_{rq}^{ref} = -\frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot P_s^{ref} \\ I_{rd}^{ref} = \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} - \frac{L_s}{V_s \cdot M} \cdot Q_s^{ref} \end{cases} \quad (III.23)$$

❖ Equations des dérivées de courants rotoriques:

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = (V_{rd} - R_r \cdot I_{rd} + g \omega_s \cdot L_r \sigma \cdot I_{rq}) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = (V_{rq} - R_r \cdot I_{rq} + g \omega_s \cdot L_r \sigma \cdot I_{rd} - g \omega_s \cdot \frac{M V_s}{\omega_s \cdot L_s}) \cdot \frac{1}{L_r \cdot \sigma} \end{cases} \quad (III.24)$$

Simulations de Commande vectorielle d' un générateur asynchrone à double alimentation.

A l'aide du logiciel MATLAB, les résultats de simulation obtenus va permettre de montré les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique appliqué a une machine asynchrone à double alimentation, le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min, pilotée par un onduleur a deux niveaux. La tension de bus continu d' onduleur égale à 600V, la fréquence de la porteuse égale à 1KH, et son amplitude égale à 400V, et les paramètres de la machine sont donné dans l'annexe(A).

- ✓ A t=4s : échelon négatif pour la puissance active (Ps ref passe de -2 à -6KW).

Résultats obtenus

- ✓ Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives est réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe

i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

- ✓ Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

7. RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE

Les figures ci-dessous montrent les performances des commandes vectorielle (indirecte sans boucle de puissance), et par mode glissant des puissances active et réactive statorique appliquée à la MADA. Cet essai est réalisé dans les conditions suivantes :

- ✓ machine connectée au réseau;
- ✓ machine entraînée à une vitesse fixe $1440 \frac{tr}{min}$
- ✓ entre les instants $t = 1s$ et $t = 3s$: échelon négative pour la puissance active (P_{sref} passe de 0 à $-3000W$);
- ✓ entre les instants $t = 2s$ et $t = 4s$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à $1000 VAR$).

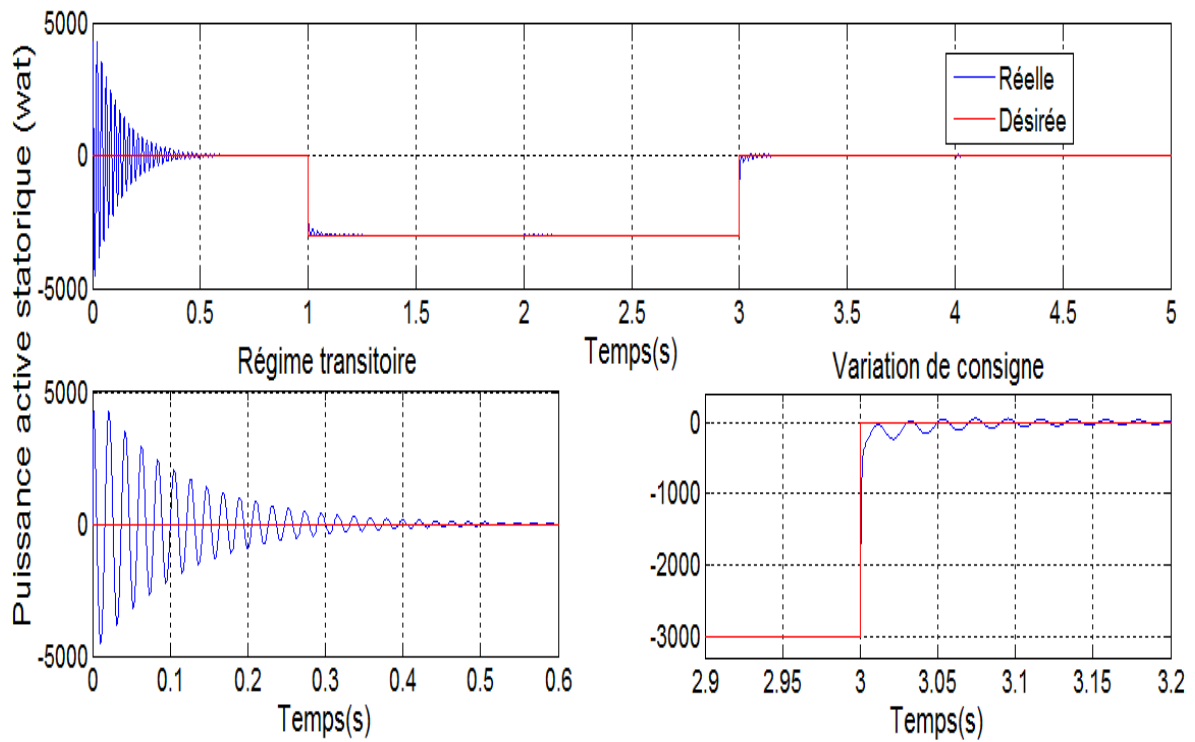


Figure III-8 : Puissance active statorique pour commandes vectoriel avec un zoom.

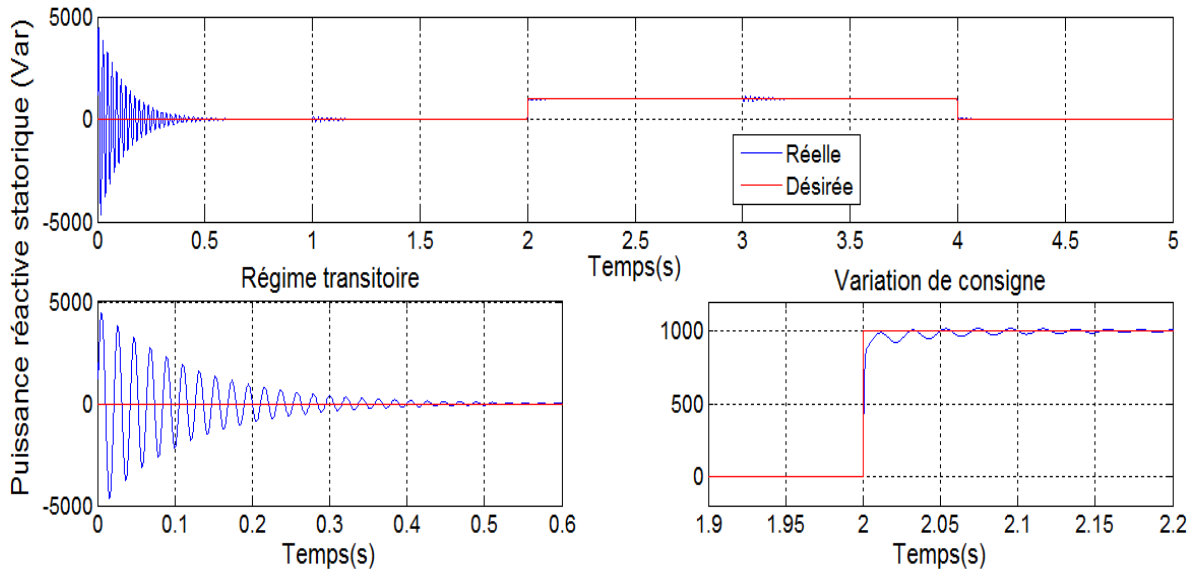


Figure III-9 : Puissance réactive statorique pour commandes vectorielles avec un zoom.

7.1 INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après les courbes des figures III-8 et III-9 qui représentent les résultats de simulation, il est bien clair que les deux techniques de commande permettent un découplage parfait entre les deux composantes de la puissance statorique (active et réactive).

Les résultats obtenus par la simulation, montrent clairement que l'utilisation des deux commandes arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées, mais avec une amélioration remarquable des résultats obtenus par mode glissant par rapport à la commande vectorielle à savoir :

- ✓ une réponse rapide pour le régime transitoire et pour le changement des consignes;
- ✓ une minimisation maximale d'erreur entre les valeurs de consignes et celles mesurées (Presque nulle);
- ✓ une réduction importante des oscillations des puissances.

8. Conclusion

Dans ce chapitre on a abordé la commande vectorielle, les différents repères d'orientation du flux et le principe de cette méthode. La méthode du flux orienté 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.

On a utilisé la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique et la régulation des courants rotoriques ainsi que la vitesse de rotation de la machine.

La commande vectorielle de la MADA que nous avons présentée donne des performances satisfaisantes. Toutefois le régulateur PI ne permet pas d'assurer, dans tous les cas, de bonnes performances et surtout, si les paramétriques de la machine sont variables.

Chapitre IV :
COMMANDE PAR
LOGIQUE FLOU
ACTIVE ET
REACTIVE
GENERER

1. Introduction

La logique floue, ou plus généralement le traitement d'incertitudes, est l'une des classes de l'intelligence artificielle.

La logique floue est une branche des mathématiques, basée sur la théorie des probabilités et des concepts flous. A ce titre, toute une série de notions fondamentales a été développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base de la logique floue.

Dans ce chapitre nous présentons les approches de conception d'un régulateur flou (RF). Les notions de base nécessaire à la compréhension de régulation floue seront rappelées. Nous synthétisons le choix possible pour les nombreux paramètres du contrôleur à logique flou (CLF) utilisé pour le réglage des courants rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation.

2. Historique de la logique floue

La logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité actuellement. En réalité, elle existait déjà depuis longtemps et nous pouvons diviser son histoire de développement en trois étapes. Ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit à l'évolution de la «logique à valeurs multiples» ou «logique floue» dans les années 1920 et 1930. En 1937, le philosophe Max Black a appliqué la logique continue, on introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0, 1\}$, pour classer les éléments ou symboles. Il a dessiné la première fonction d'appartenance «Membership function».

La théorie des ensembles flous a été établie en 1965 par le professeur Lofti A. Zadeh de l'université de Californie (Berkeley) dans son article intitulé "Fuzzy Set". A cette époque, la théorie des ensembles flous n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0), ont commencé 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 [0 et 1]. Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non-techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts et afin de leur donner l'aptitude de prise de décision.

En 1975, Ebrahim Mamdani expérimentait la théorie des ensembles flous énoncée par Zadeh sur un système de commande dans le but de commander une machine à vapeur et des chaudières, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Le fonctionnement du système de commande se fonde sur l'article de Lotfi Zadeh. Il s'en suit une émergence des applications en Europe, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par

la société Smidt-Fuller en 1978 . Grâce au chercheur japonais Michio Sugeno, la logique floue fut implantée au Japon en 1985. Dès lors, Les sociétés japonaises commencent à utiliser cette dernière dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande.

À partir de 1990, les fabricants intègrent de plus en plus la technologie de la logique floue dans les appareils de grande consommation (appareils de photos, vidéo, ...). Sa mise en œuvre est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement.

3. COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE

Cette commande est une solution attractive pour obtenir des résultats performants dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable basés sur la machine asynchrone double alimentation. Nous allons appliquer cette commande non linéaire pour contrôler la qualité de l'énergie produite. Pour ce faire, on va utiliser la structure de la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance tout en remplaçant les régulateurs PI par des régulateurs flous.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux fondements de la logique floue où nous exposerons la notion d'ensembles flous, les fonctions d'appartenances, les variables linguistiques, et les opérateurs employés dans ce type de logique, puis décrire la structure de la commande floue. Nous expliquerons les notions de fuzzification d'inférences floues et de défuzzification pour manipuler une commande adéquate pour le réglage indépendant des puissances.

4. NOTIONS DE BASE DE LA LOGIQUE FLOUE

Cette section n'a pas pour but de donner un état de lieux complet de la logique floue, mais uniquement fourni les quelques notions de base de la logique floue d'une manière abrégée.

4.1 ENSEMBLES FLOUS

Dans la théorie classique des ensembles, ces derniers sont définis par une fonction caractérisée par un élément appartient (1), et un élément n'appartient pas (0) ; par contre un ensemble flou est défini sur un univers de discours X , et par une fonction d'appartenance (μ) qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1. Il est permis qu'une chose appartienne partiellement à un certain ensemble; ceci s'appelle le degré d'appartenance.

Dans un domaine continu, les ensembles flous sont définis analytiquement par leurs fonctions d'appartenance.

4.2 FONCTIONS D'APPARTENANCES

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques (x), il faut les soumettre à une définition mathématique appelée fonction d'appartenance ($\mu(x)$) qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles (A_i). Leurs expressions analytiques sont définies de la manière suivante :

- ❖ la fonction triangulaire: définie par trois paramètres a , b et c , soit :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & c \leq x \end{cases} \quad \text{ou} \quad \mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

- ❖ la fonction trapézoïdale: définie par quatre paramètres a , b , c et d soit :

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

- ❖ la fonction en cloche: définie par deux paramètres, x_0 qui détermine la position du sommet

($\mu = 1$) et a qui impose la largeur du domaine, soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2}$$

- ❖ la fonction gaussienne: définie par deux paramètres σ , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2.\sigma^2}\right)$$

- ❖ la fonction sigmoïde: définie par deux paramètres a , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot (x - x_0))}$$

❖ la fonction singleton :

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x_0 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

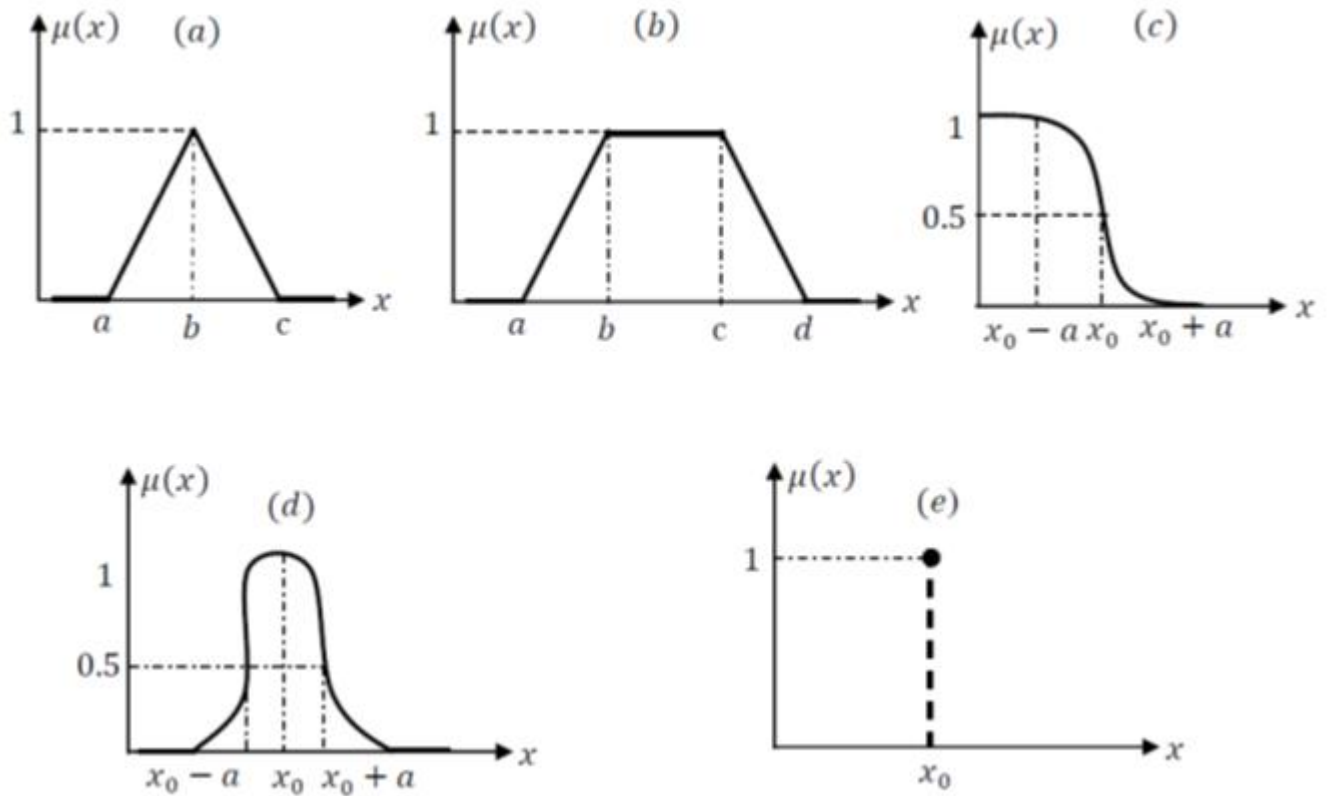
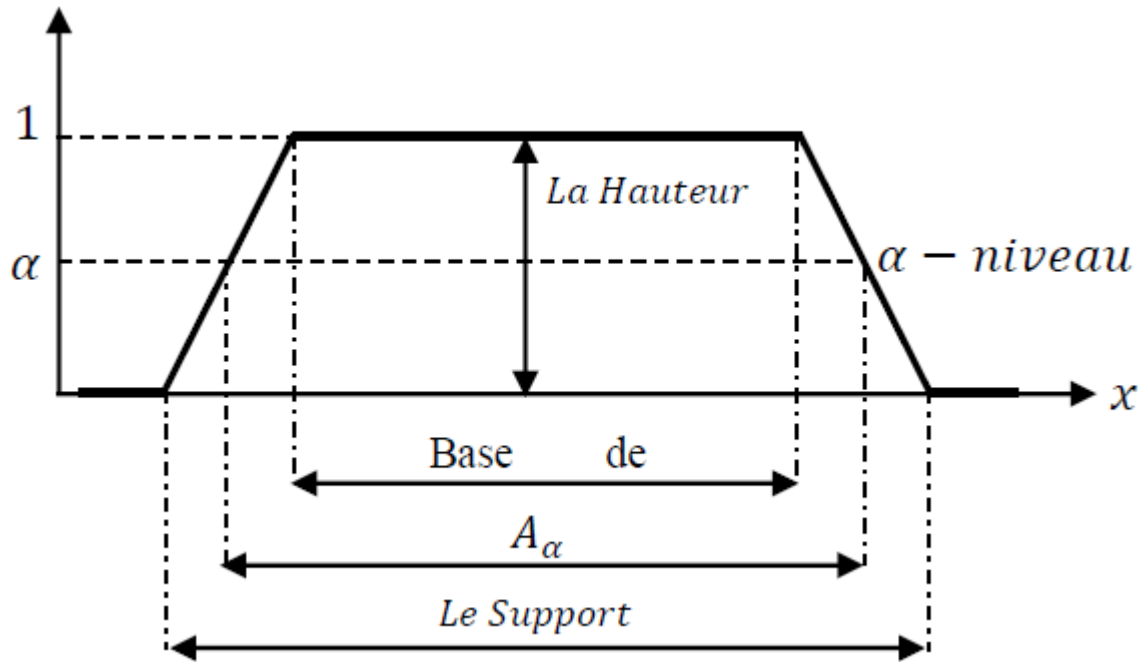


Figure (IV.1) : Formes des fonctions d'appartenances usuelles. (a) - Fonction triangulaire, (b) - Fonction trapézoïdale, (c) - Fonction sigmoïdale, (d) - Fonction gaussienne, (e) - Fonction singleton.

4.3 CARACTERISTIQUES 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) [TAL 14, MOK 10].



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 :

$$N(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$$

❖ **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 : $S(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$

❖ **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 :

$$H(A) = \max(\mu_A(x) / x \in X)$$

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

$$|A| = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)$$

Pour un domaine continu, la cardinalité sera définie par :

$$|A| = \int_x \mu_A(x) dx$$

❖ **Couple de niveau α** : On appelle *couple de niveau α* ou *α -coupe* de 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 :

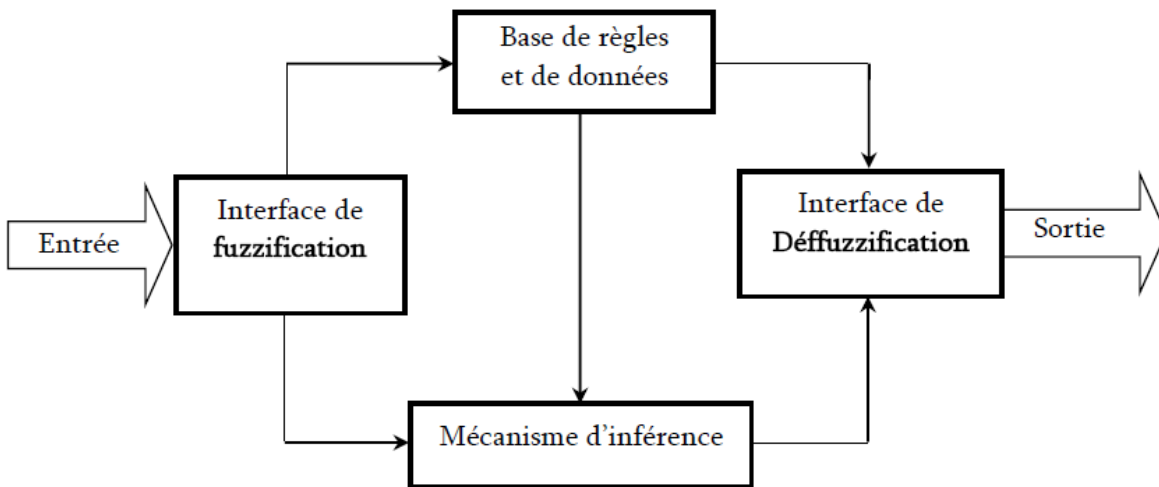
$$A_\alpha = \{X / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad x \in [0 \quad 1]$$

5. STRUCTURE D'UNE COMMANDE A LOGIQUE FLOUE

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.3)



Figure(IV.3) : Structure d'un système de contrôle flou.

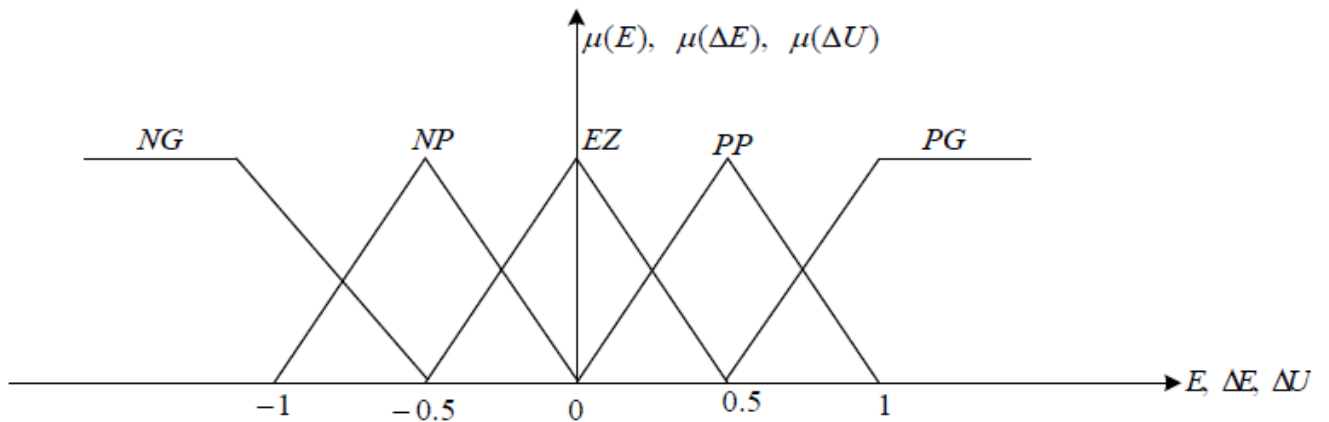
5.1 Fuzzification

Cette étape s’occupe de la transformation des valeurs numériques aux entrées en valeurs floues ou variables linguistiques. Les variables d’entrées qui sont l’erreur de vitesse et sa variation sont soumises à une opération de fuzzification et par conséquent converties à des ensembles flous.

L’univers de discours normalisé de chaque variable du régulateur (l’erreur, sa variation et la variation de la commande) est subdivisé en cinq ensembles flous. Ceux-ci sont caractérisés par les désignations standards suivantes :

- Négatif grand noté *NG* ;
- Négatif petit noté *NP* ;
- Environ de zéro noté *EZ* ;
- Positif petit noté *PP* ;
- Positif grand noté *PG* ;

Pour les fonctions d’appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme le montre la figure suivante :



Figure(IV.4) : Fonctions d’appartenance des différentes variables du régulateur flou.

5.2 Base de règles

Le système de contrôle flou comprend un nombre de règles d’inférence reliant les variables floues d’entrée d’un système aux variables floues de sortie de ce système. Ces règles se présentent sous la forme usuelle suivante :

Si condition 1 **Et/Ou** condition 2 (**Et/Ou**), etc ... **Alors** action sur les sorties.

L’établissement de ces règles est généralement basé sur la connaissance du problème et sur l’expérience de l’opérateur qui peut fixer le nombre de sous-ensembles, leurs fonctions

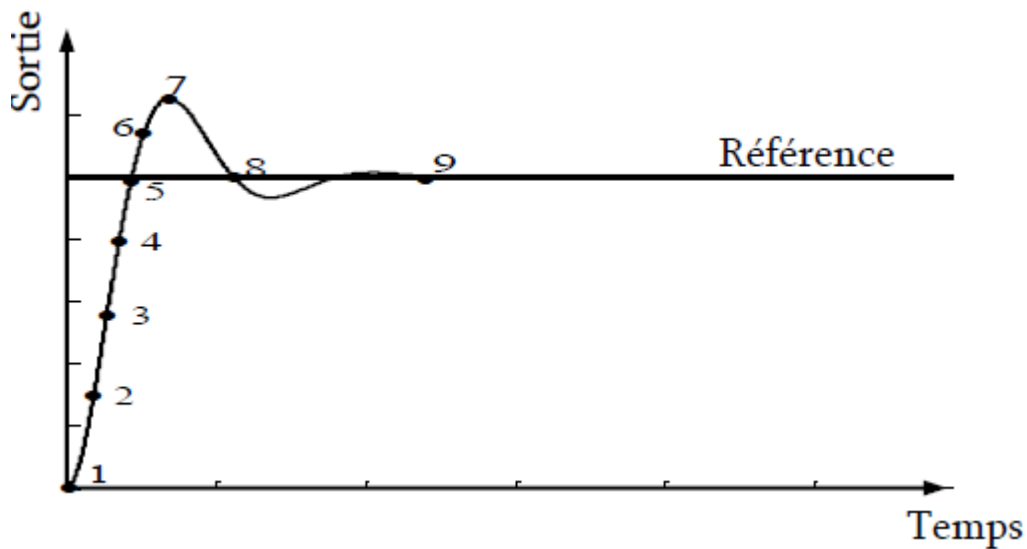
d'appartenance ainsi que les variables linguistiques. Ils existent plusieurs présentations de la base de règles telles que la description linguistique, symbolique ou par une matrice d'inférence. En résumé, la base de règle est constituée d'une base de données qui contient les définitions des sous-ensembles flous, leurs fonctions d'appartenance et leurs univers de discours pour chacune des variables intervenant dans le régulateur.

L'extraction de ces règles peut être effectuée en utilisant la réponse indicielle d'un système du deuxième ordre en analysant son comportement dynamique et en suite de formuler les règles afin que la réponse coïncide avec la référence (figure xxx).

Dans cette courbe on peut distinguer quatre régions : la montée, le dépassement, l'amortissement et la région de régime permanent.

Si par exemple, pour un système représenté par $ep = (Pref - Ps)$ et sa variation

$\Delta ep = \Delta(Pref - Ps)$, on peut constater que l'erreur ep et sa variation Δep sont les grandeurs les plus significatives pour analyser le comportement du système.



Figure(IV.5) : Etude du comportement du système

5.3 Mécanisme d'inférence floue

L'inférence floue est le processus de formulation de la relation entre les entrées et les sorties par logique floue. Cette relation offre une base avec laquelle la décision est prise par le système flou. L'inférence floue fait appel alors aux concepts expliqués dans les sections précédentes, à savoir : fonctions d'appartenance, les opérateurs flous et les règles floues.

Comme on l'a mentionné, il existe plusieurs possibilités pour réaliser les opérateurs flous qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. On introduit la notion de mécanisme ou méthode d'inférence, qui dépend des relations utilisées pour réaliser les différents opérateurs dans une

CHAPITRE IV COMMADE PAR LOGIQUE FLOU ACTIVE ET REACTIVE GENERER

inférence, permettant ainsi un traitement numérique de cette dernière. Pour le réglage par 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.

Opérateurs 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): Méthode usuelles de l'inférence floue.

5.4 Défuzzification

Elle consiste à:

- ❖ Transformer les valeurs de la sortie comprises dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation.
- ❖ Extraire de la sortie de vérité la valeur numérique de la sortie.

On distingue trois méthodes différentes : celle de maximum, celle de la moyenne de maxima et celle du centre de gravité (ou centriode).

6. APPLICATION DE LA COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE A LA MADA

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'appartenance. 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 :

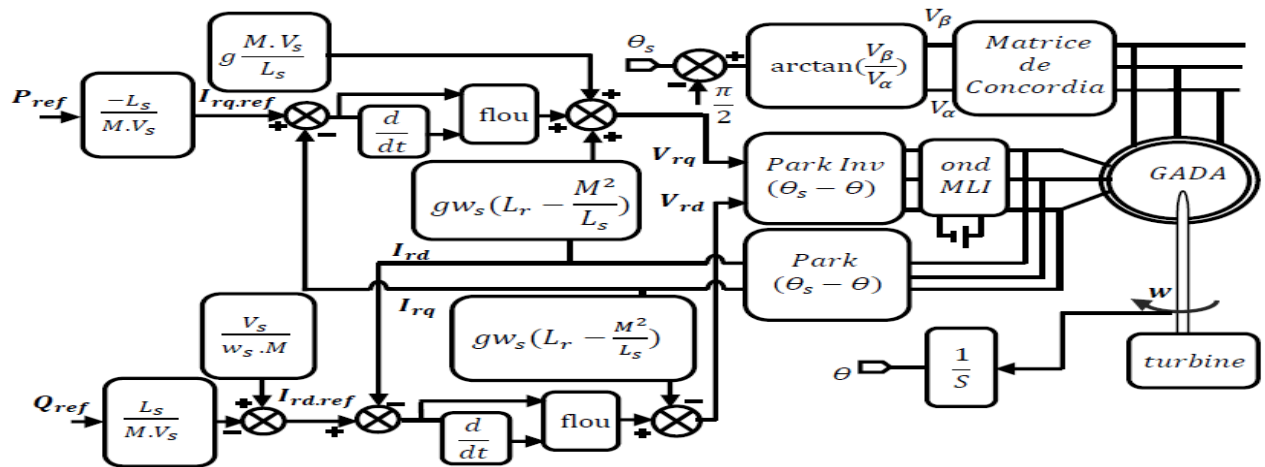
L'erreur de courant

$$e_I = I_{rq}^{ref} - I_{rq}$$

La variation de l'erreur de courant

$$\Delta e_I = e_I(k) - e_I(k-1)$$

Le schéma bloc de la commande avec les régulateurs flous est illustré par la figure cidessous



Figure(IV.6) : Schéma bloc de la structure de commande flou.

7. Avantages et inconvénients de la commande flou

7.1 Avantages

- ❖ La théorie est simple et s'applique à des systèmes complexes.
- ❖ Pas de modèles mathématiques requis du procédé à asservir.
- ❖ Robustesse de la commande floue vis à vis des incertitudes.
- ❖ Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.

7.2 Inconvénients

- ❖ Technique de réglage essentiellement empirique.
- ❖ Performances dépendent de l'expertise.
- ❖ Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse..(Difficultés de certification dans le transport, espace...)

8. Description du contrôleur flou de puissance

Le contrôleur développé utilise le schéma proposé par Mamdani, il est composé:

- ❖ Des facteurs de normalisation associent à l'erreur e , à sa variation Δe et à la variation de la commande (Δ);
- ❖ D'un bloc de fuzzification de l'erreur et sa variation;
- ❖ Des règles de contrôle flou;
- ❖ La stratégie de commande est présentée par une matrice d'inférence du même type que celle présentée dans le Tableau (IV.2).
- ❖ D'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique.

la figure(IV.7) montre les différentes fonctions d'appartenance des entrées, Δe et de la sortie u respectivement.

Les sous-ensembles d'appartenance floue ont été notés comme suit :

Z : Zéro

NTG : Négative Très grande

NG : Négative grand

NM : Négative moyenne

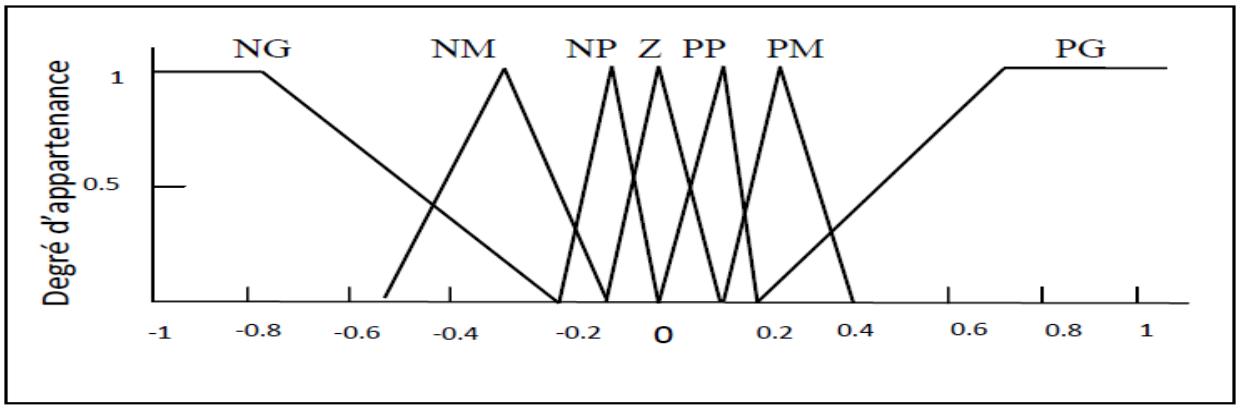
NP : Négative petit

PTG : Positive très grande

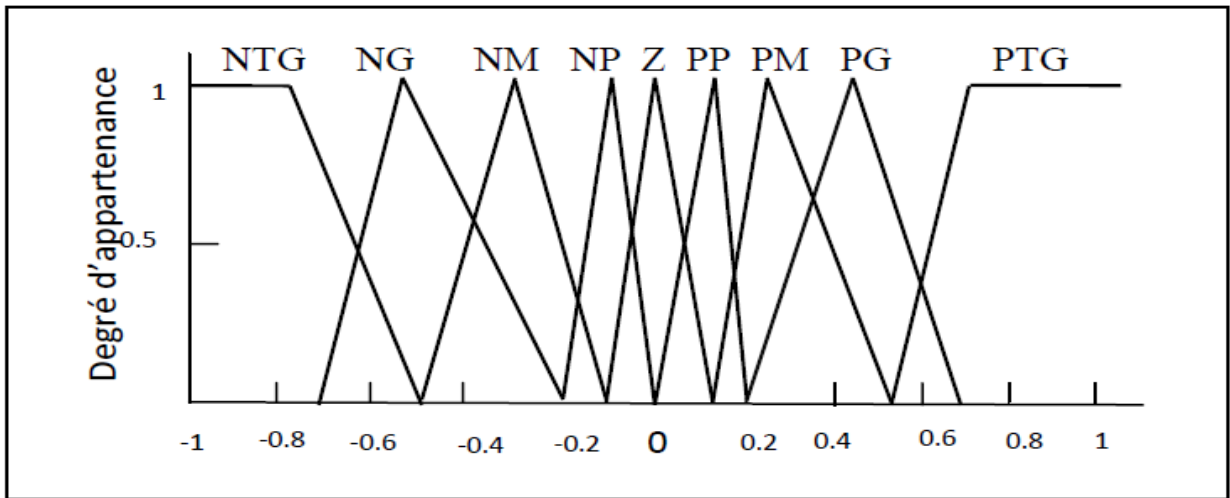
PG : Positive grand

PM : Positive moyenne

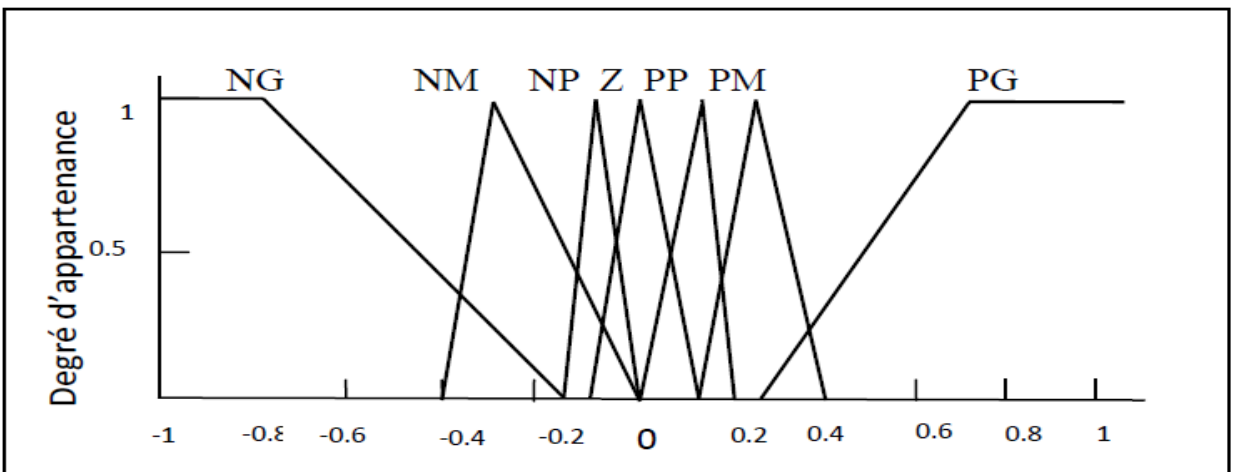
PP : Positive petite



e



u



Δe

Figure (IV.7) :Fonction d'appartenance des entrées (e , Δe) et de la sortie(u).

		e						
		NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
Δe	NG	NTG	NTG	NTG	NG	NM	NP	Z
	NM	NTG	NTG	NG	NM	NP	Z	PP
	NP	NTG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
	Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	Z	PP	PM	PG	PTG
	PM	NP	Z	PG	PTG	PG	PTG	PTG
	PG	Z	PP	PM	PG	PTG	PTG	PTG

Tableau (IV.2) : Matrice d'inférence des règles floues.

9. RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME POUR UNE VITESSE FIXE

Afin de mieux apprécier les différences entre les commandes proposées dans la configuration du système éolien, la première série de simulations est effectuée sans convertisseurs. Les consignes des puissances actives et réactives sont données sous formes d'échelons, alors que la machine est entraînée à vitesse fixe. Cet essai est réalisé avec les conditions suivantes :

- ❖ Machine connectée au réseau.
- ❖ Machine entraînée à une vitesse fixe 1440 *tr/min*.
- ❖ Entre les instants $t = 1s$ et $t = 3s$: échelon négatif pour la puissance active (P_{sref} passe de 0 à $-3000W$)

Entre les instant $t = 2s$ et $t = 4s$: échelon positif pour la puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 à 1000 VAR)

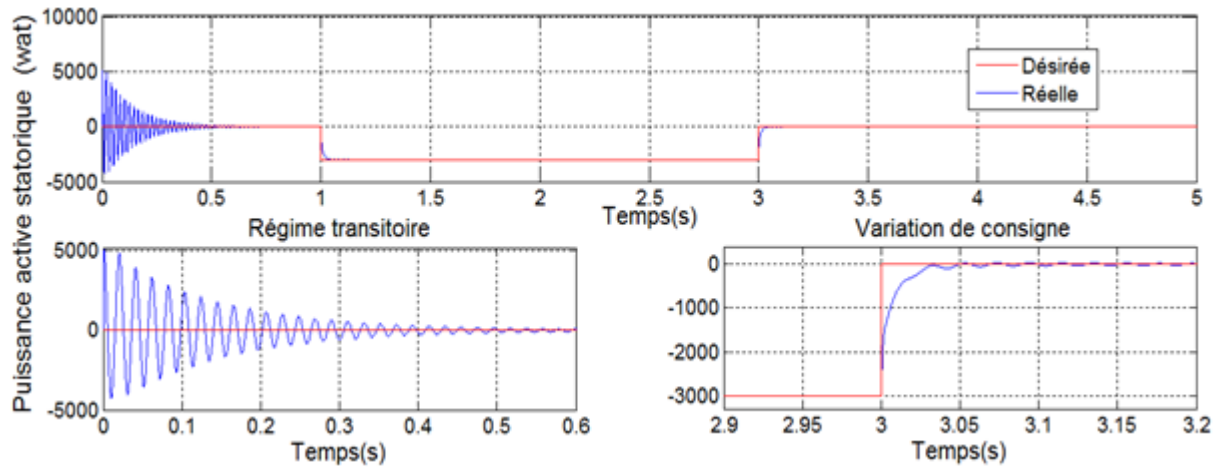


Figure (IV.8) : Puissance active statorique avec zoom

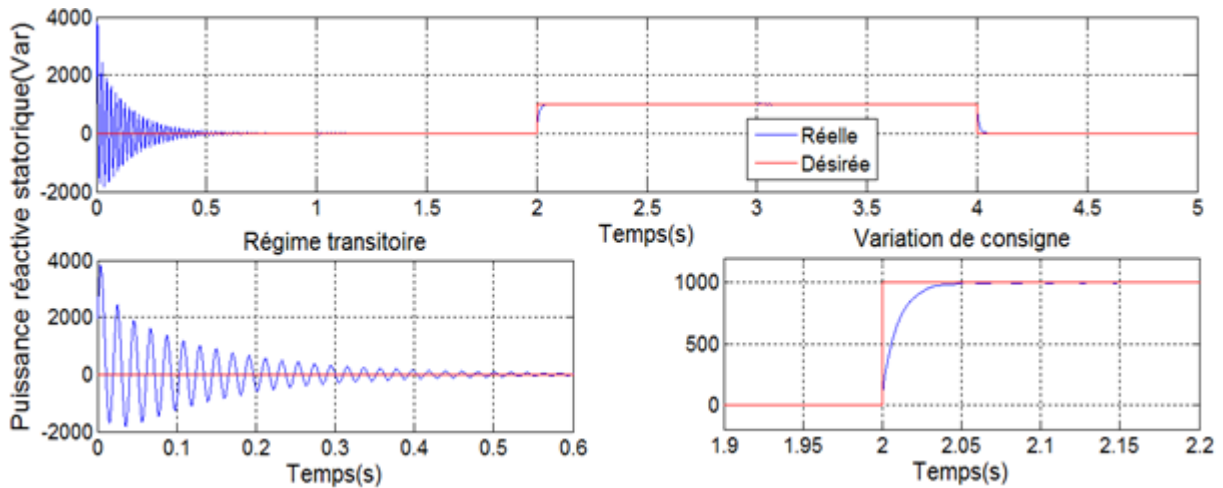


Figure (IV.9) : Puissance réactive statorique avec zoom

10. Conclusion

Dans ce travail, en premier lieu, nous sommes intéressé à la commande par la logique floue, où nous avons présenté les notions théoriques de la logique floue, exposé l'ensemble flou, les fonctions d'appartenance, les variables linguistiques, et les opérateurs employés dans ce type de logique; par la suite, nous avons présenté la structure de la commande floue composée des notions de fuzzification, d'inférences floues et de défuzzification pour synthétiser une commande floue à sept fonctions d'appartenance pour le réglage indépendant des puissances générées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette mémoire concerne l'étude, la modélisation et la commande d'un système de production d'énergie éolienne. Pour cela, une modélisation des différents composants de ce système a été menée. Ces modèles ont été utilisés pour l'élaboration de deux techniques de commandes pour assurer un contrôle précis et continu des puissances statoriques générées tout en garantissant une stabilité, une rapidité de poursuite avec une erreur statique nul. Cela a permis d'obtenir un rendement élevé du système et une qualité de production optimale.

Cette étude théorique concerne la présentation de la MADA ou on a vu ces différentes configurations pour application moteur ainsi que son fonctionnement en génératrice ou la conversion de l'énergie éolienne à base d'une MADA et de plus en plus importante. La configuration la plus utilisée est celle à rotor alimenté par un convertisseur et le stator est directement lié au réseau électrique, On a abordé le principe qui régit le fonctionnement de cette machine ainsi que les différentes stratégies de commandes.

La modélisation est un passage obligatoire pour concevoir des systèmes de commande performants et adaptés aux variateurs de vitesse. Elle permet de simuler la machine et d'en déduire les lois de commande en manipulant les équations décrivant son comportement de machine.

Afin de présenter le comportement de la MADA lors du fonctionnement, nous avons utilisé la transforme de Park pour donner une représentation mathématique de la machine dans le plan biphasé, le modèle a été simulé et validé.

Cette machine présente la complexité de commande à cause du couplage non linéaire existant entre le flux magnétique et le couple moteur, qui est plus complexe à mettre en œuvre que celui d'un moteur à courant continu. La présentation de la technique de commande vectorielle appliquée au flux statorique de la MADA munie d'un réglage de vitesse PI classique à été amplement présentée. Les performances de la commande vectorielle ont été montrées par des résultats de simulation. Enfin, on a donné un rappel sur les notions de base de la théorie de la commande par la logique floue, puis on a appliqué cette commande sur la même structure de celle de la commande vectorielle avec un remplacement des régulateurs PI par des régulateurs flous. la loi de répartition de puissance, la loi de commande en vitesse ainsi que les plages de variations des fréquences du stator et du rotor sont illustrées et discutées

BIBLIOGRAPHIE

- [FAR 14] Mohammad Farshadnia, Seyed Abbas Taher, « *Current-based direct power control of a DFIG under unbalanced grid voltage* ». Electr Power Energy and Syst, November 2014.
- [HAN 12] Hany M. Hasanien, S.M. Muyeen, « *Speed control of grid connected switched reluctance generator driven by variable speed wind turbine using adaptive neural network controller* ». Electrical Power and Energy Systems, March 2012.
- [HAC 12] Fatma Hachicha, Lotfi Krichen, « *Rotor power control in doubly fed induction generator wind turbine under grid faults* ». Energy. 1, August 2012.
- [TAR 15] Mr. TARFAOUI BOUMEDIENE « *Commande par mode Flou Glissant de la Machine Asynchrone Double Alimentée utilisée en Aérogénérateur* » 19 Octobre 2015
- [PAU 04] V. Paul-Etienne, « *Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation* », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [AKK 10] Akkari.N, « *contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation* », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [DEN 10] Dendouga.A, « *contrôle de la puissance active et réactive de la machine à double Alimentation (DFIM)* », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna Algérie, 2010.
- [AGG] Aggoun Gania, « *étude qualitative de l'association convertisseur machine pour L'entraînement électrique d'un système de génération électrique*», Thèse de Magistère de l'université Tizi-Ouzou, Algérie.
- [LIN] Ling Peng, « *Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension*», Thèse de Doctorat de l'école centrale de Lille.
- [SEJ 06] Sejir Khojet el Khil, « *Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)*», Thèse de doctorat de l'institut national Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [ELB09] Elbia Youcef, « *Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté*», Thèse de Magister en électrotechnique de l'université de Batna, 2009.
- [ARE 05] S.Areski, « *Contribution à l'étude et la commande d'une machine asynchrone double alimentée par onduleur multiniveaux*», Thèse de Magister de l'université Houari Boumediene, 2005 étoil.

BIBLIOGRAPHIE

- [Man.02] J. F Manwell, J. G. McGowan, A. L Rogers, Wind Energy Explained Theory, Design and Application, John Wiley & Sons Ltd, England, 2002.
- [Mul.02] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, *Etat de l'art des aérogénérateurs*, Ouvrage collectif « L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables », Ed. NOVELECT - ECRIN, mai 2002.
- [Hau.06] E. Hau, Wind turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics,"2nd ed., Edition Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [Hei.06] S. Heier, Grid integration of wind energy conversion systems, Deuxième édition, John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex (UK), 2006.
- [KAI 13] Djilali KAIROUS «Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien a Machine Asynchrone à Double Alimentation» 24 Février 2013.
- [Jor.06] Joris PEETERS, "simulation of dynamic drive train loads in a wind turbine" *PhD thesis*, Katholieke Universiteit Leuven, 2006, Belgium.
- [LEC] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique.
- [FRE 03] Frédéric Poitiers «étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne» 19 décembre 2003.
- [POI] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [WWE 11] *WWEA* «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» Avril 2011
- [VRI 83] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1983.
- [MEN 01] J.L. Menet, L.-C. Valdès, B. Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- σ criterion", *Renewable Energy* 22, 2001.
- [MOK 13] MOKRANE SMAILI «MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN AÉROGÉNÉRATEUR À MACHINE ASYNCHRONE À DOUBLE ALIMENTATION EN VUE DE SIMULATION DES PROBLÈMES DE COGÉNÉRATION» Août 2013
- [BAI 10] Thèse R .BAÏLE «Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne.» université de Corse le 18 Octobre 20 10.

BIBLIOGRAPHIE

- [GHD 08] K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [ANC] J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.
- [FER 09] KHALED FERKOUS «étude d'une chaîne de conversion d'énergies éolienne» mémoire de magister de l'Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [ARM 06] ARMAND BOYETTE «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.
- [TIR 10] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [LOP] M. LOPEZ «contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-sud11.
- [MIR 05] A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [NAO 08] NAOUEL HAMDI «Modélisation et commande des génératrices éoliennes» mémoire de magister de l'université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [SEJ 06] Sejr Khojet el Khil, « Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)», Thèse de doctorat de l'institut national Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [ELB09] Elbia Youcef, «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté», Thèse de Magister en électrotechnique de l'université de Batna, 2009.
- [ARE 05] S.Areski, «Contribution à l'études et la commande d'une machine asynchrone double alimentée par onduleur multiniveaux», Thèse de Magister de l'université Houari Boumediene, 2005 étoil.