

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DE BATNA
Faculté des Sciences de l'Ingénieur



Thèse présentée pour obtenir le grade de

Doctorat En Sciences En
Electrotechnique

Présenté par:

BOUMARAF Farid

Magister en Electrotechnique de l'Université de Batna, 2009

Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des
Techniques de L'intelligence Artificielle

Soutenue le 24/06/2014

Jury:

Président	Pr. NACERI Farid	Université de Batna
Rapporteur	Pr. ABDESSMED Rachid	Université de Batna
Co-Rapporteur	Pr. BENDAAS Med Lokmane	Université de Batna
Examineurs	Pr. RAHEM Djamel	Université d'O.E.Bouagh
	Dr. BENALIA Lila	Université de M'sila
	Dr. Chaiba Azeddine	Université de Sétif

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du laboratoire (LEB), de l'université de Batna sous la direction de monsieur **Rachid Abdessemed** professeur à l'institut d'électrotechnique de l'université de Batna, à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour son soutien scientifique et humain, et pour les encouragements qu'il m'a prodigués ainsi que la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail de recherche en tant que rapporteur de cette thèse.

Je remercie sincèrement monsieur **Mohamed Lokmane Bendaas** professeur au département d'électrotechnique de l'université de Batna, pour avoir accepté d'être corapporteur de cette thèse ainsi que pour ces nombreux conseils.

Je suis très sensible à l'honneur que m'a fait monsieur **Farid Nacéri** Professeur à l'université de Batna, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Mes profonds remerciements vont également à Monsieur **Azeddine Chaiba**, Maître de conférences à l'Université de Sétif, à Monsieur **Djamel Rahmen**, Maître de conférences à l'Université d'O.E.Bouaghi, et à Madame **Lila Benalia**, Maître de conférences à l'Université de M'sila pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail.

Je tiens à remercier monsieur **Sebti Belkacem**, Maître de conférences à l'Université de batna pour son aide précieuse qu'il m'a apportée, pour l'élaboration de ce présent travail.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans oublier toute ma famille, sans exception, ainsi que tous mes amis et collègues du laboratoire.

Keywords:

- Doubly fed asynchronous machine (DFAM).
- Field oriented control.
- Fuzzy control.
- Direct power control.
- Space vector modulation (SVM).

Abstract

Wind energy conversion is the fastest-growing energy source among the new power generation sources in the world and this tendency should remain for some time. The major part of the existing research works concerning variable speed wind turbines control is not only to capture the maximum power from the wind but, also, to improve the quality of power and to converge the system for operating at unity power factor. This these proposes a new fuzzy power control of a variable speed wind energy conversion system based on a doubly Fed Induction Generator (DFIG) using space vector modulation to achieve control of active and reactive powers exchanged between the stator of the DFIG and the grid to ensure a Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a wind energy conversion system and to reduce significantly Powers ripples. Fuzzy logic controller is applied to rotor side converter for active and reactive power control and voltage regulation of wind turbine. This new approach is validated by modeling using Matlab-Simulink software and simulation results can prove the excellent performance of fuzzy control as improving power quality and stability of wind turbine.

Mots Clés

- Machine asynchrone à double alimentation (MADA).
- Commande vectorielle à orientation du flux.
- Logique floue.
- Commande directe des puissances
- Alimentation à Fréquence de Modulation Constante (SVM)

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

DFIM..... Doubly Fed Asynchronous Machine;

MADA Machine Asynchrone à Double Alimentation ;

MLI Modulation de la largeur d'impulsion ;

CLF Contrôleur à Logique Floue (*FLC* :fuzzy logic controller);

s grandeur statorique ;

r grandeur rotorique ;

d, q Indices des composantes directe et en quadrature ;

Φ_s, Φ_r : flux statorique et rotorique ;

ω_s, ω_r vitesses angulaires électriques statorique et rotorique ;

Ω Vitesse mécanique ;

θ_s, θ_r angles électriques statorique et rotorique ;

V_s Tension statorique ;

V_r Tension rotorique ;

I_s Courant statorique ;

I_r Courant rotorique ;

P Puissance active ;

Q Puissance réactive ;

U_m Amplitude de la tension statorique ;

L_s Inductance propre du stator ;

L_r Inductance propre du rotor ;

R_s, R_r résistances d'enroulements statorique et rotorique ;

M Inductance mutuelle entre stator et rotor ;

σ Coefficient de dispersion ;

T_{em} Couple électromagnétique ;

T_r Couple résistant ;

T_e^* Couple de référence ;

réf Indice indiquant la référence (la consigne)

f : Coefficient de frottements ;
J..... : moment d'inertie ;
p : nombre de paires de pôles ;
v : Vitesse du vent (m/sec) ;
 ρ : Densité de l'air (kg/m³) ;
R : Rayon du rotor (m) ;
 λ : Vitesse spécifique ;
C_p(λ) : Coefficient de puissance ;
J_r : Inertie du rotor (kg m²) ;
J_g : Inertie de la génératrice (kg m²) ;
J_t : Inertie totale (kg m²) ;

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 Etat de L'art des Systèmes De Conversion d'Energie Eolienne.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Données Générales.....	6
1.3 Historique de L'éolien.....	6
1.4 Croissance de L'énergie Electrique Eolienne.....	7
1.4.1 Capacité Mondiale Installée de L'énergie Eolienne.....	7
1.5 Avantages de L'énergie Eolienne.....	12
1.6 Inconvénients.....	12
1.7 Types D'aérogénérateurs.....	13
1.7.1 Aérogénérateurs à Axe Vertical.....	13
1.7.1.1 Aérogénérateurs à Rotor de Darrieus.....	13
1.7.1.2 Aérogénérateurs à Rotor de Savonius.....	14
1.7.1.3 Avantages et inconvénient des machines à axe vertical.....	14
1.7.2 Aérogénérateurs à axe horizontal.....	15
1.8 Contrôle de la Puissance Fournie Par Une Eolienne.....	17
1.9 Système de Régulation	17
1.9.1 Freinage Mécanique.....	17
1.9.2 Systèmes de Régulation au Niveau de la Turbine.....	17
1.9.2.1 Système à pas Variable ou à Calage Variable ou Système pitch.....	17
1.9.2.2 Système Stalle ou à Décrochage Aérodynamique.....	18
1.9.2.3 -Système stalle actif.....	19
1.10 Avantages et Inconvénient des Machines à Axe Horizontal	19
1.11 La Rentabilité D'une Eolienne.....	20
1.12 Principe de Conversion de L'énergie.....	20
1.12.1 Mode Autonome	20
1.12.2 Eolienne connectée au réseau	21
1.12.2.1 Vitesse fixe	21
1.12.2.1.1 Machine Asynchrone à Cage.....	21
1.12.2.1.2. Machine Asynchrone à Double Stator.....	22
1.12.2.2 vitesse variable.....	23
1.13 Convertisseurs de Fréquence	23
1.14 Etat de L'art Sur les Systèmes de conversion à vitesse Variable.....	24
1.14.1 Système Utilisant Une Génératrice Synchrones.....	24
1.14.1.1 Générateur Synchrones à Rotor Bobiné.....	24
1.14.1.2 Générateur Synchrones à Aimants Permanents.....	25
1.14.1.2.1 Machines Synchrones à Flux Radial.....	25
1.14.1.2.2 Machines Synchrones à Flux axial.....	25
1.14.1.2.3 Machine Synchrones à Aimant Permanent à Flux Transversal.....	26
1.14.1.2.4 Machines Synchrones à Bobinages Fractionnaires.....	26
1.14.1.2.5 Machine à Reluctance Variable.....	26
1.14.2 Système Utilisant une génératrice Asynchrone.....	29
1.14.2.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil.....	29
1.14.2.2 Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné.....	29

1.14.2.3	Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation.....	31
1.14.2.3.1	Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée.....	32
1.14.2.3.2	MADA -Structure de Kramer.....	32
1.14.2.3.4	MADA Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur.....	33
1.14.2.3.4	MADA – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	33
1.14.2.3.5	MADA alimenté par deux convertisseurs indépendants.....	34
1.14.2.3.6	MADA Utilisant Plusieurs Modules de Convertisseurs Statiques à Deux Niveaux en Parallèle.....	35
1.14.2.3.7	MADA utilisant un convertisseur NPC Multiniveaux.....	35
1.14.2.3.8	Machine Asynchrone à double alimentation en cascade.....	36
1.14.2.3.9	Machine en Cascade Avec une Carcasse Unique et un Rotor à Cage d'écureuil.....	36
1.14.2.3.11	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation en Cascade Avec L'une de Deux Machines à Double Etoile.....	37
1.15	Conclusion.....	37
1.16	Références bibliographiques.....	38

Chapitre 02 Modélisation et Commande d'un Système Eolien à Vitesse Variable Basé Sur Une MADA.....39

2.1	Introduction.....	39
2.2	Modélisation du système éolien.....	39
2.2.1	Modèle de la turbine.....	40
2.2.1.1	Modèle des pales.....	40
2.2.1.2	Modèle du multiplicateur de vitesse.....	42
2.2.1.3	Modélisation du Système D'orientation des Pales.....	44
2.4	Stratégies de commande de la turbine éolienne (MPPT).....	44
2.2.2	Résultat de Simulation.....	45
2.4	Modélisation de la MADA.....	49
2.4.1	Modèle général de la MADA.....	49
2.4.2	Modèle de la MADA dans le repère de Park.....	50
2.4.3	Modèle de la MADA avec orientation du flux.....	52
2.5	Commande vectorielle de la MADA.....	54
2.6	Contrôle du convertisseur coté MADA.....	55
2.7	Contrôle du convertisseur côté Réseau.....	56
2.7.1	Contrôle des courants transitant dans le filtre RL.....	57
2.7.2	Contrôle du bus continu.....	58
2.8	Résultats de Simulation.....	60
2.9	Conclusion.....	63
2.10	Références bibliographiques.....	63

Chapitre 03 DPC de la machine asynchrone à double alimentation.....64

3.1	Introduction.....	64
3.2	Commande directe de la puissance active et réactive de la MADA.....	64
3.2.1	Principe du contrôle direct des puissances (DPC).....	64
3.2.2	Structure générale du contrôle direct des puissances active et réactive de la MADA.....	67
3.2.3	Résultats de la simulation.....	68
3.3	Conclusion.....	71
3.5	Références bibliographiques.....	71

Chapitre 04 Commande de la MADA à Fréquence de Modulation Constante...73

4.1 Introduction.....	74
4.1 Principe de la SVM.....	74
4.3 Modélisation de l'onduleur de tension.....	74
4.3.1. Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis.....	75
4.3.2. Contrôle des tensions par MLI	76
4.3.3 La modulation MLI vectorielle.....	77
4. 4 Les étapes de la réalisation d'un bloc SVM.....	78
4. 4.1 Détermination des tensions de références V_{α} , V_{β}	78
4. 4.2 Détermination des secteurs	79
4. 4.3 Calcul des variables X, Y et Z.....	80
4. 4.5 Génération des signaux modulateurs T_{aon} T_{bon} et T_{con}	81
4.5 Simulation de l'algorithme MLI vectorielle.....	81
4.6 Commande de la MADA à fréquence de modulation constante	82
4.7 Résultats de simulation.....	83
4.8 Conclusion.....	87
4.9 Références bibliographiques.....	87

Chapitre 05 Commande de la MADA par la logique floue.....89

5.1 Introduction.....	90
5.2 Principe de la logique floue	90
5.2.1 Ensembles flous.....	91
5.2.2 Univers du discours.....	92
5.2.2.1 Variable linguistique.....	92
5.2.3 Propriétés des ensembles flous.....	92
5.2.4 Opérateurs de la logique floue.....	93
5.2.4.1 opérateur NON.....	94
5.2.4.2 Opérateur Et.....	94
5.2.4.3 Opérateur Ou.....	94
5.2.4.4 Autre opérateur de la logique floue.....	95
5.2.4.4.1 Opérateur ET et OU réalisés par opérateurs arithmétiques.....	95
5.2.3.4.2 Opérateurs ET flou et Ou flou.....	96
5.2.4.4.3 Opérateurs min-max et opérateur β	97
5.3 Règles linguistique (flous).....	98
5.3.1 Opérateurs linguistiques.....	99
5.4 Contrôleur flou.....	99
5.4.1 Fuzzification.....	101
5.4.2 Inférences (déductions floues).....	102
5.4.3 Exemple de la méthode d'inférence Max-Min.....	103
5.4.4 Défuzzification.....	105
5.4.4.1 Défuzzification par centre de gravité.....	105
5.4.4.2 Défuzzification par valeur maximale.....	106
5.4.4.3 Défuzzification par la valeur moyenne des maximas.....	107
5.5 Différentes approches pour la détermination des règles.....	107
5.5.1 Développement Pratique du contrôleur flou.....	108
5.6 Loi de commande.....	109
5.6.1 Variation de la commande.....	109
5.6.2 Implémentation.....	109
5.7 Conception d'un RLF.....	110

5.8 Application de la logique floue à la commande des puissances actives et réactive de la MADA	111
5.9 Résultat de simulation.....	112
5.11. Conclusion	115
5.12 Références bibliographiques.....	116
Conclusion générale.....	118

Introduction générale

L'Agence d'Énergie Internationale (IEA) prévoit qu'avant 2030, les besoins d'énergie dans le monde seront presque soixante pour cent plus élevés que maintenant [1]. Le deux-tiers de cette augmentation concerne la Chine, l'Inde et dans d'autres économies en voie de développement; ces pays représenteront presque la moitié de consommation d'énergie globale avant 2030. Face à cette demande, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays sont tournés vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable". En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en les ramenant à leur niveau de 1990, que sur celui de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable [2]. Ceci a été recommandé à la 3ème Conférence des Parties de la convention – cadre des nations unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997.

Cette évolution a engendré une accélération d'insertion de production décentralisée d'électricité dans les réseaux de distribution et parmi ces productions, le marché mondial de l'énergie éolienne progresse plus rapidement que celui de toute autre source d'énergie renouvelable. Le total mondial, qui ne dépassait pas 4800 MW en 1995, a atteint 282 482 MW en 2013, après 158 505 MW en 2009, 74 052 MW en 2006 et 93 835 MW en 2007 et 120 297 MW en 2008, D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée [1][3][4].

De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de technologie éolienne est l'aérogénérateur; i.e. une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique [7]. La taille de ces turbines éoliennes modernes va de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. La majorité des systèmes commerciaux actuels sont des turbines éoliennes à axe horizontal (HAWT) avec des rotors à trois pales (tripales) [9]. Les turbines peuvent transférer de l'énergie électrique à un réseau de puissance à travers des transformateurs, lignes de transport et sous-stations associés. L'utilisation de ces aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques d'obtenir de l'électricité et cette source est inépuisable. Cependant le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles.

De nombreux travaux de recherche sur le contrôle et la commande d'éoliennes ont été menés. Grâce à ces travaux, et grâce au progrès de l'électronique de puissance les dernières générations d'éoliennes fonctionnent avec une vitesse variable et disposent d'une régulation pitch. Il est ainsi possible de modifier la vitesse de rotation et l'angle de calage de chacune des pales, permettant alors d'améliorer la production de l'aérogénérateur. Néanmoins, il reste encore à introduire plus d'intelligence dans le fonctionnement des aérogénérateurs. .

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un type d'aérogénérateur qui a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Il existe de nombreuses raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable [10]; comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances active et réactive . Le système éolien utilisant une MADA et un convertisseur « back-to-back » qui relie le rotor de la génératrice et le réseau, présente de nombreux atouts. L'un des avantages de cette structure est que les convertisseurs de puissance utilisés, sont dimensionnés pour faire transiter une fraction de la puissance totale du système . Ce qui permet la réduction des pertes dans les composants d'électronique de puissance.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de thèse est de collaborer à la conception optimale d'un système de conversion de l'énergie éolienne utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation ; ainsi qu' à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique en compensant la puissance réactive et les courants harmoniques présents sur le réseau électrique sans forcément nécessiter un surdimensionnement de la MADA et des convertisseurs.

Ainsi l'objectif principal de notre travail de thèse est d'étudier les techniques de commande de la machine asynchrone à double alimentation afin d'améliorer les performances et d'optimiser la production d'une éolienne,

Le premier chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne sous une forme assez descriptive. Nous exposerons quelques statistiques sur le développement de l'énergie éolienne au cours des dernières années. Ensuite, à travers une revue de la littérature disponible nous dresserons un état de l'art des différentes technologies éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne en détaillant leurs avantages et

leurs inconvénients seront étudiées afin de montrer les avantages inégalés de la machine asynchrone à double alimentation surtout en grande puissance et en vitesse variable. L'importance de l'utilisation des convertisseurs de puissance sera discutée aussi dans ce chapitre ; leurs avantages seront montrés en termes de réduction de l'ondulation des courants et le contenu harmonique des tensions de sortie.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons le fonctionnement de l'éolienne. Nous décrirons la modélisation des différents constituants du système éolien à base de la MADA. Nous étudierons d'abord les paramètres de l'éolienne et la modéliserons de l'orientation des pales, la turbine éolienne, ainsi que l'arbre mécanique en décrivant l'utilité du multiplicateur. Ensuite nous expliquerons la notion de MPPT en précisant pourquoi il devient nécessaire de l'introduire dans toutes les éoliennes à vitesse variable. Nous procéderons à la mise en équation de la machine asynchrone. La commande découplée des puissances active et réactive permet un réglage de celles-ci selon des consignes déterminées au préalable par le gestionnaire de réseau. Ce deuxième chapitre est nécessaire quant à la présentation du système étudié et pour présenter les commandes classiques sur lesquelles seront basées nos différentes contributions, à savoir l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique et la limitation de l'effet des changement paramétriques. Des résultats de simulation seront présentés dans l'objectif de vérifier et valider les stratégies de contrôle.

Dans le troisième chapitre, nous intéresserons au concept de la commande directe de puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation DPC.

Le quatrième chapitre constitue l'étude approfondie de l'onduleur triphasé de tension à MLI commandé. Nous expliquerons pourquoi ce système est aujourd'hui le plus utilisé pour l'alimentation des entraînements variables. Ensuite, nous exposerons la technique de Commande à Fréquence de Modulation Constante (SVM), puisqu'elle devient l'une des techniques les plus utilisées pour générer des tensions et des courants sinusoïdaux en raison de sa facilité et la faible distorsion d'harmoniques.

Dans le cinquième chapitre, nous commencerons dans un premier temps par une introduction de la logique floue. Les principes de base de la commande par logique floue seront affichés afin de concevoir un régulateur flou pour remplacer les régulateurs classiques des courants. La commande d'une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable dédiée à la

conversion de l'énergie éolienne pour maximiser et améliorer la qualité d'énergie produite sera étudiée

Références bibliographiques

- [1] Rapport annuel du Global Wind Energy Council (GWEC), 2009.
- [2] Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7, mai 2013.
- [3] Mendonça, Miguel, Stephen Lacey, et Frede Hvelplund. 2009. « Stability, participation and transparency in renewable energy policy: Lessons from Denmark and the United States ». *Policy and Society*27(4):379 398.
- [4] Meyer, Niels I« Learning from wind energy policy in the EU: lessons from Denmark, Sweden and Spain ». *European Environment* 17(5):347–362, 2007.
- [5]D.M. EGGLESTON, F.S. STODDARD, *Wind turbine engineering design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987.
- [6] Söderholm, Patrik, et Maria Pettersson. « Offshore wind power policy and planning in Sweden », *Energy Policy* 39(2):518 525, 2011.
- [7] Rapport, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 'Les Energies Renouvelables, Rapport sur la Situation Globale', 2009.
- [8]Jacob Perahia and Chemmangot V. Nayar, *Power Controller for a wind-turbine driven tandem induction generator*, School of Electrical and Computer Engineering, 1991, pp. 599-624.
- [9] S. Jacobsson and V. Lauber, 'The Politics and Policy of Energy System Transformation – Explaining, the German Diffusion of Renewable Energy Technology', *Energy Policy*, Vol. 34, N°3, pp. 256 - 276, 2006.
- [10] Le développement de l'éolien dans le monde, Syndicat des énergies renouvelables, dernière révision du document : septembre 2013.

Chapitre 1

Etat de L'art des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne

1.1 Introduction

De l'avis de nombreux chercheurs et même des grandes compagnies pétrolières, la production pétrolière va atteindre son pic dans moins de trente ans à cause de la réduction progressive et inéluctable des ressources pétrolières. Suite aux alertes déclenchées par les conseils environnementaux concernant les problèmes causés par les rejets des gaz atmosphériques sur les changements climatiques, et aux risques engendrés par l'énergie nucléaire tels que l'accident de Tchernobyl et celui de Fukushima au Japon, à l'augmentation des prix du pétrole qui représente la source la plus importante de l'énergie causée par l'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés aux besoins planétaires immenses en énergie électrique, les décideurs politiques des principaux pays industrialisés et des pays émergents ont favorisé la mise en place de nouveaux moyens de production d'énergie plus propres et respectueux de l'environnement. La solution s'avère donc dans l'utilisation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place comme énergie complémentaire à l'énergie utilisée.

L'énergie éolienne n'est pas un nouveau concept pour l'humanité. La puissance du vent a été utilisée depuis de nombreux siècles, notamment pour faire avancer les bateaux, moudre le grain, et pour produire de l'électricité [6]. Dans les années 1887-1888, l'américain *Charles F. Brush* construit à Cleveland la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité. Malgré sa grande taille de 17 mètres de hauteur, elle ne produisait que 12 KWh. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à *Poul La Cour* en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920. En effet, la popularité de l'énergie éolienne a toujours été en relation avec les prix des combustibles fossiles. Après la seconde guerre mondiale, avec la baisse des prix des combustibles fossiles, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage. Mais la crise du pétrole dans les années 1970 a stimulé l'intérêt pour la production d'énergie à grande échelle par les éoliennes. Depuis les années 1990, les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance, ainsi que l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes et surtout les subventions accordées par de nombreux gouvernements ont rendu la solution éolienne plus compétitive. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001. Nous avons ainsi pu observer une évolution significative de la production électrique d'origine éolienne entre 1999 et 2003. Au cours de cette période, la production a doublé s'élevant à 40000 MW [6]. D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energy Council (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée. L'éolien pourrait couvrir jusqu'à 30 % des besoins électriques mondiaux en 2030 si la volonté politique soutient son développement à grande échelle [5]. Les choix politiques des années qui viennent détermineront la situation écologique et économique mondiale pour de

nombreuses décennies. Dans ce qui suit, on présente une vision technique générale sur l'énergie éolienne. En premier lieu, on présente la définition de l'énergie éolienne et les principaux composants d'un système de conversion éolien de manière générale. Les avantages et les inconvénients de ce type l'énergie seront mais en exergue. Aussi, les principales caractéristiques et l'évolution technologique des éoliennes durant ces dernières années, ainsi que les différents types des aérogénérateurs utilisés pour la production d'énergie éolienne seront étudiés.

1.2 Données Générales

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par abus de langage les énergies renouvelables aux énergies propres.

La production d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. De nombreuses étapes sont nécessaires à cette transformation, qui font appel à des technologies diverses.



Fig. 1.1 Parc Eolien [2]

1.3 Historique de l'Eolien

L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en 1700 avant J'ésus-Christ environ [9]. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age [6].

Au début du dernier siècle, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées, puis les éoliennes ont été progressivement confrontées à la concurrence croissante des centrales au charbon et du réseau électrique au niveau national.



Fig.1.2 Moulins de pompage [1]

Cependant, en raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne se maintient. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle : l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 kW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985. Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord [4].

1.4 Croissance de l'Energie Electrique Eolienne

1.4.1 Capacité Mondiale Installée de l'Energie Eolienne

D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energy Council (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée.



Fig.1.3 Puissance des installations éoliennes (MW) à l'échelle mondiale

L'éolien représente 3,4 % de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 68 milliards de dollars. L'augmentation annuelle de la capacité mondiale liée à l'installation de nouvelles éoliennes montre que le décolllement de l'industrie s'est produit au début des années 2000 pour s'accélérer en 2004, c'est-à-dire juste avant l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto en février 2005. Après une période faste de croissance pendant quatre ans, la crise financière mondiale de 2008 a eu des répercussions immédiates sur le secteur éolien dont la croissance a subit un coup d'arrêt brutal pour repartir ensuite à un niveau moins élevé.

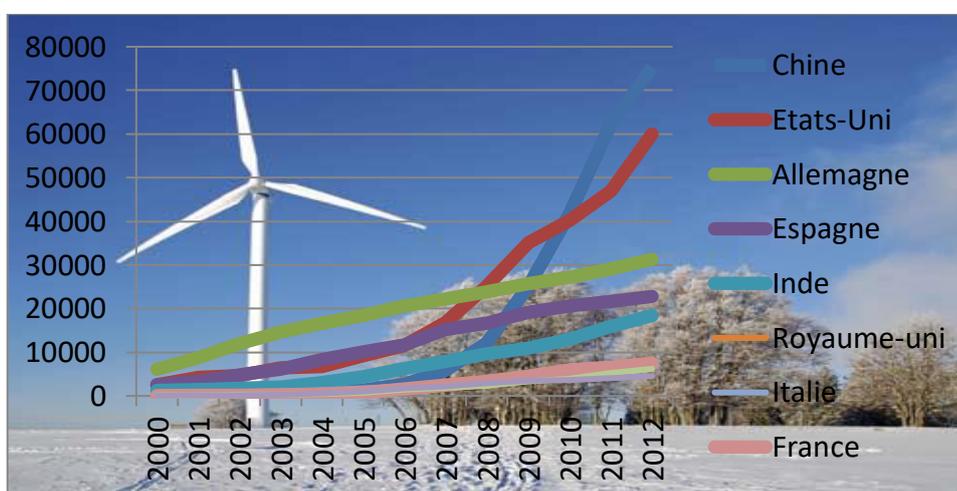


Fig.1.3 Augmentation annuelle de la capacité mondiale des installations éoliennes (MW) dans le monde.

L'Europe domine le marché d'éolien en forte croissance sous l'effet de politiques industrielles volontaristes et d'une façade maritime importante. Au 1er janvier 2012, la puissance totale installée dans l'Europe des 27 s'élevait à 105.7 GW, soit une croissance de 12% par rapport à la puissance cumulée en 2011[1].

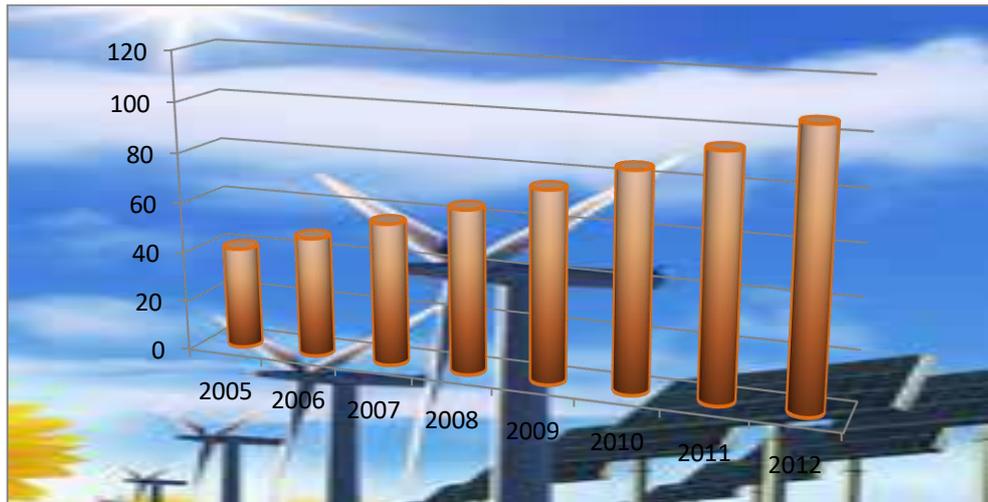


Fig. 1.4 Capacité cumulée de production des installations éoliennes (MW) en UE, 2005-2012

Au niveau de la répartition de cette puissance installée dans les différents pays, on constate de fortes disparités. En 2012, l'Allemagne héberge plus de 30% du total des installations européennes d'éoliennes, devant l'Espagne, l'Italie et Grande-Bretagne puis la France. Quinze pays de l'UE ont au total installé plus de 1GW de puissance éolienne.

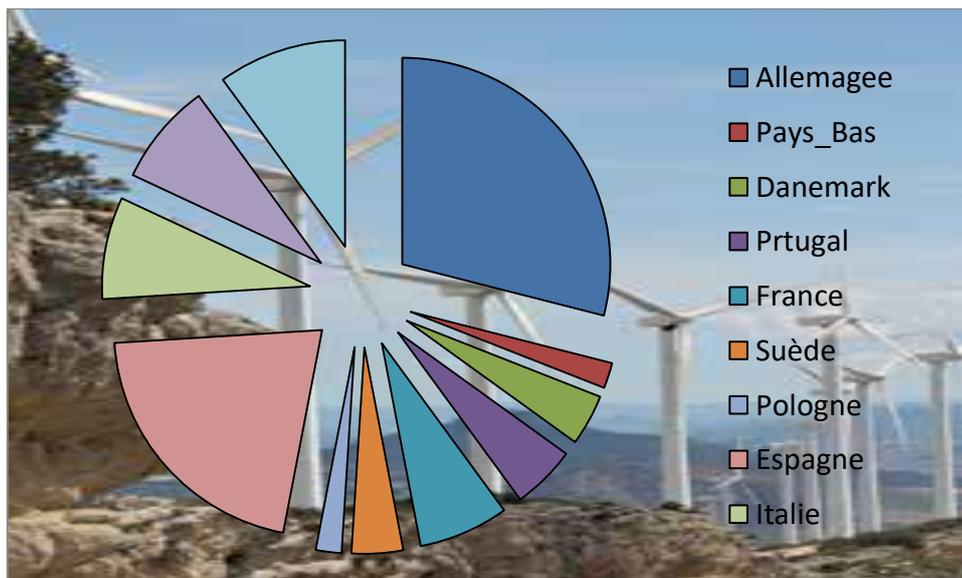


Fig1.5 Répartition de la puissance installée cumulée en UE (2012)

Au niveau mondial les pays dont la capacité augmente le plus sur la période 2011-2012 sont la Chine et les Etats- Unis qui représentent actuellement 48% de la production mondiale. Selon ce même rapport au 1er janvier 2013 les quatre premiers étant la Chine (75 564 MW), les Etats-Unis (60 007 MW), l'Allemagne (31 332 MW) et l'Espagne (22 796 MW) [1].



Fig1.6 Les 20 pays ayant les plus fortes croissances (MW)

La crise économique qui frappe depuis quatre ans le secteur de l'éolien est devenue mondiale. La baisse de la demande en Asie depuis deux ans, couplée à la baisse des subventions et aides publiques en Europe notamment, a généré des surcapacités mondiales. Aux Etats-Unis, 2012 marque la fin des crédits d'impôts pour les parcs éoliens, d'où il a résulté par un effet d'anticipation une forte augmentation des ventes avant la fin de l'année 2012. Les Etats-Unis sont devenus en 2012 le premier marché avec 13124 MW de nouvelles installations, dépassant la Chine où elles se sont élevées à 12960 MW, chiffre en diminution de 26%. Suivent l'Allemagne, l'Inde et le Royaume-Uni. On peut maintenant s'attendre à la baisse du prix des turbines et surtout à la chute du nombre de commandes aux Etats-Unis, qui pourront être partiellement compensées par une accélération des marchés canadien et brésilien. Des études, notamment menées par HSBC, montrent toutefois une baisse de 12% en volume du marché mondial en 2013, alors que les usines des principaux turbineurs tournent au ralenti. Une reprise peut être observée avec le développement de l'éolien offshore.

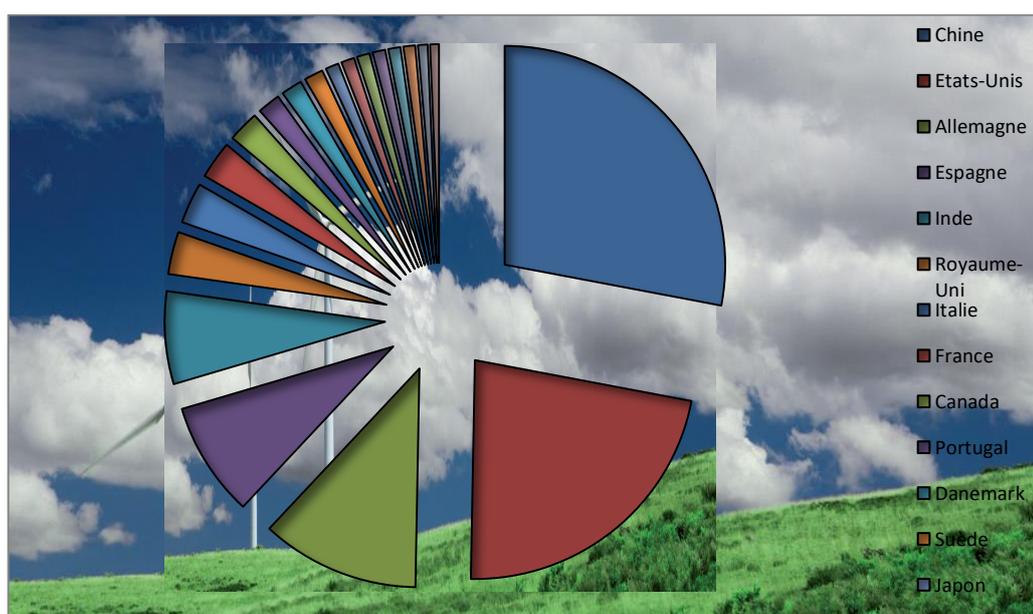


Fig1.7 Répartition de la puissance installée dans le monde

De son côté, l'Afrique bénéficie d'un vaste potentiel pour le développement de l'énergie éolienne, surtout dans le Nord, le long des côtes, et en Afrique du Sud. À la fin de l'année 2012, environ 90 % des installations éoliennes totales du continent cumulant à 1 135 MW se situent en Egypte (550 MW), au Maroc (291 MW) et en Tunisie (104 MW). En Afrique du Sud, un plan de développement pour cette énergie prévoit 8 000 MW en 2020. Alors que l'Afrique à un niveau relativement bas, le taux de croissance de 7 % affiché en 2012 est encore inférieure à celui de l'année précédente, et bien en-deçà du taux de croissance mondial de 19,1 %.[1].



Fig1.8 L'énergie éolienne en Afrique

Dans le but de mettre en place une stratégie de déploiement de l'énergie éolienne en Afrique, étant donné que la technologie éolienne ne cesse de s'améliorer, il est judicieux de s'intéresser en premier lieu aux pays africains ayant les meilleurs gisements éoliens. En se référant à la cartographie des vents et en tenant compte de certaines considérations liées aux données climatologiques et météorologiques, on pourrait regrouper les 15 pays africains (voir le Tableau 1) ayant les meilleurs gisements éoliens en Afrique, de la façon suivante :

l'Afrique australe (Afrique du Sud, Lesotho, Madagascar et Maurice) ; l'Afrique de l'est (Djibouti, Érythrée, Seychelles et Somalie) ; l'Afrique du nord (Algérie, Égypte, Maroc et Tunisie) ; l'Afrique de l'ouest (Cap Vert et Mauritanie)[4].

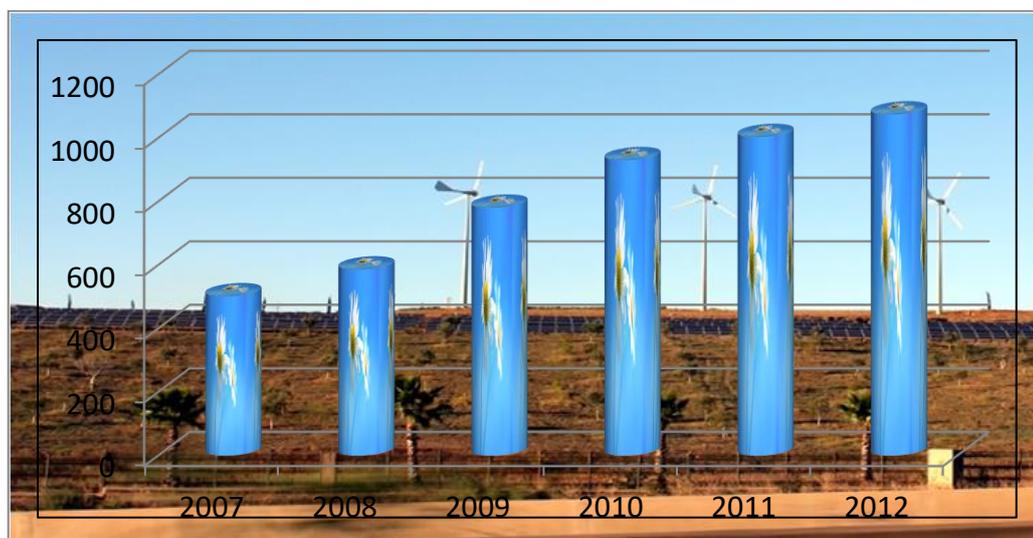


Fig. 1.9 Capacité cumulée de production des installations éoliennes (MW) en Afrique

L'Algérie a débuté la construction de la première ferme éolienne à Adrar, pour l'implantation de 12 éoliennes de 3 hélices chacune et d'une hauteur de 50 mètres, avec une capacité de production de 850 kWh l'unité pour un régime du vent de 8 à 16 mètres par seconde. La puissance cumulée produite par cette usine sera de 34 gigawatts. Deux autres projets de même type sont prévus à Tindouf et Béchar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [3], pour atteindre 1700 MW [4] à l'horizon 2030.



Fig.1.9 Parc Eolien en Algérie [2]

1.5 Avantages de l'Energie Eolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).

Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

1.6 Inconvénients

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.

- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

1.7 Types d'Aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées, selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [5]

1.7.1 Aérogénérateurs à Axe Vertical

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique.

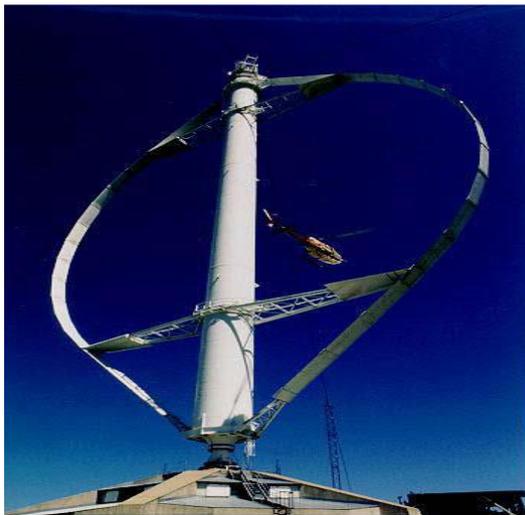


fig.1.10 éoliennes à axe vertical [2]

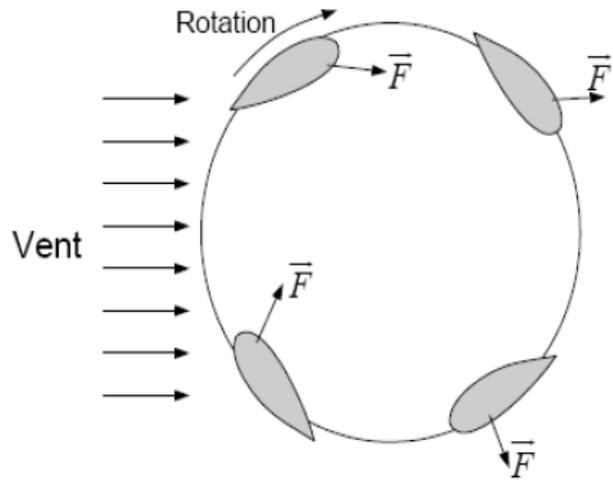
Les éoliennes à axe vertical peuvent être classées aussi selon leurs caractéristiques aérodynamiques en deux familles :

1.7.1.1 Aérogénérateurs à Rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig. 1.11). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif [5]. Le principe de mise en mouvement de ce type d'éolienne est identique à un anémomètre. Les forces exercées par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, on obtient ainsi un couple moteur [6].



a) Aérogénérateur à axe vertical



b) Incidence variable

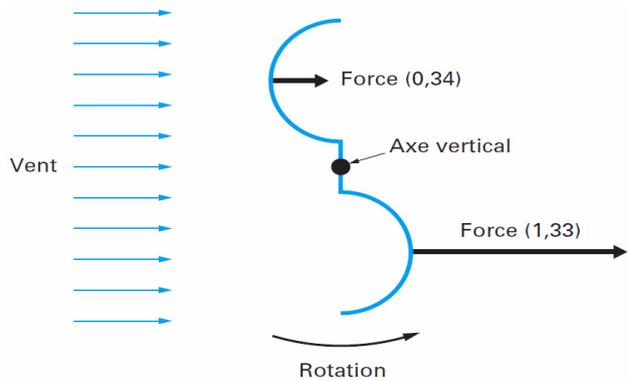
Fig.1.11 : Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [6]

1.7.1.2 Aérogénérateurs à Rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Fig. 1.12.a). Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables générant ainsi un couple moteur (Fig. 12.b). Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Les rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique, etc [6].



a) Aérogénérateur à axe vertical



Forces en valeurs relatives

b) Effet du vent sur un corps creux

fig1.12 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)[5]

1.7.1.3 Avantages et Inconvénient des Machines à Axe Vertical

L'éolienne à axe vertical offre l'accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol (il n'y pas besoin de munir la machine d'une tour) ; ce qui facilite la maintenance et l'entretien, et réduire le coût d'installation. Le mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction. Elles sont moins bruyantes parce que les vitesses sont plus faibles. Cependant elles présentent une faible efficacité de conversion d'énergie, une

fluctuation importantes de puissance due aux variations considérables du couple, et une occupation importante du terrain pour les puissances élevées. Aussi, l'éolienne ne démarre pas automatiquement parce que la vitesse du vent à proximité du sol est faible; il faut utiliser la génératrice comme moteur pour permettre le démarrage de l'éolienne. Ceci ne constitue cependant qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau. Il faut pratiquer un démontage complet des éoliennes pour procéder au remplacement du palier principal du rotor

1.7.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal

Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent.



Fig. 1.13 Eolienne à axe horizontal [2]

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) du vent en énergie mécanique.

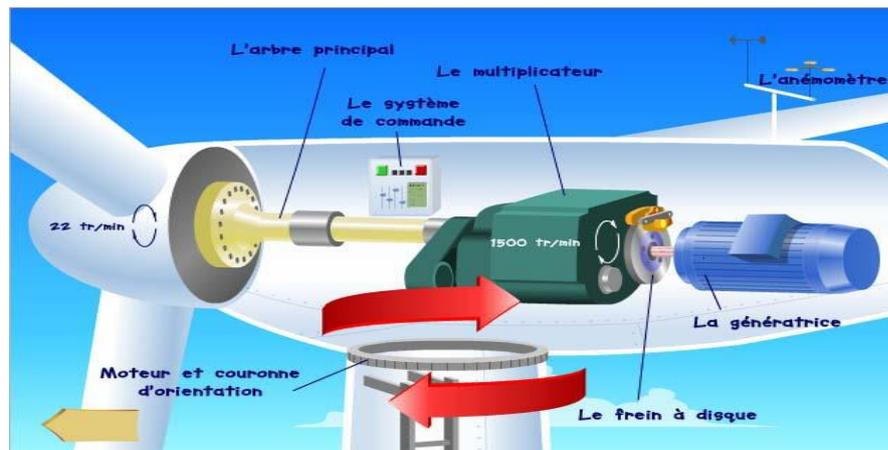


Fig.1.14 Composants d'une éolienne à axe horizontal [1]

Le vent fait tourner les pales. Ces dernières tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Un système de refroidissement qui se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

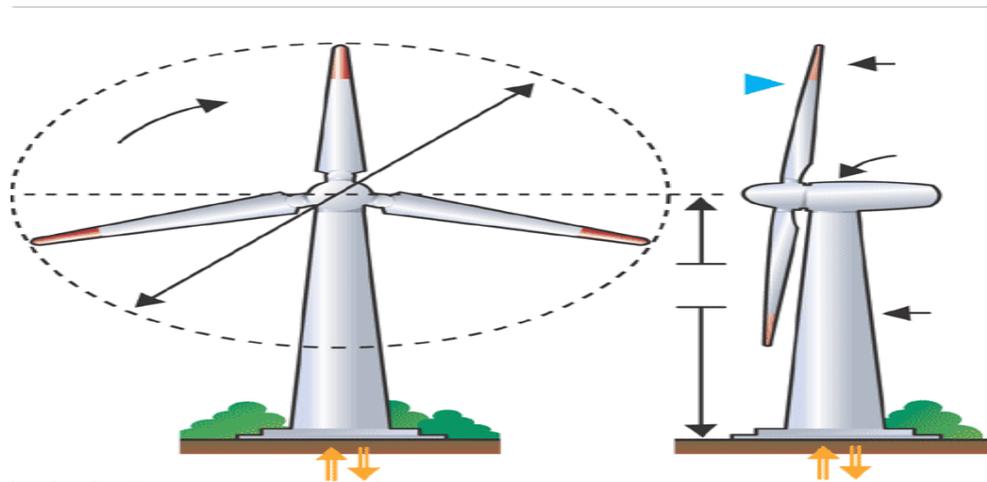


Fig.1.15 principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal [6]

Suivant le sens de parcours du vent, on distingue : les éoliennes à rotor placé en amont et celles en aval de la nacelle. Cette dernière configuration présente l'avantage que la nacelle et le rotor se mettent automatiquement face au vent. Par contre, lorsque le rotor se situe en amont, il faut un dispositif particulier pour que l'éolienne se positionne correctement. Par exemple, on peut trouver une aile fixe verticale qui stabilise l'éolienne face au vent. On parlera alors d'un dispositif de positionnement passif ou actif, respectivement.

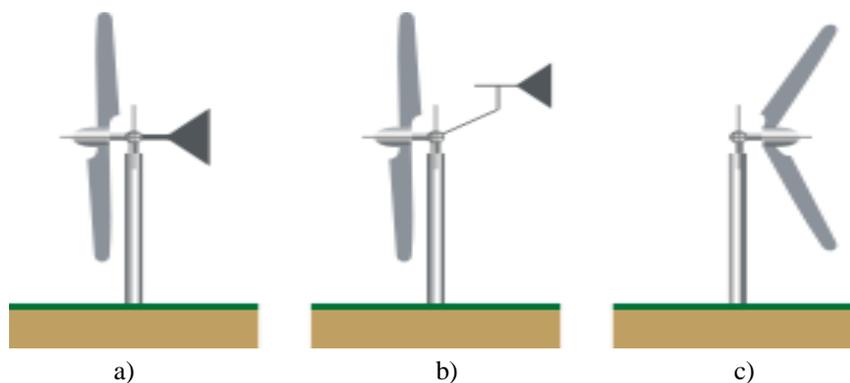


Fig.1.16 Rotor placé en amont avec gouverne(a), en amont avec contrôle actif (b) et en aval (c) [2].

L'avantage du rotor placé en aval est qu'il se positionne naturellement face au vent, c'est-à-dire de manière passive. Par contre, le vent est d'abord perturbé par la nacelle et le pylône avant d'agir sur le rotor. D'une part, le régime de vent devient non uniforme sur la surface balayée par le rotor. Cela engendre des contraintes mécaniques variables dans le temps ce qui provoque une usure prématurée du matériel. D'autre part, le vent perturbé vient impacter les

ailettes de l'éolienne ce qui a tendance à générer beaucoup de bruit (bruit d'origine aérodynamique). Pour ces deux raisons, on préfère la configuration avec le rotor en amont. En effet, le vent est moins perturbé avant de rencontrer les pales de l'éolienne. Finalement, on peut dire que l'éolienne à axe horizontal avec le rotor en amont est devenue le standard.

1. 8 Contrôle de la Puissance Fournie par une Eolienne

L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 volts. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur, et sa tension est augmentée à 20000 volts. Elle est alors injectée dans le réseau électrique et peut être distribuée aux consommateurs [12]. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 12 et 90 km/h. Au-delà, elles s'arrêtent pour des raisons de sécurité. La production électrique varie selon la vitesse du vent. C'est avec des vents de 45 à 90 km/h que l'éolienne produit sa puissance maximale. L'énergie produite par une éolienne dépend de plusieurs paramètres : la longueur des pales, la vitesse du vent et la densité de l'air. La puissance produite par une éolienne augmente avec le carré de la longueur des pales, et avec le cube de la vitesse du vent. Ainsi, une éolienne produira quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et, lorsque la vitesse du vent double, la production sera multipliée par 8 ! La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3 % de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est 10 degrés plus froid. La pluie ou neige n'ont, quant à elles, aucune influence.

1.9 Système de Régulation

1.9.1 Freinage Mécanique

Les dispositifs sont nombreux : frein à main, à air comprimé, électromécanique ou électromagnétique. Le frein est inséré au plus près de l'hélice lorsqu'il y a une ligne d'arbre avec multiplicateur. Il doit agir progressivement pour réduire les contraintes lors d'un freinage d'une roue de grande inertie [5].

1.9.2 Systèmes de Régulation au Niveau de la Turbine

Ce moyen de contrôle permet essentiellement de limiter la puissance pour les vents forts, la plupart des turbines éoliennes utilisent deux principes de régulation aérodynamique pour contrôler la vitesse de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent.

1.9.2.1 Système à pas Variable ou à Calage Variable ou Système Pitch.

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (variation de l'angle d'incidence). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. Les pales sont face au vent aux basses vitesses (de la vitesse minimale à la vitesse de base) puis s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse maximale. En cas de puissance de sortie trop élevée, les pales pivotent légèrement sur le côté hors du vent. En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne définit quatre zones de fonctionnement comme le montre la figure suivante.

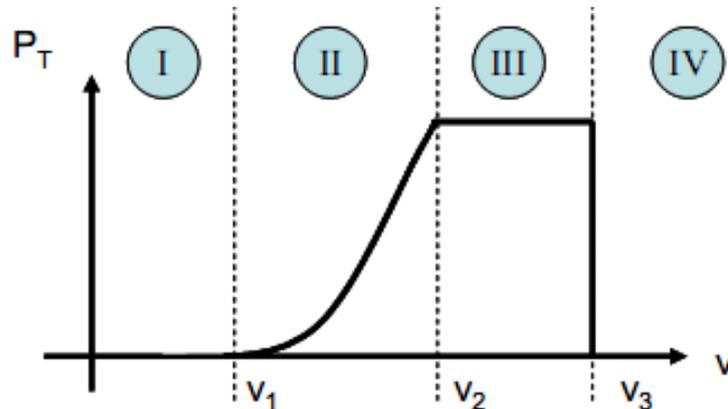


Fig.1.17 Zones de fonctionnement d'une éolienne

zone I, correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance ;

zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V . C'est dans cette zone qu'il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation par l'intervention du système de contrôle, la puissance récupérée est alors variable ;

zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine. La puissance fournie reste égale à P_n ;

zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie pour éviter des dégâts sur la structure.

On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage β , de manière prépondérante depuis le démarrage (zone I) et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone IV) de la turbine. Ce système de régulation offre les avantages suivants :

- la possibilité de pouvoir effectuer un contrôle actif de la puissance sous toutes les conditions de vent (en dehors de la vitesse limite de sécurité), y compris à une puissance partielle ;
- elles peuvent fournir la puissance nominale même quand la densité de l'air est faible (des sites sur les hauteurs, grandes températures) ;
- une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage stall dans les mêmes conditions de fonctionnement ;
- démarrage rapide par changement de l'angle de calage ;
- il n'y a pas besoin de freins puissants pour les arrêts d'urgence ;
- les contraintes des pales sont faibles.

On peut agir sur l'angle de calage des pales par [14] :

- une régulation mécanique avec des masselottes centrifuges,
- une régulation électronique avec des servomoteurs, dans un système de régulation automatique de la vitesse de rotation (pour des grandes puissances).

1.9.2.2 Système Stall ou à Décrochage Aérodynamique

Le contrôle à décrochage de charge est un système de contrôle passif qui réagit au-delà d'une certaine vitesse du vent [9]. les pales sont fixées au moyeu de façon rigide. L'angle de calage est choisi afin de permettre le décrochage du flux d'air de la surface de la pale pour des vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. Ce décrochage empêche la portance d'agir sur le rotor. En comparaison avec les turbines à angle de calage variable, celles à décrochage ne nécessite pas de système de contrôle d'angle de calage et la construction du

rotor est plus simple et moins coûteuse. La maintenance est plus aisée avec une meilleur fiabilité. Il est plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive. Cette solution est utilisée surtout quand la génératrice et le couplage conduisent à une vitesse de rotation peu variable (génératrice asynchrone à couplage direct sur le réseau). On peut combiner ce dispositif à une machine à deux vitesses de rotation, ce qui permet d'étendre la plage de production. La figure 2.5.6 compare l'évolution du coefficient aérodynamique C_p des systèmes pitch (à vitesse de rotation fixe) et stall à deux vitesses.

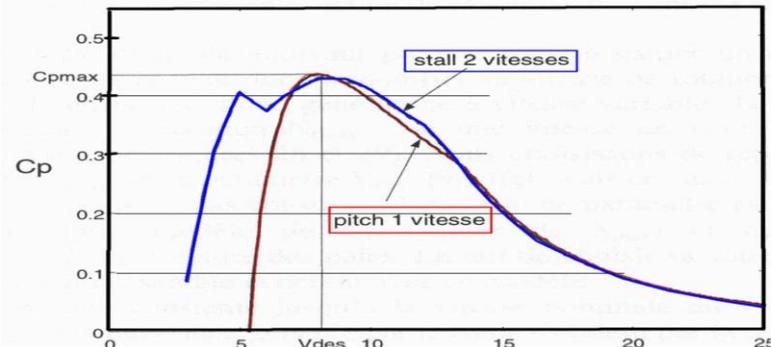


Fig.1.18 Comparaison des systèmes pitch à une vitesse de rotation et stall à deux vitesses fixes [10]

1.9.2.3 -Système Stall Actif

Durant les dernières années, un nombre croissant des grandes éoliennes conçues d'une combinaison de ces deux méthodes est apparue. Il s'agit du contrôle à décrochage actif (Stall actif). Dans ce cas, et afin d'avoir un couple relativement élevé à des vitesses de vent faibles les pales du rotor sont orientées dans la direction du décrochage (angle négatif) et non dans la direction contraire (angle positif) de la même façon que les éoliennes à pas variable.

Les systèmes « Stall actif » permettent d'ajuster l'effet du décrochage en fonction de la vitesse et d'offrir un mode de régulation de la puissance relativement efficace et plus simple que le système pitch grâce à une très faible rotation de l'axe des pales.

1.10 Avantages et Inconvénient des Machines à Axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontales sont actuellement les machines les plus répandues étant donné leur rendement supérieur à celui de tout autre type d'aérogénérateur avec des frais de fonctionnement relativement faibles. Le rendement élevé dû à un équipement fonctionnel qui leur permet de s'orienter selon la direction du vent et de capter ainsi toute son énergie. Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques que celles à axe vertical. Elles sont mieux adaptées au secteur rural. Elles sont plus solides. Mais elles présentent quelques inconvénients, tels que la nécessité plus de plus de maintenance dans la mesure où elles sont moins résistantes aux vents forts que les éoliennes à axe vertical. En effet, un système de régulation est requis pour éviter une vitesse trop élevée de l'hélice. Elles sont moins simples que les éoliennes à axe vertical, et les pales du rotor ne doivent pas être flexibles. Aussi, elles font beaucoup de bruit.

1.11 La Rentabilité d'une Eolienne

Les facteurs suivants déterminent le coût de l'énergie éolienne :

- le coût initial de l'éolienne et de son installation ;
- le taux d'intérêt à payer sur l'investissement ;
- la quantité d'énergie produite.

Toute éolienne installée dans un endroit fortement exposé au vent produit de l'électricité moins coûteuse que la même éolienne installée dans un endroit moins venté. Par conséquent, il est important d'évaluer la vitesse du vent à l'endroit envisagé pour l'installation des éoliennes. Les grands aérogénérateurs modernes utilisés dans des parcs d'éoliennes raccordées au réseau ayant des champs d'unités multiples coûtent entre 1500\$ et 2000\$ le kW. Des unités individuelles plus petites coûtent jusqu'à 3000\$ le kW. Dans les endroits exposés à de bons vents, le coût de production de l'électricité se situe entre 0.06 et 0.12\$ du kWh. Ce coût est quelque peu supérieur aux frais associés à une installation d'électricité, mais les coûts de l'énergie éolienne diminuent chaque année, tandis que les coûts de production plus traditionnels continuent d'augmenter[5][6]. Dans les régions éloignées, la production d'électricité à l'aide de génératrices diesel peut varier entre 0.25\$ et 1.00\$ du kWh. Par conséquent, dans les endroits exposés à un bon vent, l'électricité produite est nettement rentable. Lorsque l'on compare le prix de détail de l'électricité payé par les consommateurs, les coûts de l'énergie éolienne sont presque concurrentiels. Cependant, sur les sites moins ventés, le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources classiques.

Pour pouvoir comparer les sources d'énergie entre elles, la notion de coût global social a été introduite (coûts de dépollution ou de retraitement, coûts de recherche et de développement, coûts stratégiques d'approvisionnement). En coût global, l'énergie éolienne est une des énergies les moins coûteuses [6].

1.12 Principe de Conversion de l'Energie

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. La génératrice peut être liée directement ou indirectement au réseau. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit. Avec une éolienne, deux possibilités s'offrent au particulier concernant la production d'électricité : la connexion au réseau électrique et donc la revente de son électricité ou bien le recours à un système autonome pour utiliser directement l'énergie produite.

1.12.1 Mode Autonome

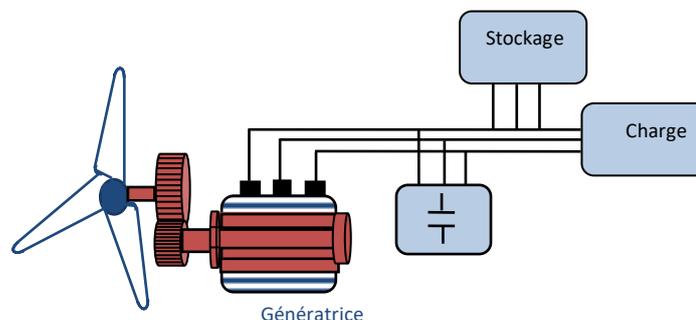


Fig.1.19 Eolienne fonctionne en mode autonome

Les éoliennes non raccordées au réseau, fonctionnent en mode autonome et alimentent des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appui. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt significatif en cas d'absence de groupes électrogènes, notamment en cas de vent faible. Le recours à des batteries est utile pour le stockage d'énergie à long terme. D'autres systèmes de stockage sont envisagés comme le stockage inertiel à court terme. Le stockage inertiel évite alors l'utilisation de batteries qui présentent un caractère polluant pour l'environnement. L'énergie se présente sous forme d'énergie cinétique, stockée dans un volant d'inertie. La génératrice utilisée peut être une machine synchrone à aimants permanents ou une machine asynchrone à cage munie de capacités indispensables pour son excitation [9].

1.12.2 Eolienne connectée au réseau

Les éoliennes connectées au réseau peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celles-ci peuvent être fixes ou variables.

1.12.2.1 Vitesse fixe

Lorsque l'éolienne est connectée au réseau, la vitesse de rotation de la génératrice doit rester pratiquement constante de façon à ce que la génératrice reste proche de la vitesse de synchronisme, principal critère pour un fonctionnement stable de la génératrice. La fréquence du réseau impose la vitesse de rotation de la machine. Le générateur à vitesse fixe, en liaison directe avec le réseau, est nécessairement muni d'un multiplicateur de vitesses. L'éolienne tourne à une vitesse de rotation donnée pour une plage restreinte de vitesses de vent, ses applications sont donc limitées [3]. Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevées.

1.12.2.1.1 Machine Asynchrone à Cage

Les machines asynchrone à cage sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé [16], elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi connues par leur sécurité de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues. Grâce à ces avantages, les générateurs asynchrones sont les plus populaires dans l'industrie des générateurs éoliens à vitesse fixe. Environ de 85% des ces applications (à vitesse fixe) sont donc à connexion directe sur le réseau électrique. Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible [17]. Mais dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le problème majeur de ces solutions est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. 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. La machine

consomme de la puissance réactive pour magnétiser son rotor et détériore ainsi son facteur de puissance. Pour contrer cette imperfection, on utilise des condensateurs que l'on introduit en parallèle au dispositif comme le montre la figure ci-dessous suivante. Ils deviennent alors la seule source de puissance réactive.

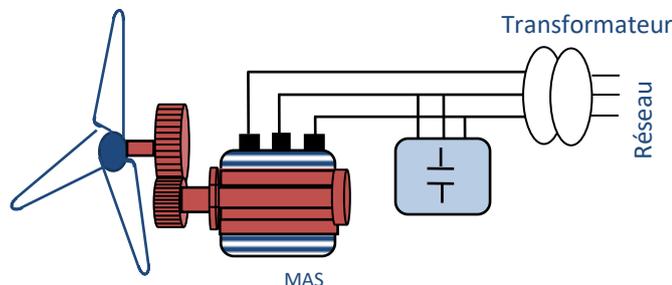


Fig.1.20 Schéma de la connexion directe au réseau de l'éolienne avec la machine asynchrone à cage

Pour connecter l'éolienne au réseau dans cette configuration, on procède en deux temps : le premier temps consiste à connecter les enroulements statoriques au réseau par l'intermédiaire de résistances afin de limiter les courants statoriques transitoires. Pendant cette phase, les pales de l'éolienne sont orientées de façon à ce que le couple fourni soit nul. Après quelques secondes, les résistances sont éliminées (elles sont court-circuitées) puis le système de régulation oriente les pales pour accroître la puissance.

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator.

1.12.2.1.2. Machine Asynchrone à Double Stator

La machine asynchrone à double stator se compose d'un stator portant deux enroulements triphasés décalés d'un angle électrique de 30° , et d'un rotor à cage d'écureuil. L'un des enroulements est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée de forte puissance et de petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées; un second enroulement appelé enroulement d'excitation de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Cette topologie possède deux points de fonctionnement. Les perturbations sonores de la machine pour des vents faibles sont diminuées du fait que l'orientation des pales est amoindrie. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre ce qui rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

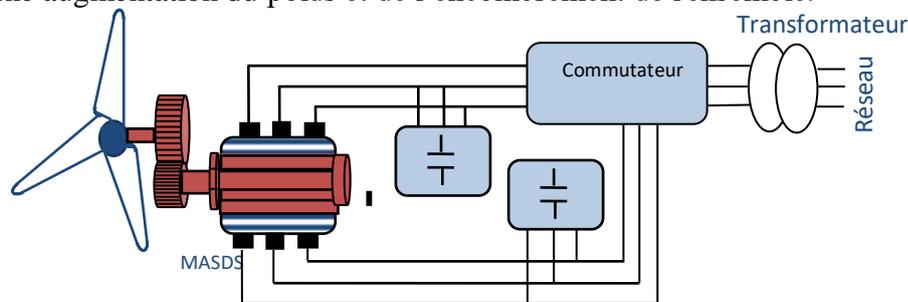


Fig.1.21 Schéma de la connexion au réseau de l'éolienne avec la machine asynchrone à double stator

1.12.2.2 vitesse variable

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent [5]. En vitesse variable, on règle le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne $P(\Omega)$.

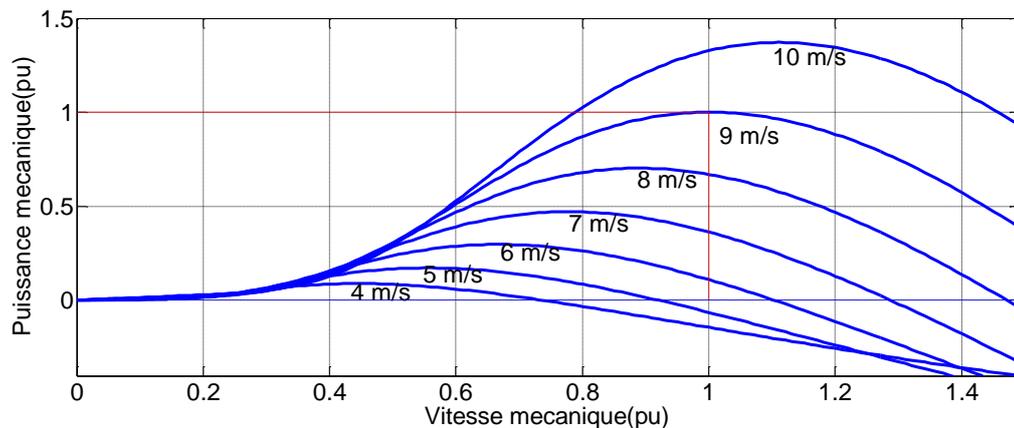


Fig1.22 Puissance récupérée en fonction de la turbine

1.13 Convertisseurs de Fréquence

Grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande, le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes est devenu possible. On utilise ces convertisseurs pour adapter la fréquence variable du générateur à la fréquence du réseau tout en assurant un rendement élevé. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique [6]. En effet, deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés [5]. Ces dispositifs sont des convertisseurs de puissance bidirectionnels. Le facteur de puissance côté réseau est contrôlé. Le fonctionnement de ce dispositif est réversible en courant. Le redresseur devient onduleur et l'onduleur redresseur. Les deux convertisseurs ont la possibilité de contrôler cette puissance réactive grâce à la production ou l'absorption de la puissance réactive du rotor (cas MADA). Ainsi, le contrôle de la variation de la vitesse de générateur permet de limiter le système d'orientation des pales à une fonction de sécurité par grand vent ; de même qu'une commande adéquate permet de délivrer des courants de fréquence fixe correspondant à celle du réseau, avec la possibilité de la compensation des courants harmoniques.

On utilise les transistors IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) comme interrupteurs. Ils peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des thyristors GTO.

On utilise un redresseur à diodes pour les machines synchrones, leur fonctionnement est unidirectionnel. Le redresseur à MLI est utilisé pour les machines asynchrones. Le redresseur MLI permet par ailleurs de fournir la puissance réactive magnétisante.

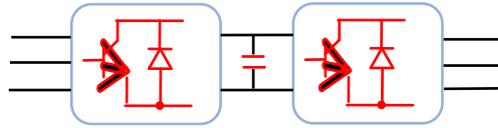


Fig.1.23 Convertisseur statique de fréquence

Différents types de génératrice peuvent être utilisés dans les éoliennes à vitesse variable.

1.14 Etat de l'Art sur les Systèmes de Conversion à Vitesse Variable

1.14.1 Système Utilisant une Génératrice Synchrone

L'avantage du générateur synchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si l'on utilise une machine synchrone usuelle, le rotor est censé tourner à la même vitesse que le stator. L'alternateur étant connecté au réseau, la vitesse de rotation doit être un multiple des pulsations de courants statoriques [9]. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

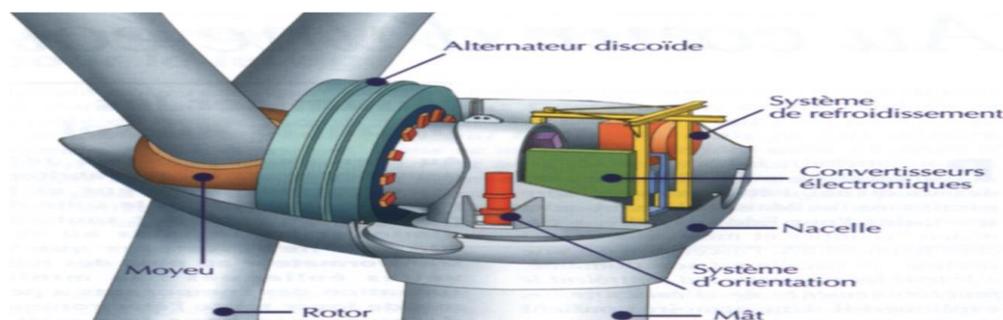


Fig1.24 Eolienne à génératrice synchrone[2]

Dans le rotor d'une éolienne à génératrice synchrone, on installe normalement des électroaimants alimentés par un courant continu. Comme le réseau électrique fournit du courant alternatif, il faut le convertir en courant continu avant qu'il soit envoyé aux bobines roulées autour des électroaimants du rotor.

Les électroaimants du rotor sont branchés au courant au moyen de balais et de bagues collectrices fixées à l'arbre de la génératrice.

Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents.

1.14.1.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le générateur synchrone tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la

machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système "Brushless" avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système [14].

1.14.1.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents, (GSAP)

Aujourd'hui la plupart des machines synchrones utilisées dans les petites éoliennes sont des machines synchrones à aimants permanents par rapport à la machine à excitation. La caractéristique d'auto excitation du **GSAP** lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement avec un coût réduit. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

1.14.1.2.1 Machines Synchrones à Flux Radial

La machine synchrone à aimants permanents et à entrefer axial dite "discoïde" peut être constituée, dans sa structure élémentaire (étage), soit d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques, soit de deux disques rotoriques entourant le disque statorique.

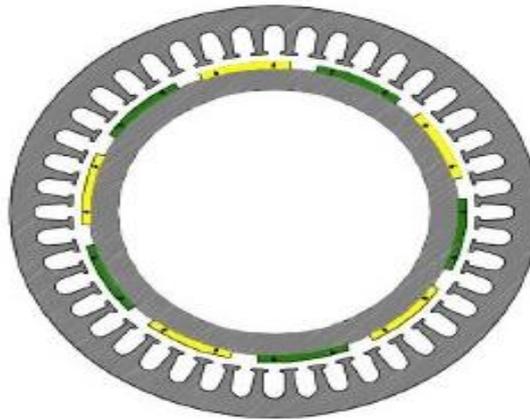


Fig.1.25 Machine synchrone à aimant permanent à flux radial [13]

1.14.1.2.2 Machines Synchrones à Flux axial

Un disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle, [13][9].

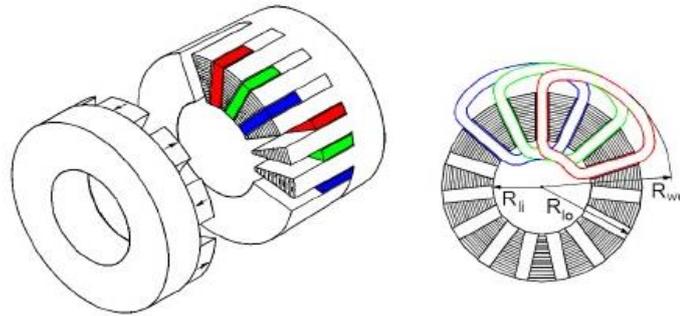


Fig.1.26 Machines synchrones à aimant permanent à flux axial

1.14.1.2.3 Machine Synchrone à Aimant Permanent à Flux Transversal

Cette topologie est une technologie nouvelle et intéressante. Ses principaux atouts sont : un très grand couple massique et la possibilité d'avoir un grand nombre de pôles (avantageux pour l'entraînement direct). Cependant, ces avantages sont contrebalancés par une grande complexité de conception et une réactance synchrone importante qui dégrade le facteur de puissance. La commande de cette machine pose quelques difficultés cause de la forme de l'induction non sinusoïdale dans l'entrefer et aux fortes saturations locales [13].

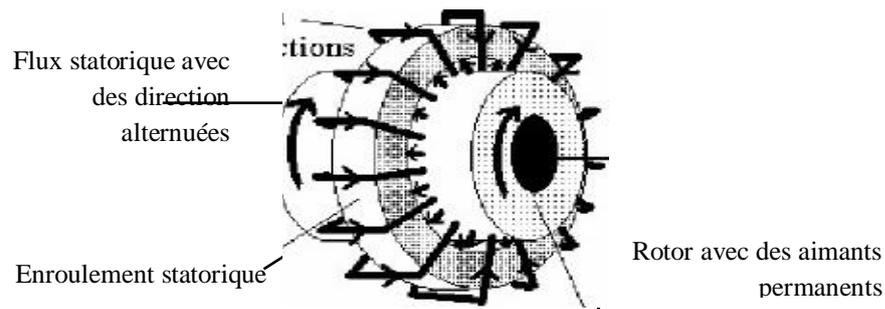


Fig. 1.27 Machines synchrones à aimants permanents à flux transversal [13]

1.14.1.2.4 Machines Synchrones à Bobinages Fractionnaires

Ces machines sont composées d'un rotor classique de machine à flux radial. Cependant, le bobinage fractionnaire permet d'obtenir un grand nombre de paires de pôles avec un nombre réduit d'encoques au stator. Ce type de bobinage crée un champ d'entrefer contenant de nombreux harmoniques et il est nécessaire de maximiser l'harmonique qui correspond au nombre d'aimants. Les autres harmoniques ne produisent pas de couple et génèrent uniquement des pertes par effet Joule. De bonnes performances sont obtenues [13].

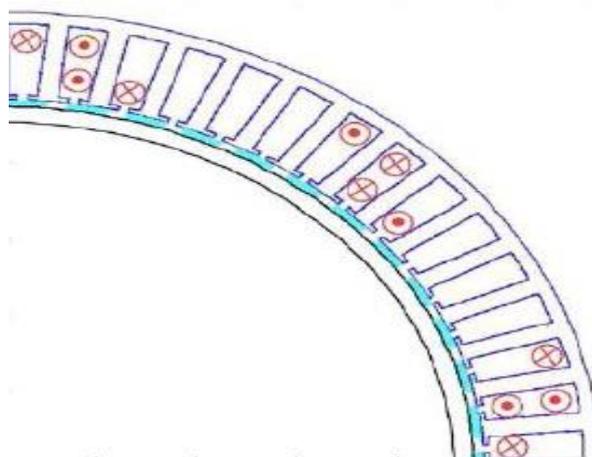


Fig1.28 Machines synchrones à bobinages fractionnaires [13]

1.14.1.2.5 Machine à Reluctance Variable

C'est à partir des années 1970 que la MRV prend son essor grâce à l'apparition d'une électronique de commande performante. La MRV a une structure saillante au rotor et au stator avec un stator actif où sont situés les bobinages et un rotor massif. Le rotor massif distingue la MRV des machines synchrones et asynchrones. La MRV présente l'avantage d'une grande simplicité de construction mécanique, d'un faible coût, d'une bonne robustesse et d'un couple massique élevé. Les machines à réluctance variable sont actuellement dédiées aux applications éoliennes. Elles possèdent des caractéristiques intéressantes pour les basses vitesses de rotation. On notera que malgré son potentiel, la MRV n'a pas encore trouvé son application dans l'éolienne [13]. On distingue plusieurs types de MRV.

1-MRV pure : Elle est utilisée dans l'industrie pour les systèmes d'alternateur-démarrateur, dans les véhicules hybrides ou les avions mais aussi pour les systèmes de génération d'électricité dans l'aérospatial, [6].

2- MRV Vernier : Différemment à la MRV précédente, elle est alimentée par des courants sinusoïdaux, et excitée au rotor et au stator d'où on peut insérer des convertisseurs électroniques. La vitesse de rotation est inversement proportionnelle au nombre des dents du rotor, [6].

3- MRV hybride : Cette machine met en oeuvre des aimants surfaciques et exploite l'effet Vernier avec une alimentation sinusoïdale, [6]. Le grand nombre de dents rend cette structure intéressante pour les forts couples. Cette machine utilise des aimants à terre rare spéciaux afin d'éviter leur démagnétisation, [6].

4- MRV à flux axial : Cette machine a été appliquée à la propulsion marine au début des années 1970, [13].

Plusieurs structures sont possibles pour la machine synchrone :

Un redresseur à diodes, associé ou non à un convertisseur DC/DC, peut être utilisé (fig 1.29). Cette solution est avantageuse sur le plan économique mais la qualité des courants de la

génératrice est moins bonne qu'avec un redresseur MLI; de plus, le nombre de degrés de liberté sur l'ensemble de la machine de conversion est plus faible (trois contre quatre).

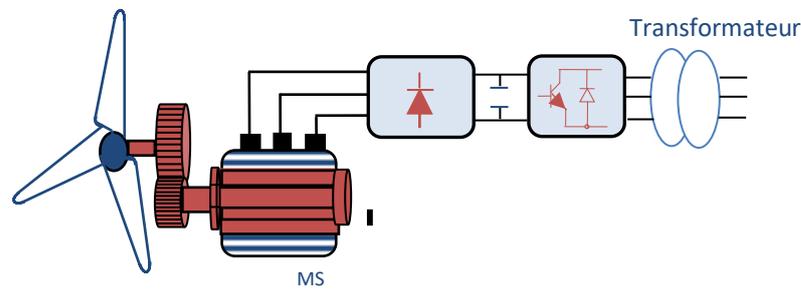


Fig1.29 Machine synchrone liée au réseau par un ensemble redresseur à diode, convertisseur et onduleur MLI

La machine synchrone peut être à un redresseur MLI qui permet de fonctionner à vitesse variable et donc de maximiser la puissance (fig.1.30).

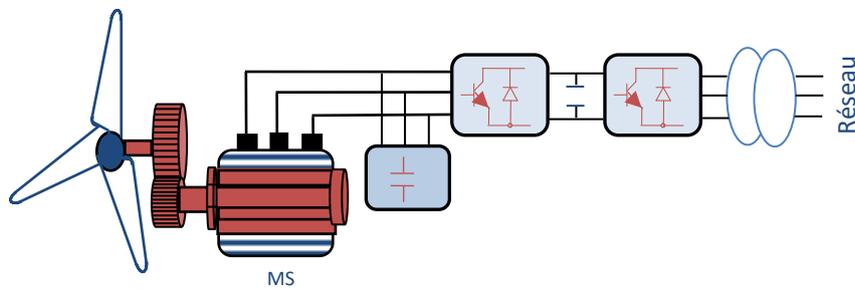


Fig.1. 30 Machine synchrone avec deux convertisseur MLI en cascade

L'approche utilisée actuellement consiste à mettre en place une topologie utilisant des convertisseurs (back-to-back) de plusieurs modules connectés en parallèle (Fig. 1.31). Cette disposition permet un fonctionnement en mode dégradé en assurant ainsi la production de la puissance même dans le cas d'une défaillance de l'un des modules[5].

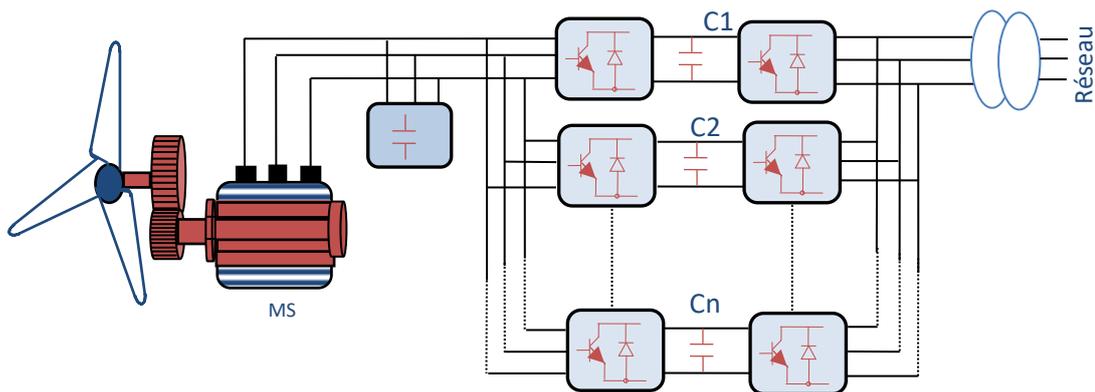


Fig1.31 MS à aimants permanents utilisant plusieurs modules de convertisseurs statiques à deux niveaux en parallèle.

Afin d'augmenter la densité de puissance, ABB a développé le convertisseur PCS6000 pour cette technologie d'éolienne. Ce convertisseur (back-to-back), qui repose sur une architecture multi-niveaux NPC (Fig. 1.32), est dédié aux applications de moyenne tension (définies par 1-5 kV [14]) et d'une gamme de puissance qui arrive jusqu'à 8 MW. Le rendement de ce convertisseur a atteint les 98% grâce aux composants IGCT utilisés qui sont conçus spécialement pour réduire les pertes de puissance par commutation [15], [16].

Un autre convertisseur (back-to-back) multi-niveaux NPC « MV7000 » est commercialisé par la société « Converteam » [5]. Celui-ci est conçu à base d'IGBT et sa gamme de puissances est similaire à celle du convertisseur PCS6000 fabriqué par ABB, [5], [17].

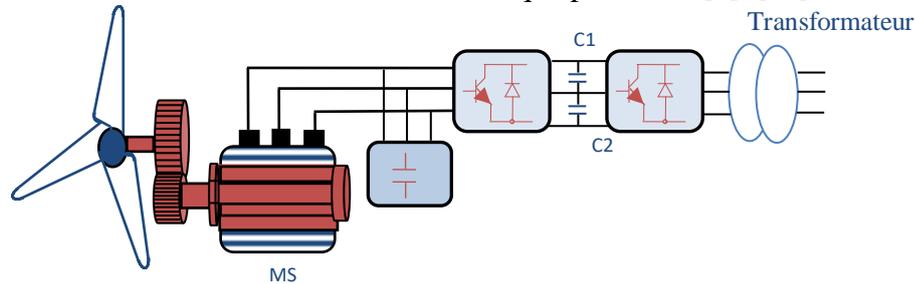


Fig. 1.32 Ms à aimants permanents en utilisant un convertisseur NPC multiniveaux.

1.14.2 Système Utilisant une Génératrice Asynchrone

1.14.2.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

C'est le rotor qui distingue la génératrice asynchrone de la génératrice synchrone. La génératrice asynchrone à cage n'est en fait que très rarement utilisée, sauf dans l'industrie éolienne [5]. Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Il est très fiable et relativement peu onéreuse par rapport à d'autres types de génératrices. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur, ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.

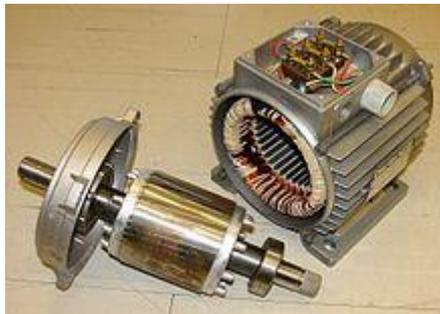


Fig.1.33 Machine asynchrone à cage d'écureuil [3]

La stabilité du système est effective lorsque la vitesse de rotation reste proche du synchronisme, c'est-à-dire $g \approx 0$. Cette topologie est très simple et ne demande pas beaucoup d'entretien mais consomme de l'énergie réactive et de ce fait le facteur de puissance est altéré.

1.14.2.2 Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné

Trois enroulements sont logés dans les encoches d'un cylindre ferromagnétique feuilleté constituant le rotor. Celui-ci présente le même nombre de pôles que le stator. Ces enroulements rotoriques sont reliés à trois bornes par l'intermédiaire de bagues, solidaires du rotor, et de balais frottant sur ces bagues. Le rotor bobiné doit être fermé sur lui-même directement (mis en court-circuit) ou par l'intermédiaire de résistances.



Fig.1.34 Machine asynchrone à rotor bobiné [3]

L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable [13]. On utilise un dispositif d'électronique de puissance pour adapter la fréquence variable de la machine asynchrone à la fréquence du réseau. Les enroulements du stator sont connectés aux convertisseurs de puissance. Les deux convertisseurs, par le biais du bus continu permettent de découpler la fréquence du réseau de la fréquence du stator de la machine asynchrone.

La configuration présentée dans la figure (1.35) est composée d'une machine asynchrone, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine. Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator [6].

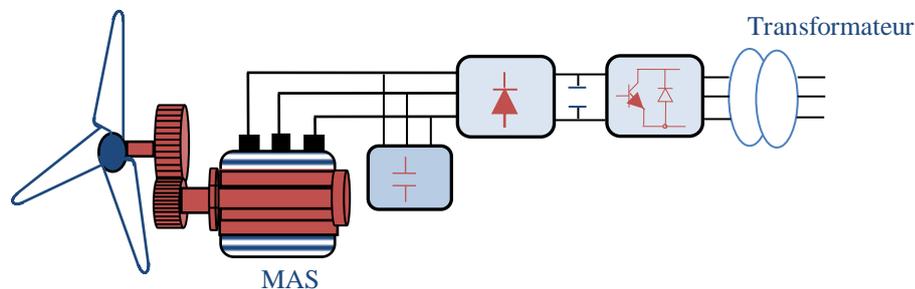


Fig.1.35 Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent, et la commande MLI vectorielle de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor.

Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne.

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (Figure 1.36) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent. [2]

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée

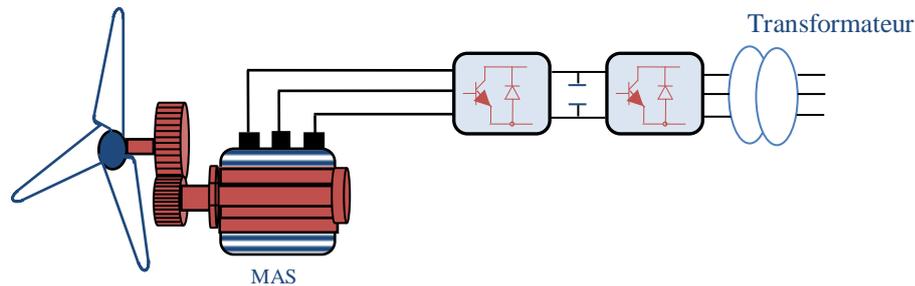
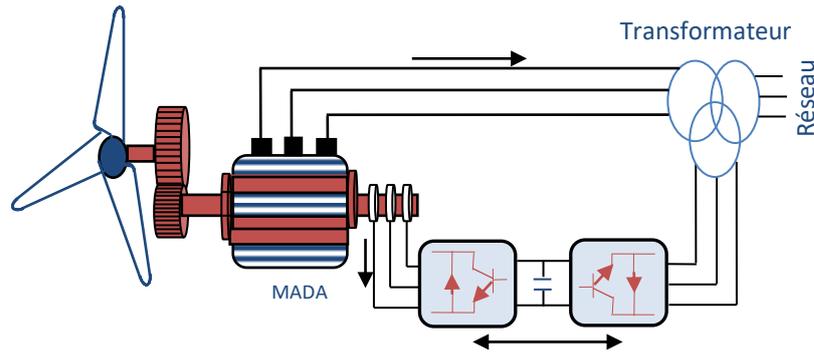


Fig.1.36 Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs

1.14.2.3 Système Utilisant la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

De nos jours, la machine asynchrone à double alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production supérieure à 1MW grâce à ses caractéristiques. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor différent des autres machines, les enroulements du rotor sont couplés en étoile et les extrémités sont connectées à des bagues conductrices. Des balais viennent frotter les bagues lorsque la machine fonctionne. Les enroulements du stator sont directement connectés au réseau alors que les enroulements du rotor passent par les convertisseurs de puissance bidirectionnels pour assurer la variation du glissement cette topologie est, actuellement, le meilleur choix des fabricants dans la plupart des projets de centrale éolienne pour de nombreuses raisons comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances actives et de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive, ainsi la possibilité de se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire. Il est aussi capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour assurer la commande de tension. Il vient du fait que c'est le seul schéma dans lequel la puissance générée peut être supérieure à la puissance nominale de la machine utilisée.

La MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants. C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur. Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, mode hypo-synchrone une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor [5]. Grâce à la production ou l'absorption de la puissance réactive du rotor, la MADA a la possibilité d'assurer le fonctionnement à facteur de puissance unitaire.



1.37 Eolienne utilisant la MADA.

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté (DFIG) dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur de type source de tension en (back-to-back), qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor.

1.14.2.3.1 Machine Asynchrone à Double Alimentation à Energie Rotorique Dissipée

La figure 1.38 montre la technologie qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de celle de synchronisme par le changement de la résistance rotorique. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs [16]

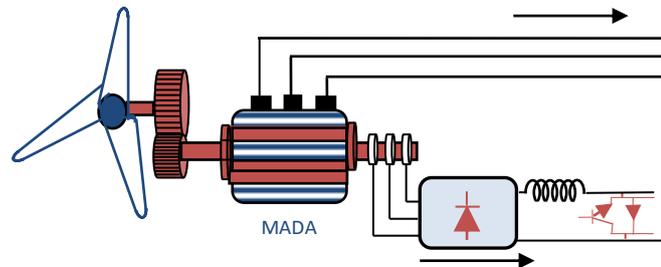


Fig.1.38 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

1.14.2.3.2 MADA -Structure de Kramer

Pour augmenter le rendement de la structure du système précédent, cette structure (fig1.39) consiste à utiliser un pont à diodes et un pont à thyristors. Les tensions entre bagues sont redressées par le pont à diodes. L'onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone. Mais l'inconvénient de cette structure est que l'alimentation ne permet pas l'asservissement électrique de la vitesse de la machine. De plus, l'onduleur triphasé utilisé pour cette structure injecte des courants harmoniques basses fréquences d'amplitude importante [7].

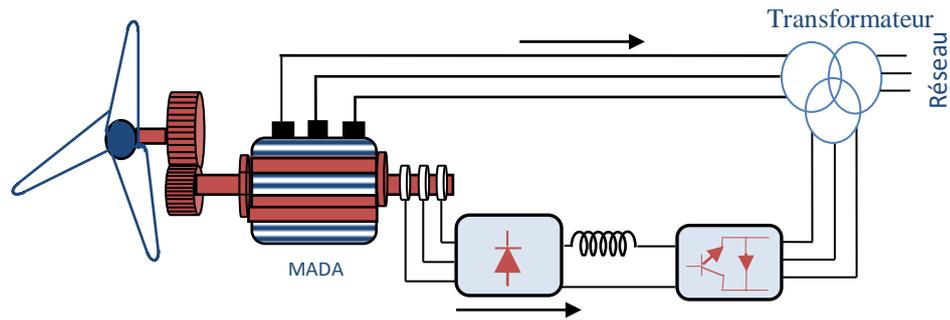
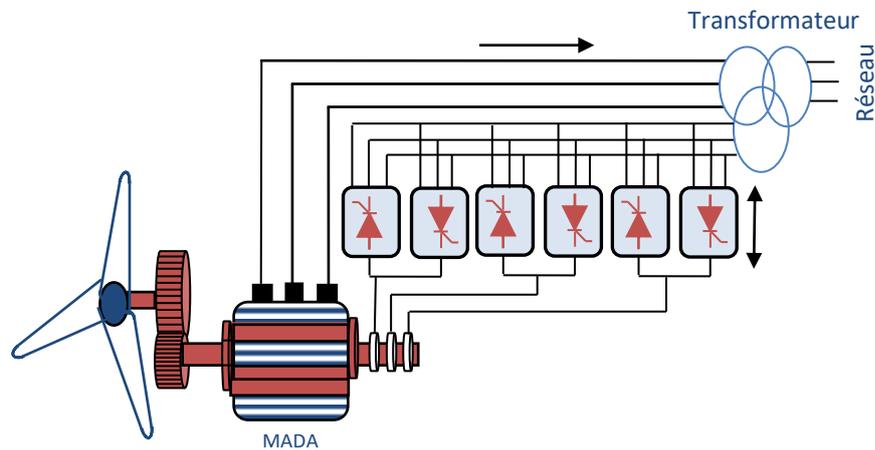


Fig. 1.39 MADA structure Kramer

1.14.2.3.3 MADA Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, cette topologie consiste à remplacer l'association redresseur-onduleur par un cycloconvertisseur. La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Kramer.



1.41 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Ce montage est aussi connu sous la dénomination (topologie statique Scherbius). Formellement, le principe de Scherbius est basé sur l'utilisation de machines tournantes au lieu des convertisseurs de puissance [7].

1.14.2.3.4 MADA – Structure de Scherbius avec Convertisseurs MLI

Cette structure consiste à utiliser deux ponts triphasés d'IGBT commandables par modulation de largeur d'impulsion. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur ; un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté du réseau [7][9]

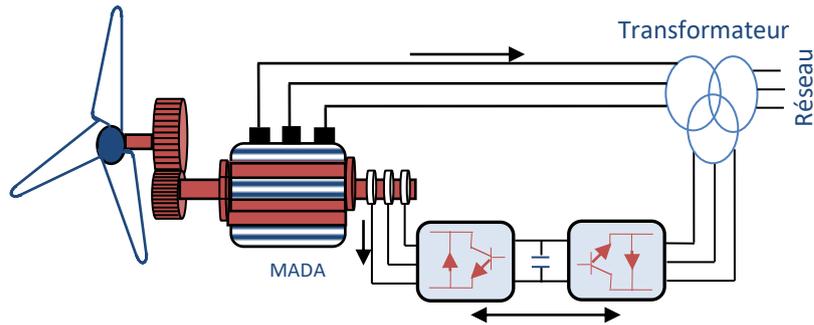


Fig.1.41 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité.

1.14.2.3.5 MADA Alimenté par Deux Convertisseurs Indépendants :

On peut également disposer les convertisseurs à la fois au rotor et au stator. Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

1- Deux cycloconvertisseurs

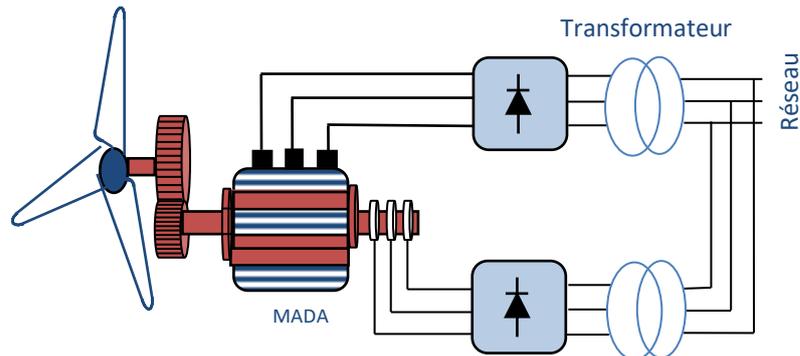


Fig.1.42 Schéma synoptique pour l'alimentation par deux cycloconvertisseurs

Ce montage présente un fonctionnement dans les quatre quadrants en précisant le fonctionnement hypo et hypersynchrone. Il adopte le contrôle vectoriel pour la commande. Ses objectifs consistent à minimiser les harmoniques du couple en agissant sur la fréquence du stator et à assurer un synchronisme des champs tournants en contrôlant les phases des tensions statoriques et rotoriques. Il centre son intérêt aux échanges énergétiques entre les enroulements rotoriques et statoriques dans l'entrefer [11].

2-Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs

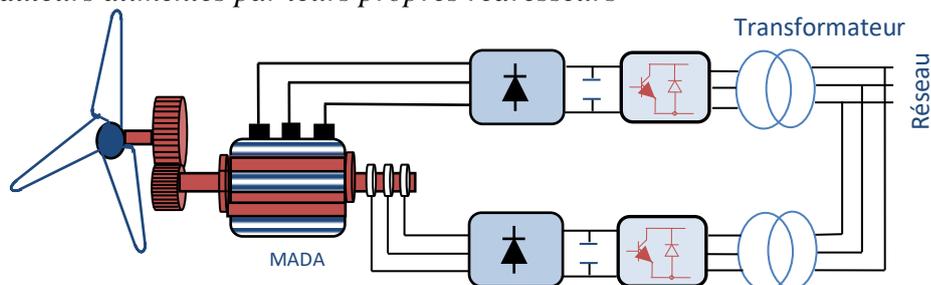


Fig. 1.43 Alimentation de la MADA par deux onduleurs avec deux bus continus indépendants.

Dans [13], il part du principe que la MADA offre quatre degrés de liberté : le flux, le couple, la fréquence et le facteur de puissance et procède à un contrôle indirect du flux d'entrefer en introduisant un courant magnétisant.

3- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur

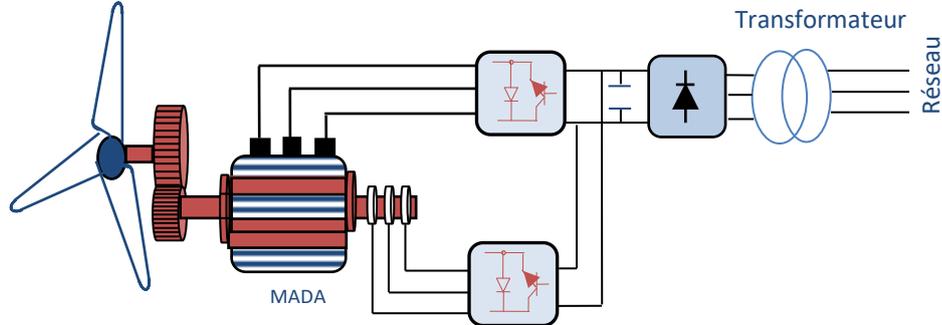


Fig.1.44 Alimentation de la MADA avec deux onduleurs et un bus continu commun.

1.14.2.3.6 MADA en Utilisant Plusieurs Modules de Convertisseurs Statiques à Deux Niveaux en Parallèle.

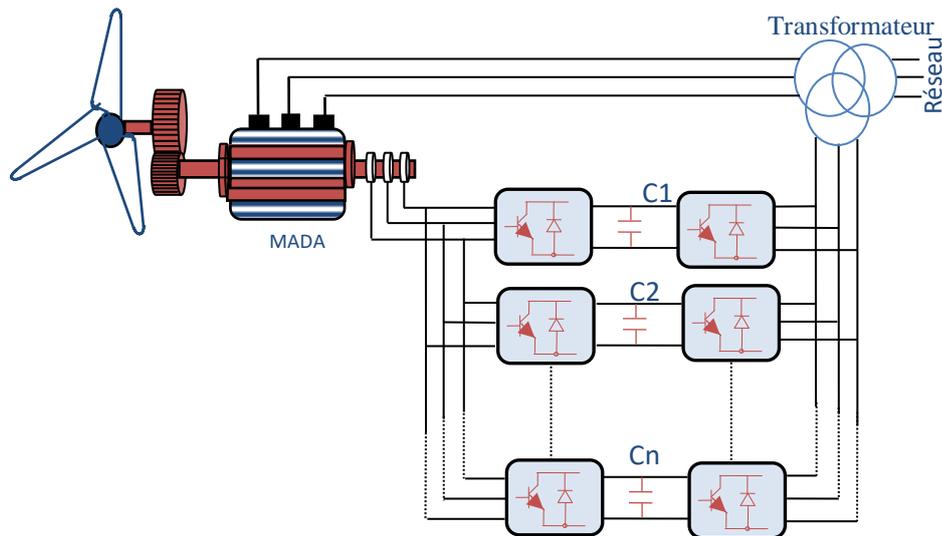


Fig.1.45 MADA en utilisant plusieurs modules de convertisseurs statiques à deux niveaux en parallèle.

1.14.2.3.7 MADA en Utilisant un Convertisseur NPC Multiniveaux.

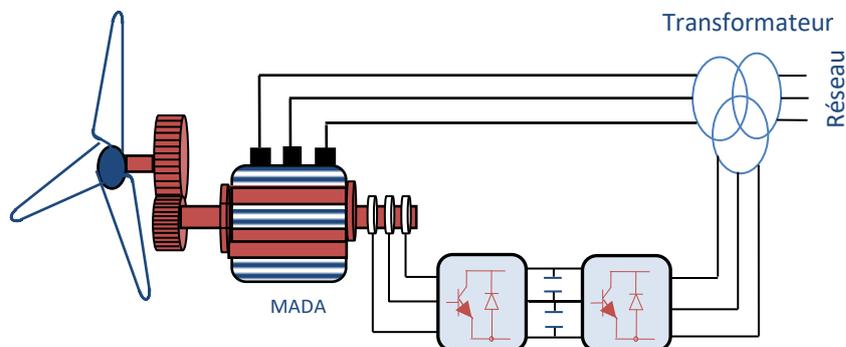


Fig. 1.46 MADA en utilisant un convertisseur NPC multiniveaux.

1.14.2.3.8 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade

La structure en cascade (Fig.1.47) peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée. Grâce à l'ensemble convertisseur/machine-2 on peut maîtriser le courant du rotor 1, et ainsi, on peut fonctionner à fréquence et amplitude constante même si la vitesse du rotor est loin du synchronisme. La puissance à travers l'ensemble convertisseur/machine-2 est proportionnelle au glissement du Rotor1 [12].

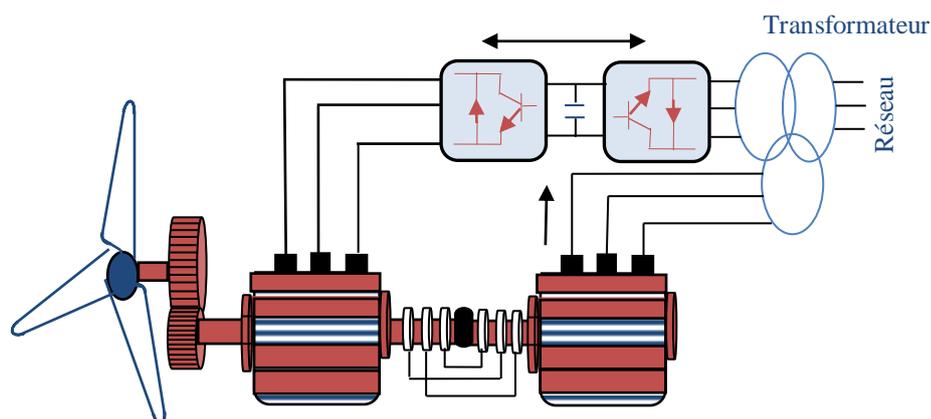


Fig. 1.47 Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade.

1.14.2.3.9 Machine en Cascade Avec une Carcasse Unique et un Rotor à Cage D'écureuil

En partant du concept initial, on peut essayer d'optimiser des aspects tels que l'encombrement, la robustesse, etc. Les deux stators peuvent être inclus dans la même carcasse et le rotor peut adopter une structure à cage (Figure 1.48) [11], [13]. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines, [14].

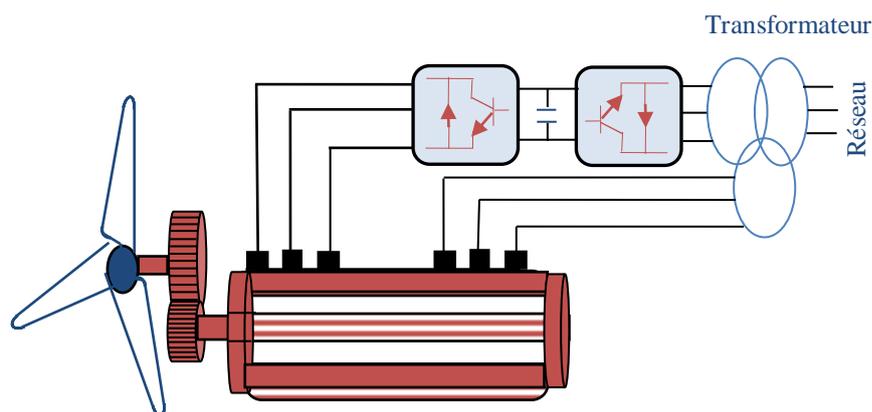


Fig. 1.48 machine en cascade avec une carcasse unique et un rotor à cage d'écureuil croisé.

La modélisation et la commande de cette machine ne présente pas de problèmes particulières : il y a deux machines indépendantes couplées au niveau des courants du rotor. On peut continuer avec l'optimisation si l'on intègre les deux bobinages des deux stators dans le même circuit magnétique [14].

1.14.2.3.10 Génératrice Asynchrone à Double Alimentation en Cascade avec l'une de Deux Machines à Double Etoile

Une autre solution a pour but d'améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système en cascade où l'une des deux machines asynchrones est à double étoile (stator), et, où les deux étoiles sont décalées de 30° entre elles. (Fig.1.49), [9], [13].

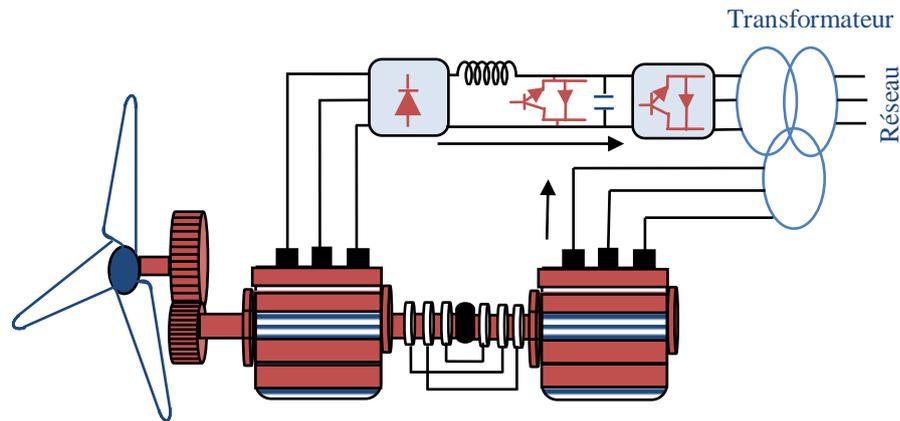


Fig.1.49 Système éolien basé sur le couplage en cascade de deux MADA, l'une à une étoile et la seconde à double étoile

L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût. Car pour un raccordement indirect au réseau, l'éolienne a besoin d'un rectificateur et de deux inverseurs, un pour contrôler le courant du stator, et un autre pour produire le courant de sortie. Actuellement, le prix de l'électronique de puissance a un coût élevé.

1.15 Conclusion

Une synthèse de différentes solutions électrotechniques de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique est présentée dans ce chapitre. Nous avons tout d'abord énoncé quelques chiffres concernant la production d'électricité dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne est devenue incontournable. Ensuite, nous avons présenté les deux technologies d'éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Les éoliennes à vitesse fixe permettent peu de réglage et fonctionnent comme des générateurs passifs. Les éoliennes à vitesse variable offrent plus de possibilités de réglage, mais ont un coût plus élevé. Plusieurs types de chaînes de conversion d'énergie sont abordées. La solution qui utilise la machine asynchrone à double alimentation, dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à travers un convertisseur de puissance est la plus utilisée. Ce type d'éolienne est à la base de ce travail et sera introduit dans la seconde partie.

1.16 Références Bibliographiques

- [1] www.wwindea.org, World Wind Energy Association.
- [2] www.enercon.de.
- [3] www.homerenergy.com.
- [4] Site internet du Centre du Développement et de la Recherche des Energies Renouvelables (CDER) disponible à partir de : <http://portail.cder.dz/spip.php?article1014>, 2012.
- [5] Tarak Ghennam “ Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Polytechnique d’Alger, 2011.
- [6] B Beltran, “ Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation :Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur”, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne occidentale, 2011.
- [7] S. El Aimani, “Modélisation de Différentes Technologies d’Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
- [8] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA, “Contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [9] F. Poitiers, “Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l’Utilisation de L’Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau”, Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, France, 2003.
- [10] F.J POSA, “Modélisation, conception et commande d’une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable.”, Thèse de Doctorat, INP, Grenoble, France, Octobre 2003.
- [11] G. Salloum, “Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [12] A. Boyette, Contrôle – commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 2006
- [13] L. Moreau, Modélisation, conception et commande de génératrices à reluctance variable basse vitesse, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l’Université de Nantes, 2005.
- [14] N. Abu-Tabak, Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines modélisation, commande, observation et simulation, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2008.
- [15] M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [16] A. MIRECKI »Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [17] A. Ahmidi “Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques”, Thèse de doctorat en génie électrique de l’Ecole Centrale de Lille, pp. 1-200, 2010.

Chapitre 2

Modélisation et Commande d'un Système Eolien à Vitesse Variable Basé Sur Une MADA

2.1 Introduction

Aujourd'hui, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées par rapport à celles à vitesse constante, et la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production supérieure à 1MW. Son principal intérêt est qu'elle peut fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Ainsi la possibilité de contrôler de puissance réactive à la production ou l'absorption par le rotor de MADA. Le courant passant au stator a la même fréquence que le courant au réseau. Il nous faut donc adapter la fréquence du courant du rotor à celle du réseau pour que le rotor fournisse de la puissance active au réseau. La stratégie utilisée pour cela est l'introduction de deux convertisseurs de puissance interfacés par un bus continu.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et la commande d'un système de conversion éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone à double alimentation. Dans un premier temps, nous modéliserons les différents composants constituant la turbine éolienne en évoquant le coefficient de puissance C_p . Par la suite, nous présentons la commande vectorielle découplée des puissances active et réactive, ainsi que la stratégie de commande MPPT de la génératrice. La technique de contrôle des deux convertisseurs de puissance côté réseau (CCR) et côté machine (CCM) a été détaillée dans le but de contrôler les puissances active et réactive produites par la MADA, la tension du bus continu DC et le facteur de puissance côté réseau.

2.2 Modélisation du système éolien

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette thèse est constituée d'une turbine éolienne, d'un multiplicateur, d'une machine asynchrone à double alimentation MADA à vitesse variable. Son stator est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu et un filtre triphasé de courant, comme le montre la figure 2.1

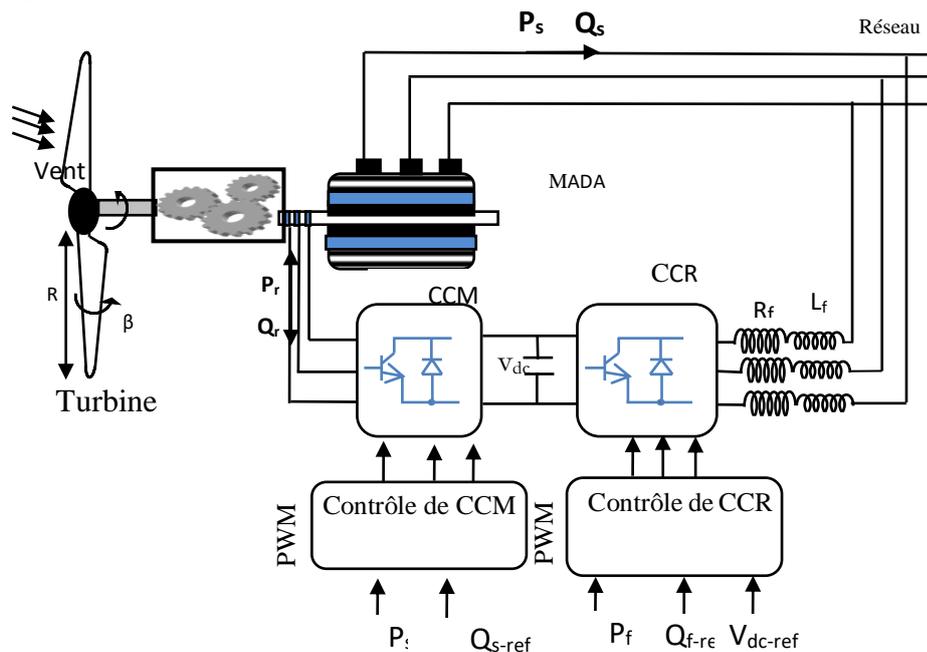


Fig. 2. 1 Système de conversion éolienne à base de la MADA

2.2.1 Modèle de la turbine

La turbine constitue le 1^{er} étage de conversion. Elle est équipée le plus souvent de trois Pâles de longueur R qui permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse v de gain G (Fig. 2.2).

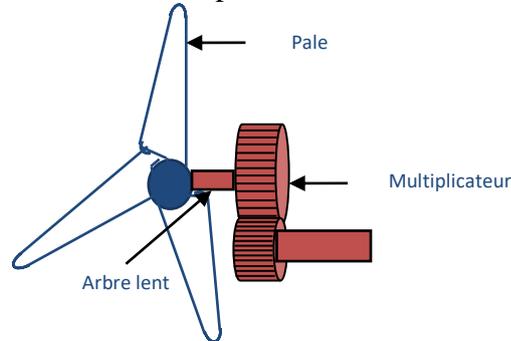


Fig. 2. 2 Turbine éolienne.

2.2.1.1. Modèle des pales

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance incidente (la puissance théorique), due au vent qui s'exerce sur les pales d'une éolienne par :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.1)$$

ρ : la masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C) ;

S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale ;

V : la vitesse du vent (m/s).

Dans un système éolien, à cause des différentes pertes, l'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (P_v). La puissance du vent et la puissance aérodynamique extraite par la turbine P_{air} peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p .

$$P_{air} = \frac{1}{2} c_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (2.2)$$

C_p est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (Fig. 2 .3). Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β).

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (2.3)$$

Ω_t : la vitesse de rotation de la turbine ;

R : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique T_{aero} est donné par l'expression suivante:

$$T_{air} = \frac{P_{air}}{\Omega_t} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \rho s v^2}{2\Omega_t} \quad (2.4)$$

Le coefficient de puissance est intrinsèque à la constitution de l'éolienne. Il représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. On peut modéliser le coefficient de puissance avec une seule équation qui dépend du ratio de vitesse λ et l'angle d'orientation des pales β . [2]

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2.5)$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (2.6)$$

La figure suivante représente la variation de coefficient C_p en fonction du ratio de vitesse λ et l'angle de calage de la pale β

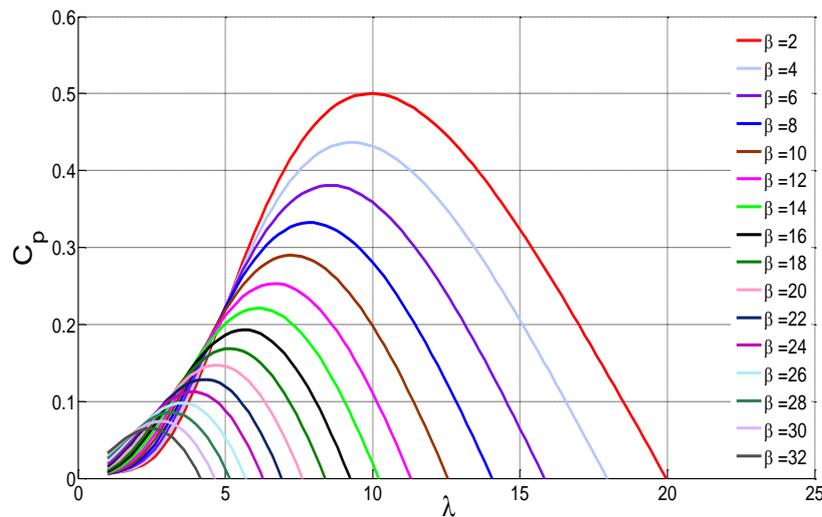


Fig. 2.3 Caractéristique $c_p=f(\lambda, \beta)$

On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à λ_{opt} à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure 2.3 montre le λ_{opt} correspondant à un angle d'inclinaison des pales β_i . Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir $\lambda = \lambda_{opt}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent (équation 2.4), [7].

Ainsi le schéma bloc des pales étudiées est représenté en figure 2.4

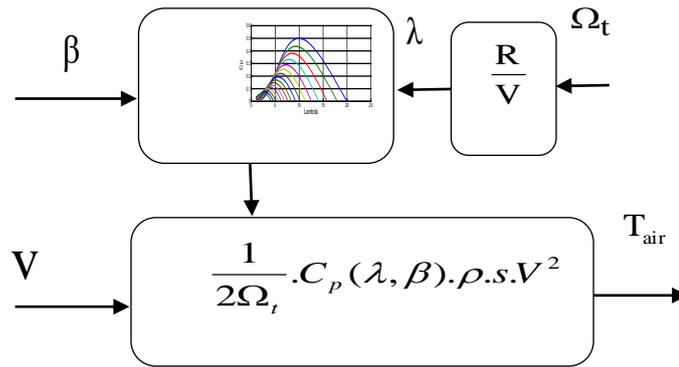


Fig. 2.4 Schéma bloc du modèle des pales

2.2.1.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g .



Fig. 2.5 Modèle mécanique du multiplicateur [15].

Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par les deux équations suivantes :

$$G = \frac{\Omega_t}{\Omega_g} \quad (2.7)$$

$$T_g = \frac{T_t}{G} \quad (2.8)$$

L'équation mécanique exprime l'accélération de l'arbre de la génératrice en fonction du couple total mécanique appliqué :

$$T_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.9)$$

J et Ω_m sont respectivement l'inertie et la vitesse mécanique de la génératrice. Le couple mécanique total est composé de trois couples :

$$T_m = T_g - T_{em} - T_{vis} \quad (2.10)$$

Les frottements des pales, du moyeu, ainsi que de l'arbre, sont groupés dans un seul coefficient de frottement ramené sur l'arbre de la génératrice et appelé f .

$$T_{vis} = f \cdot \Omega_m \quad (2.11)$$

D'après les équations (2.9), (2.10) et (2.11) nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$T_g - T_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + f\Omega_m \quad (2.12)$$

L'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice.

$$J = J_g + \frac{J_t}{G^2} \quad (2.13)$$

Le schéma bloc de la Figure 2.6 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la MADA, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique T_{em} de la MADA. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système [4].

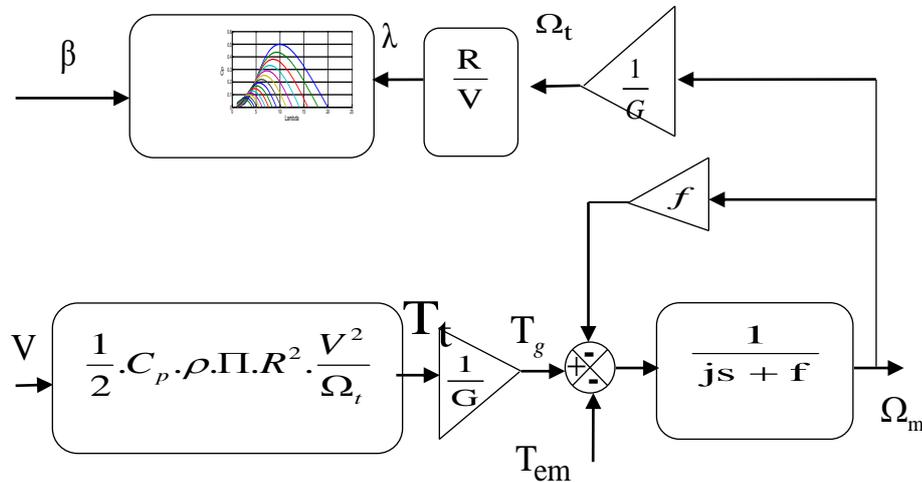


Fig. 2.6 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

2.2.1.3 Modélisation du Système D'orientation des Pales

Le système d'orientation des pales permet d'ajuster la portance des pales afin de maintenir la puissance autour de sa valeur nominale. En réglant l'angle de calage, on agit sur les performances de l'éolienne et plus précisément sur le coefficient de puissance.

Le système d'orientation des pales génère alors un angle de calage de référence qu'on note : β_{ref} . Pour la génération de l'angle de référence β_{ref} , la puissance générée P_g , est comparée à la puissance de référence P_{ref} , l'erreur entre eux, et envoyé au régulateur PI qui génère la valeur de référence de l'angle β_{ref} [8].

Lorsque la vitesse du vent est au-dessus de la nominale, l'objectif de la commande est de maintenir la puissance de sortie constante en agissant sur le système d'orientation des pales. Toutefois, l'angle d'inclinaison n'est pas en mesure d'atteindre la valeur de consigne immédiatement. En conséquence, un limiteur de débit est mis en œuvre dans le modèle de commande de pas. La structure du système d'orientation des pales est donnée par la figure suivante.

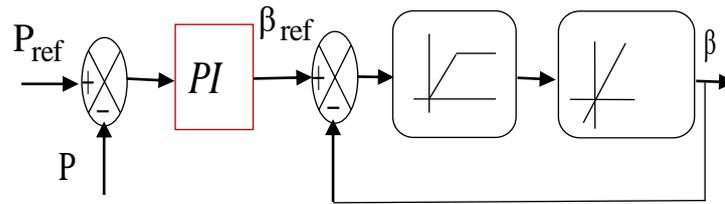


Fig.2.7 Bloc diagramme de pitch control

2.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne (MPPT)

Afin de capter le maximum de puissance de l'énergie éolienne, le système éolien doit être basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT). Il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine à celle du vent. Le dispositif de commande dans ce cas doit imposer la vitesse de la MADA comme une grandeur de référence pour un régulateur de type proportionnel-intégral (PI), celui-ci détermine la consigne de commande qui est le couple électromagnétique de référence de manière à permettre à la MADA de tourner à une vitesse réglable afin d'assurer un point de fonctionnement optimal en terme d'extraction de puissance. Dans ce contexte, le ratio de la vitesse de l'éolienne λ doit être maintenu à sa valeur optimale ($\lambda = \lambda_{opt}$) sur une certaine plage de vitesse de vent. Ainsi, le coefficient de puissance serait maintenu à sa valeur maximale ($C_p = C_{p_max}$) Fig. 2.8.

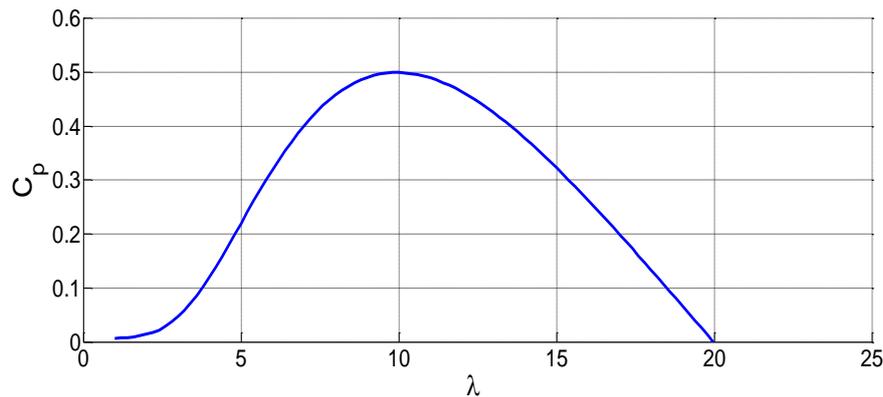


Fig. 2.8 Coefficient de puissance de la turbine

Dans ce cas, la vitesse de rotation de référence de la turbine $\Omega_{t-réf}$ est définie comme :

$$\Omega_{t-réf} = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (2.14)$$

L'expression de la vitesse de référence de rotation de la MADA est liée à celle de la turbine par le gain de multiplicateur G.

$$\Omega_{m-réf} = G \cdot \Omega_{t-réf} \quad (2.15)$$

La figure 2.8 résume le schéma bloc du contrôle MPPT de la turbine éolienne avec asservissement de vitesse de la rotation.

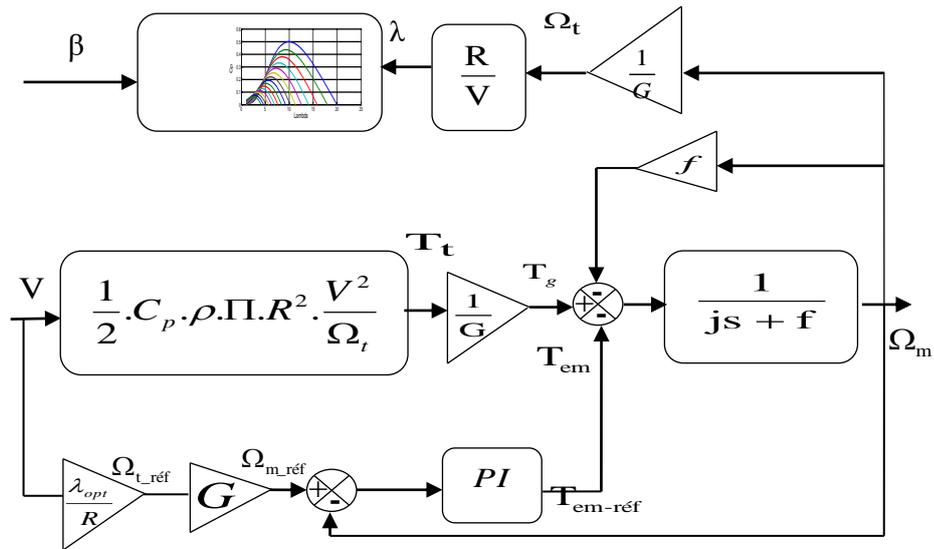
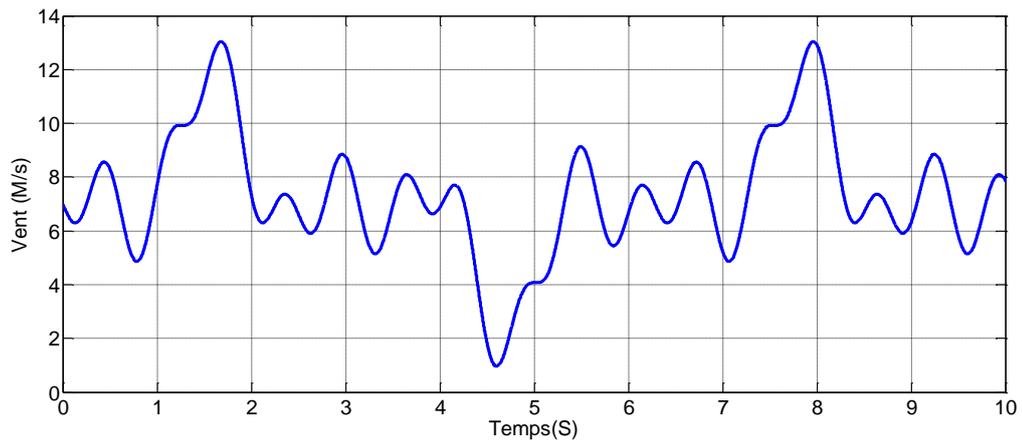
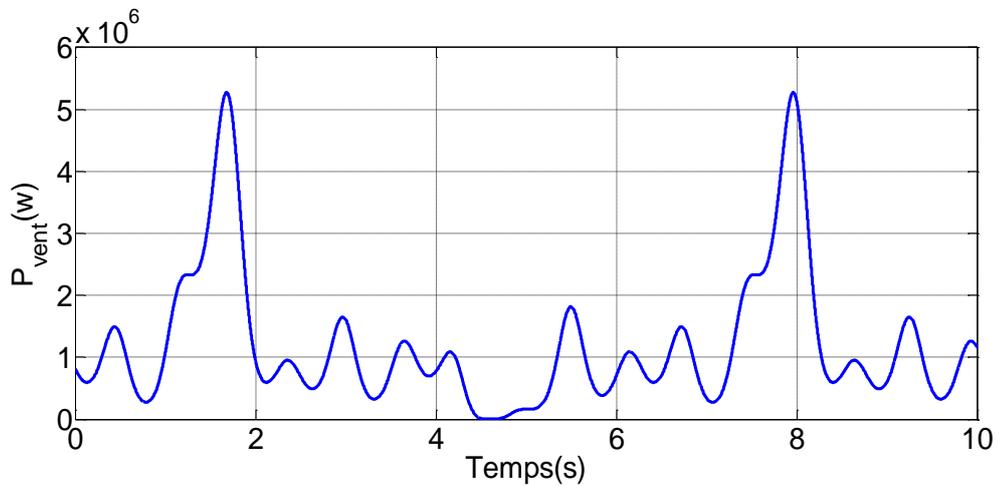


Fig.2.9 Schéma bloc de la stratégie MPPT avec asservissement de la vitesse

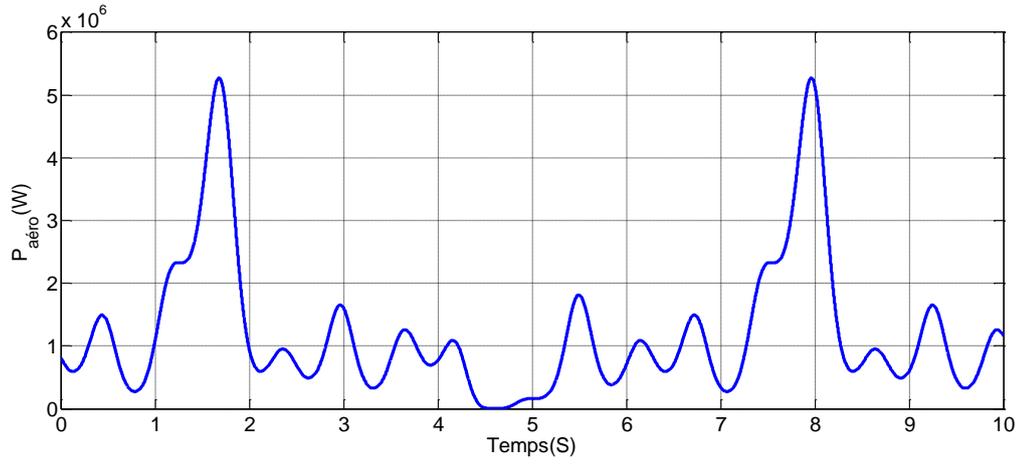
2.2.2 Résultat de Simulation



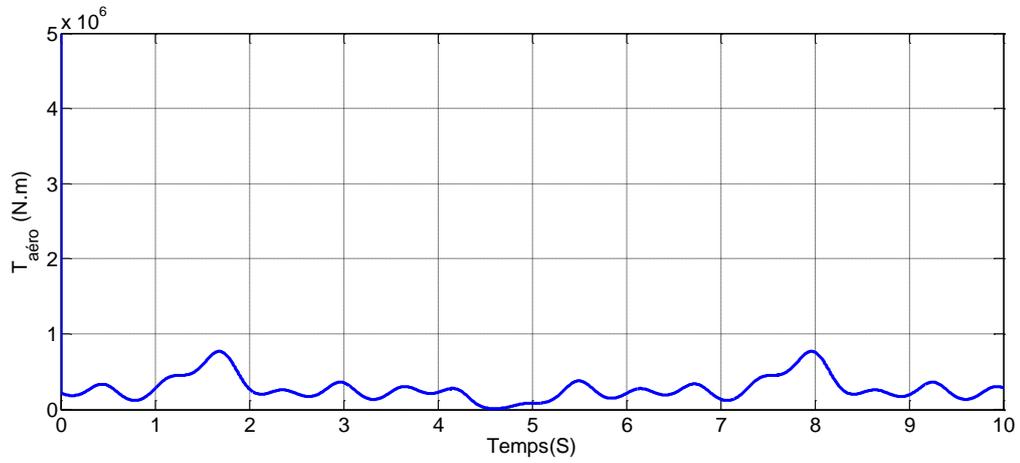
a) Profil du vent appliqué à la turbine



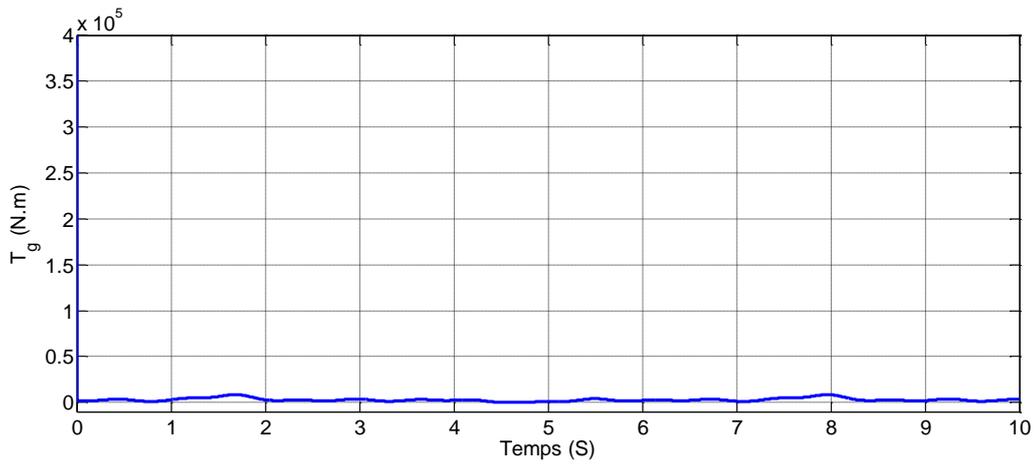
b) Puissance du vent



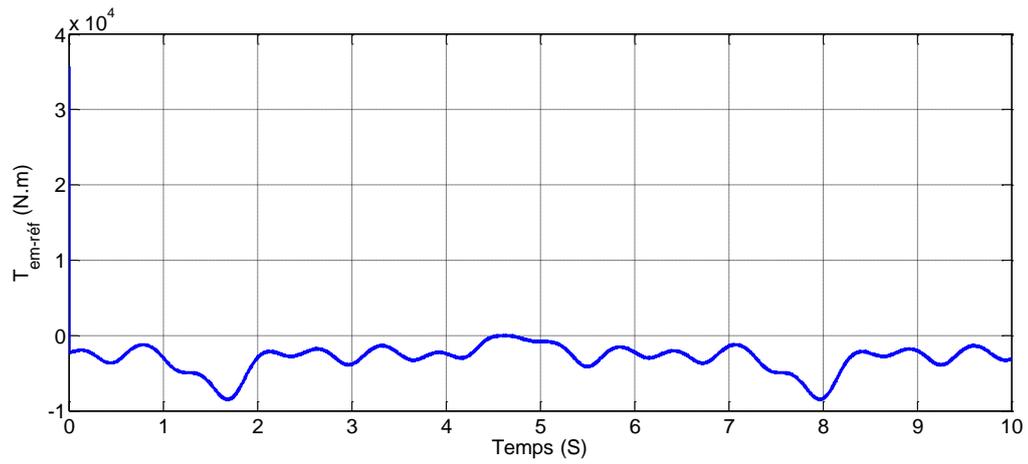
c) Puissance aérodynamique



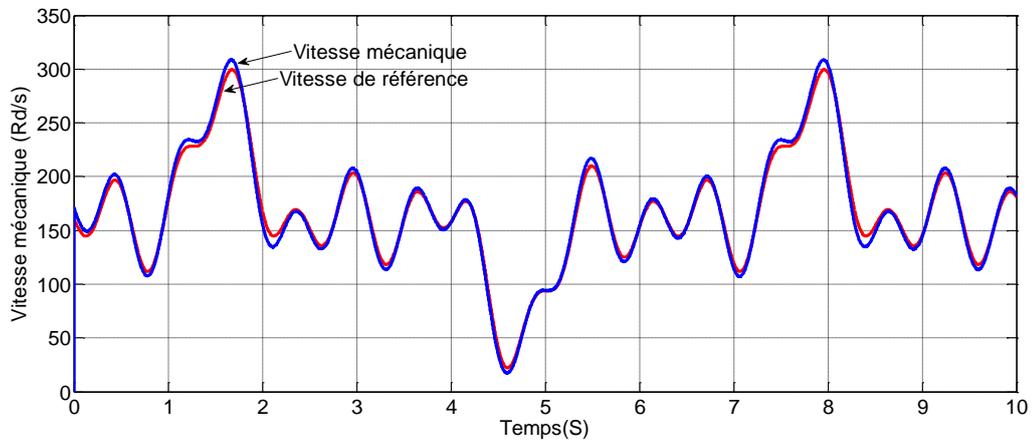
d) Couple Aérodynamique



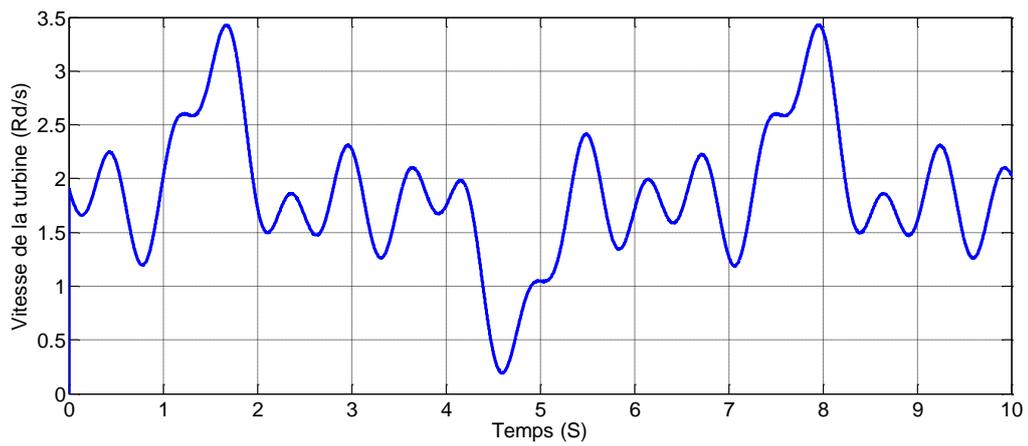
e) Couple du multiplicateur



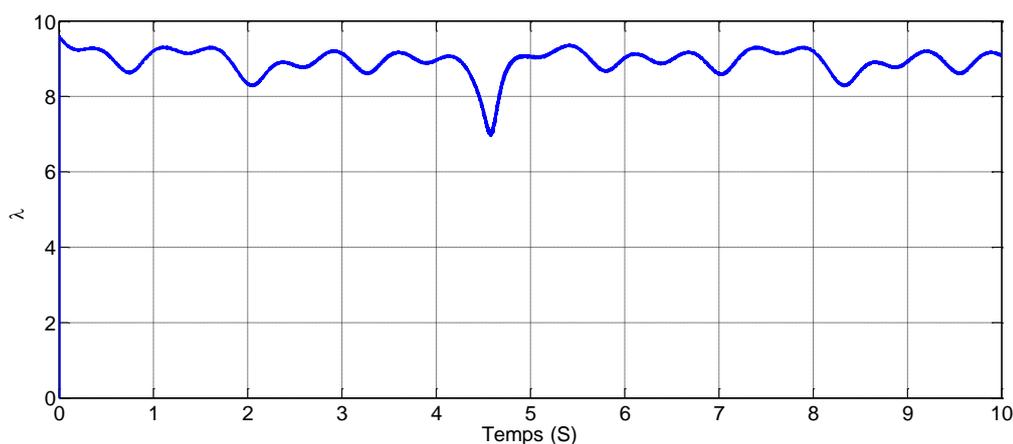
f) Couple électromagnétique de référence de la MADA



g) Vitesse mécanique



h) Vitesse de la turbine



i) Rapport des vitesses en fonction du temps

Fig.2.10 Résultats de simulation de la turbine éolienne

Un essai de simulation a été effectué en utilisant le profil du vent montré sur la figure du vent. La puissance du vent, la puissance aérodynamique disponible au niveau de la turbine, le couple aérodynamique, le couple issu du multiplicateur, le couple électromagnétique de référence, la vitesse mécanique, la Vitesse de la turbine et le Rapport des vitesses en fonction du temps sont illustrées respectivement sur la figure 2.10. Il est à noter que pendant la durée de simulation le système éolien passe par les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone.

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique T_{aero} à partir de la puissance cinétique P_v du vent et par action de l'angle d'orientation des pales β . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique T_{aero} de la turbine en couple du multiplicateur T_g , et en même temps, il transforme la vitesse mécanique en vitesse de la turbine.

2.4 Modélisation de la MADA

2.4.1 Modèle général de la MADA

La mise de la MADA sous forme d'un modèle mathématique nous facilite largement sa commande dans les différents régimes de fonctionnement. Nous devons procéder à quelques simplifications classiques pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la [MADA])

- entrefer constant,
- effet des encoches négligé,
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer,
- influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte,

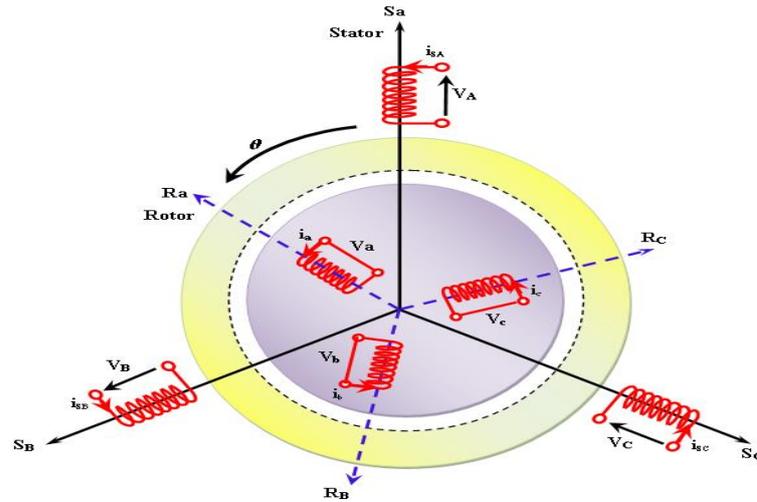


Fig. 2.11 Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé

Avec :

S_a, S_b, S_c : les vecteurs orientés suivant les enroulements statoriques,

R_a, R_b, R_c : les vecteurs orientés suivant les enroulements rotoriques,

θ : l'angle de position entre le stator et le rotor.

Avec les hypothèses précédentes, les équations des tensions des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques s'écrivent :

$$[V_{ABC}] = R_S [i_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\phi_{ABC}] \quad (2.16)$$

$$[V_{abc}] = R_r [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}] \quad (2.17)$$

Les flux totalisés dans les phases statoriques et rotoriques s'exprime sous la forme :

$$[\phi_{ABC}] = [L_S][i_{ABC}] + [M][i_{abc}] \quad (2.18)$$

$$[\phi_{abc}] = [L_r][i_{abc}] + [M][i_{ABC}] \quad (2.19)$$

L_S : l'inductance cyclique statorique;

L_r : l'inductance cyclique rotorique;

M : l'inductance mutuelle.

2.4.2 Modèle de la MADA dans le repère de Park

La machine asynchrone à double alimentation a des équations compliquées dans le repère triphasé abc. La complexité provient du fait que la matrice $[M]$ varie même lorsque la vitesse est en régime stationnaire [12]. La transformation de PARK permet le passage d'un repère triphasé à un modèle biphasé. Ce qui réduit considérablement la complexité du modèle en vue de sa commande.

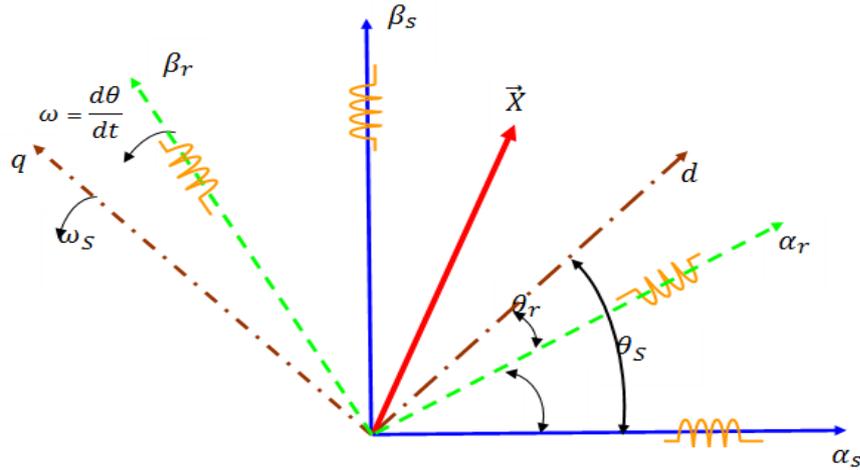


Fig. 2.12 Transformation de repères

Les équations de la MADA dans un repère tournant à la vitesse électrique ω_s et pour un rotor tournant à la vitesse électrique $p\Omega$ sont données comme suit.

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \quad (2.20)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd}$$

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \quad (2.21)$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd}$$

Avec :

v_{sd} et v_{sq} : les tensions statoriques dans le repère de Park,

v_{rd} et v_{rq} : les tensions rotoriques dans le repère de Park,

i_{sd} et i_{sq} : les courants statoriques dans le repère de Park,

i_{rd} et i_{rq} : les courants rotoriques dans le repère de Park,

ϕ_{sd} et ϕ_{sq} : les flux statoriques dans le repère de Park,

ϕ_{rd} et ϕ_{rq} : les flux rotoriques dans le repère de Park,

R_s et R_r : les résistances respectives des bobinages statorique et rotorique,

θ_s et θ_r : les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques.

Les flux statoriques et rotoriques sont donnés par :

$$\phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \quad (2.22)$$

$$\phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq}$$

$$\phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \quad (2.23)$$

$$\phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq}$$

Le couple électromagnétique s'exprime quant à lui en fonction des courants statoriques et des flux statoriques par :

$$T_{em} = p(I_{sq}\phi_{sd} - I_{sd}\phi_{sq}) \quad (2.24)$$

Il peut également s'exprimer en fonction des courants rotoriques et des flux statoriques par :

$$T_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rd} \phi_{sq} - I_{sd} \phi_{rq}) \quad (2.25)$$

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

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s &= V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} P_r &= V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r &= V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{aligned} \quad (2.27)$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p\Omega \quad (2.28)$$

ω_r et ω_s représentent respectivement les pulsations des tensions rotoriques et statoriques en rad/s. Les angles θ_r et θ_s sont obtenus respectivement par intégration de ω_r et ω_s .

Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statoriques (θ_s) et pour les grandeurs rotoriques (θ_r), nous avons utilisé une boucle à verrouillage de phase appelée plus communément PLL (Phase Locked Loop), comme l'illustre la Figure suivante. Cette PLL permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau [5].

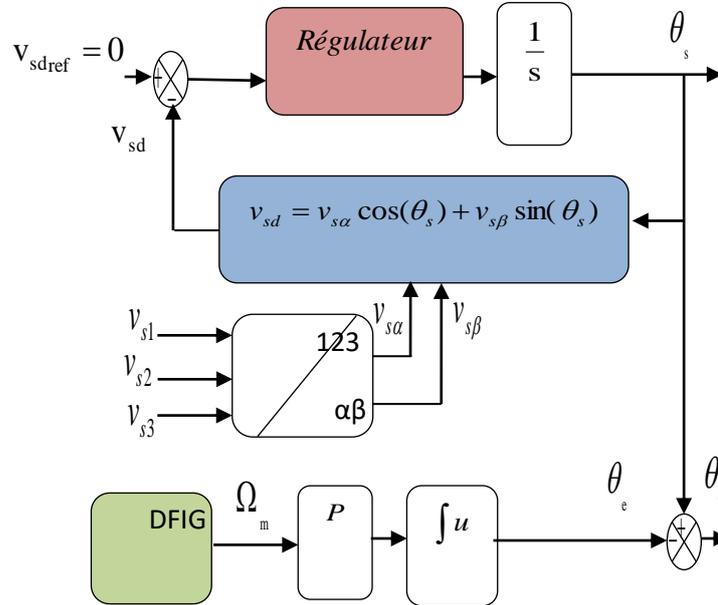


Fig. 2.13 Schéma bloc d'une PLL

La phase rotorique forme un angle électrique θ_e avec la phase statorique (Figure 2.14). Ainsi, l'angle θ_r nécessaire aux transformations rotoriques est le résultat de la soustraction des angles θ_s et θ_e . Pour la méthode ici décrite, deux capteurs de tension et un capteur de vitesse sont donc nécessaires pour établir ces différents angles [5].

2.4.3 Modèle de la MADA avec orientation du flux

On peut orienter le flux par rapport au stator, par rapport au rotor ou par rapport au champ tournant. Ces différentes orientations nous permettent d'obtenir plusieurs manières de contrôler la MADA via le convertisseur (redresseur) [13].

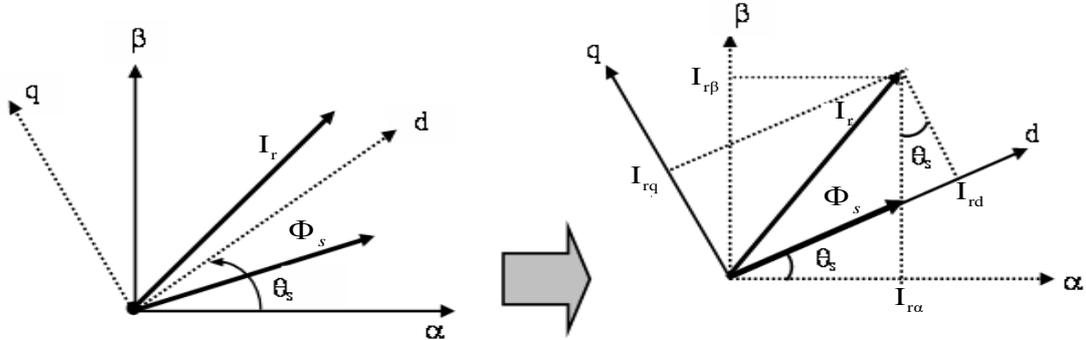


Fig. 2.14 Orientation de flux statorique

Si on oriente le référentiel suivant l'axe d , on contrôle le flux et si on oriente le référentiel suivant l'axe q on contrôle le couple. Ce qui nous permettra d'obtenir une solution afin d'isoler les variables en quadrature de couple et de flux. Dans le cas de l'orientation selon le flux statorique dans le référentiel (d, q) , on aura :

$$\begin{aligned}\phi_{sd} &= \phi_s \\ \phi_{sq} &= 0\end{aligned}\quad (2.29)$$

La Fig. (2.14), nous montre que l'expression du couple n'est fonction que des composantes biphasées du courant d'alimentation de la machine, I_{rd} et I_{rq} .

La composante d'axe d du courant rotorique I_{rd} est alors directement proportionnelle à l'amplitude du flux statorique. En réglant et en maintenant constante l'amplitude de la composante du courant rotorique I_{rd} , nous obtenons ainsi le découplage entre la commande du couple et celle du flux de la machine. Le contrôle du couple ne dépend, dans ce cas, que de la composante d'axe q du courant rotorique I_{rq} [5].

Et l'équation de flux devient :

$$\begin{aligned}\varphi_{sd} &= L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 &= L_s I_{sq} + M I_{rq}\end{aligned}\quad (2.30)$$

Dans le domaine de la production de l'énergie éolienne, ce sont des machines de moyenne et de forte puissance qui sont surtout utilisées. Ainsi, nous négligeons la résistance statorique, et on considère que le réseau électrique est stable, ayant pour tension simple V_s . Cette considération associée à l'équation (2.19), nous permet donc d'écrire :

$$\begin{aligned}V_{sd} &= \frac{d}{dt} \varphi_s = 0 \\ V_{sq} &= \omega_s \varphi_s = V_s\end{aligned}\quad (2.31)$$

A partir de l'équation (2.30), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{aligned}
I_{sd} &= -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\phi_s}{L_s} \\
I_{sq} &= -\frac{M}{L_s} I_{rq}
\end{aligned}
\tag{2.32}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices considérées dans notre cas donne :

$$\begin{aligned}
P_s &= -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\
Q_s &= -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + V_s \frac{\phi_s}{L_s}
\end{aligned}
\tag{2.33}$$

On remplace l'équation (2.32) dans l'équation (2.23), l'expression des flux devient :

$$\begin{aligned}
\phi_{rd} &= (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\
\phi_{rq} &= (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq}
\end{aligned}
\tag{2.34}$$

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques comme suit [12] :

$$\begin{aligned}
V_{rd} &= R_r I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\
V_{rq} &= R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s}
\end{aligned}
\tag{2.35}$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. La figure ci-dessous décrit le schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation [12].

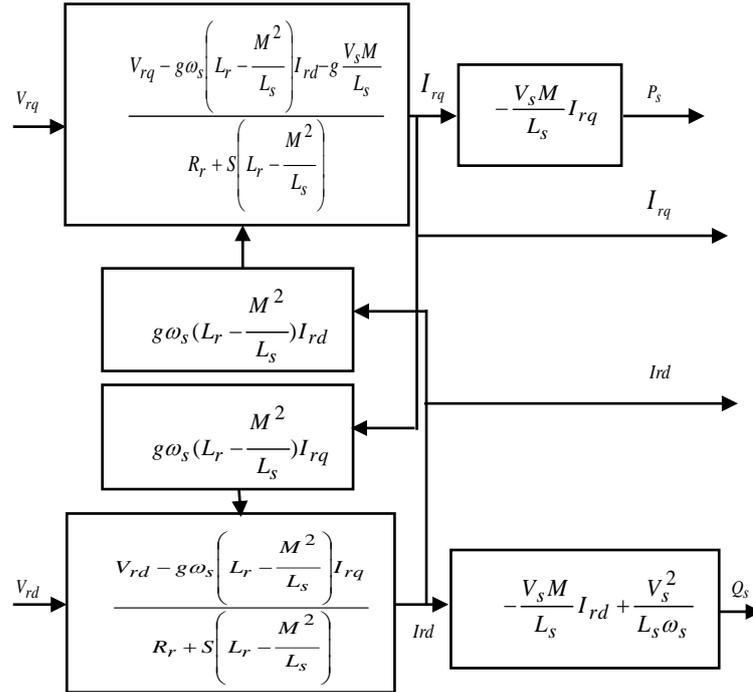


Fig. 2.15 Schéma bloc de la MADA

2.5 Commande vectorielle de la MADA

Dans cette section, nous allons présenter la structure détaillée de la commande vectorielle en puissance de la MADA Figure (2.16). Elle consiste à faire suivre à la MADA une consigne en puissance, avec la meilleure dynamique électrique, en tenant compte de la limite de fréquence de commutation des interrupteurs des convertisseurs de puissance, il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre part entre la puissance réactive et la tension V_{dr} . Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure suivante.

Des régulateurs de puissance de type PI sont utilisés. Ils permettent d'atteindre à la fois une bonne dynamique et une bonne robustesse. Dans le but d'avoir un facteur de puissance unitaire côté stator, on maintient la puissance réactive statorique mise en jeu nulle ($Q_s = 0$).

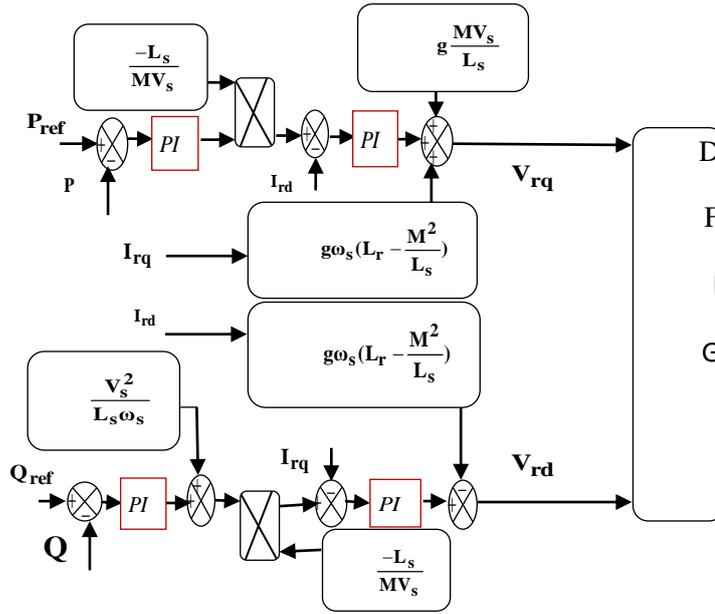


Fig.2.16 Schéma de principe de la commande vectorielle en puissance de la MADA

2.6 Contrôle du convertisseur coté MADA

L'onduleur de tension représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'il permet entre autre de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas [5]. Il reçoit les puissances active et réactive de référence, P_{sref} , Q_{sref} de l'unité de supervision locale de chaque éolienne et envoie les ordres de commande au convertisseur comme montré sur la figure (2.17)

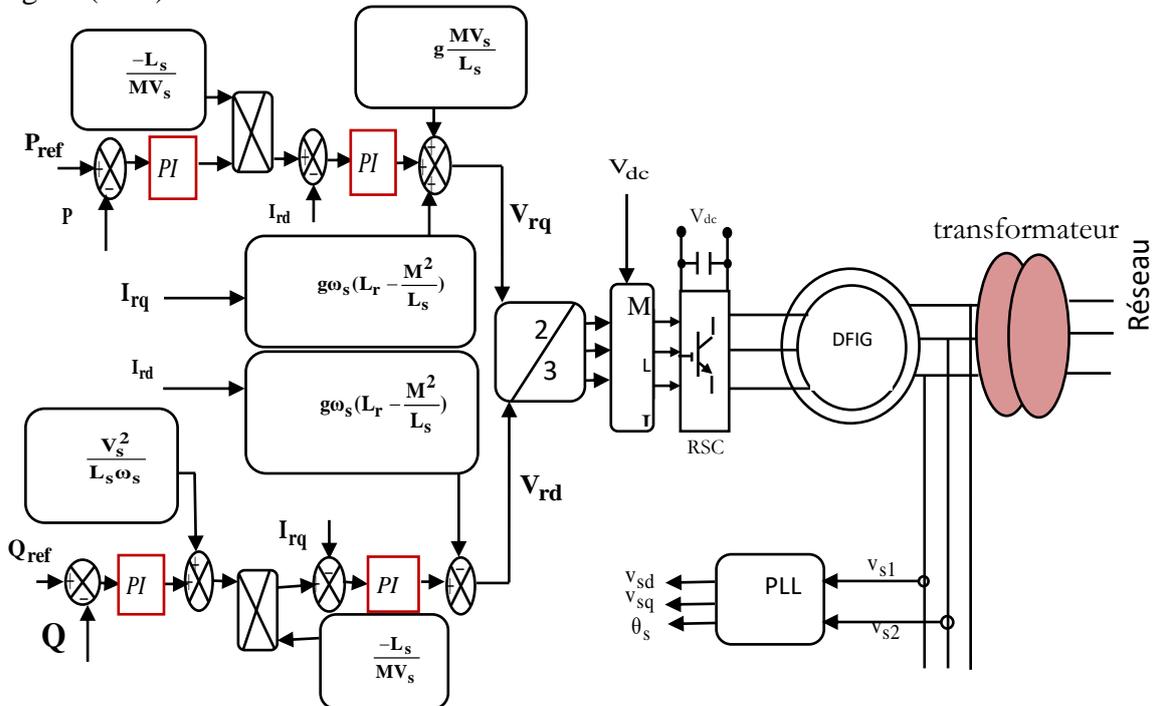


Fig. 2.17 Contrôle du convertisseur coté MADA

Le schéma bloc du contrôle du convertisseur coté MADA est constitué de trois étages; contrôle de puissance, contrôle de courant et contrôle du convertisseur.

2.7 Contrôle du convertisseur côté Réseau

L'objectif du contrôle du convertisseur coté réseau consiste à réguler la tension du bus continu et à contrôler les puissances active et réactive transitant à travers ce dernier. Le facteur de puissance peut être fixé à 1 en imposant simplement une puissance réactive nulle [5].

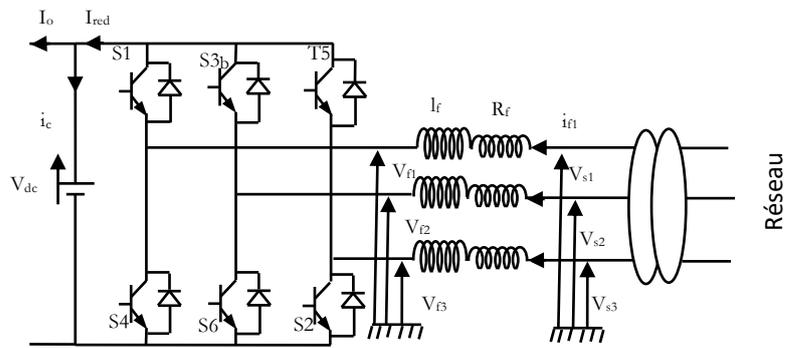


Fig2. 18 convertisseur coté Réseau

Un contrôle vectoriel avec l'orientation du repère de Park selon le vecteur de tension réseau est utilisé pour permettre un découplage entre le contrôle de la puissance active et réactive.

Le contrôle du convertisseur CCR connecté au réseau électrique est réalisé pour les deux fonctions suivantes :

- le contrôle des courants circulant dans le filtre RL ;
- le contrôle de la tension du bus continu.

A partir d'un contrôle en boucle fermée de la tension du bus continu, une puissance active de référence est générée. Associées à une puissance réactive de référence, les références pour les courants sont calculées puis réglées par un contrôle en boucle fermée interne. Enfin, le contrôle du convertisseur permet d'imposer les tensions nécessaires (fig. 7).

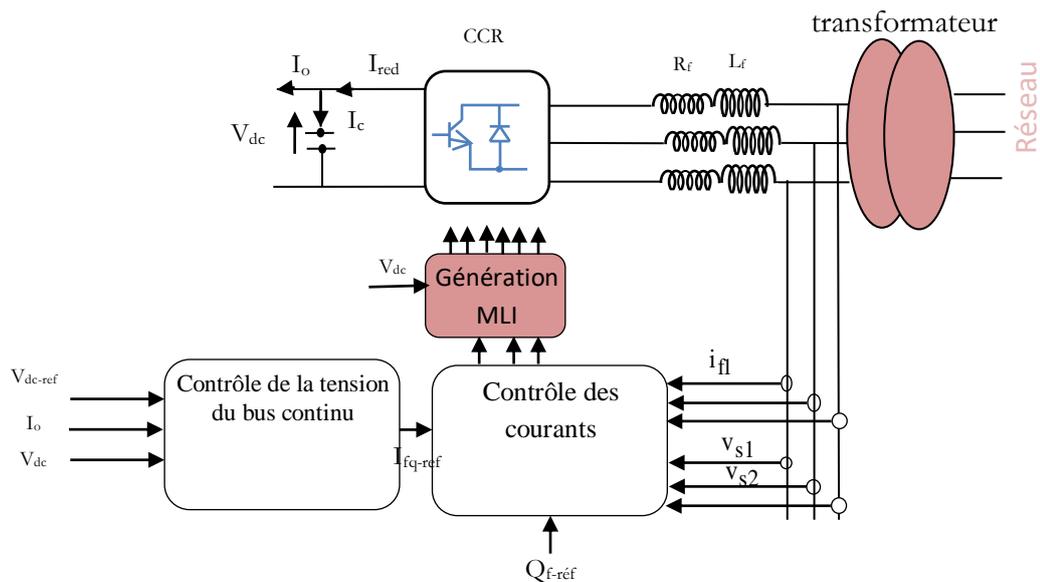


Fig.2.19 Principe de la commande du CCR[5]

2.7.1 Contrôle des courants transitant dans le filtre RL

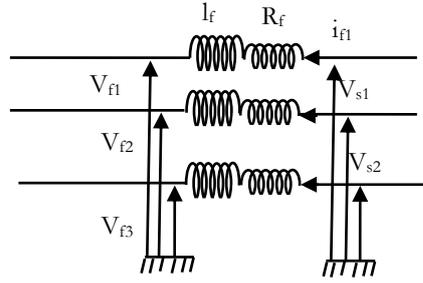


Fig.2.20 Filtre côté réseau

D'après la Figure 2.20, nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes [5] :

$$\begin{aligned} V_{f1} &= -R_f i_{f1} - l_f \frac{di_{f1}}{dt} + v_{s1} \\ V_{f2} &= -R_f i_{f2} - l_f \frac{di_{f2}}{dt} + v_{s2} \\ V_{f3} &= -R_f i_{f3} - l_f \frac{di_{f3}}{dt} + v_{s3} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Dans le repère dq lié au champ tournant statorique, les équations (2.37) deviennent :

$$\begin{aligned} V_{fd} &= -R_f i_{fd} - l_f \frac{di_{fd}}{dt} + \omega_s l_f i_{fq} + v_{sd} \\ V_{fq} &= -R_f i_{fq} - l_f \frac{di_{fq}}{dt} - \omega_s l_f i_{fd} + v_{sq} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Avec:

$$\begin{aligned} e_{fd} &= \omega_s l_f i_{fq} \\ e_{fq} &= -\omega_s l_f i_{fd} + v_{sq} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère dq suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes dq .

Comme pour la régulation des courants rotoriques, nous modélisons le convertisseur par un gain G_e égal à 1. Le schéma bloc des boucles de régulation des courants d'axes dq est décrit à la Figure 2.21. Les correcteurs utilisés sont de type PI. Dans ces schémas blocs de régulation apparaissent les termes de compensation et de découplage des axes dq ainsi que les modèles du CCR et de la liaison de celui-ci au réseau via le filtre RL suivant le repère dq . [5].

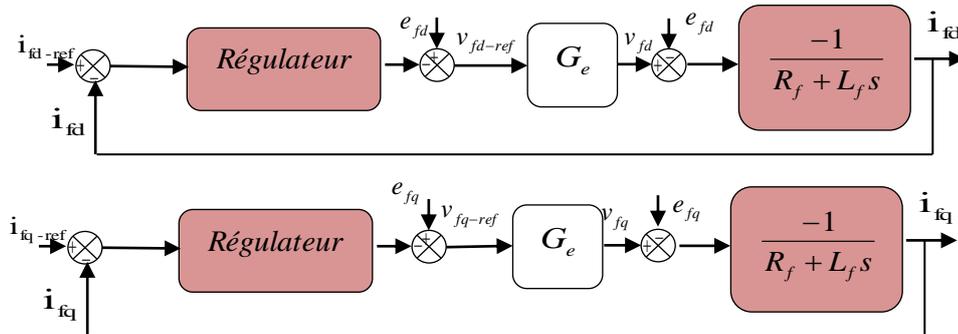


Fig.2.21 Contrôle des courants circulant dans le filtre RL[5].

Les puissances active et réactive transitant à travers le convertisseur côté réseau, peuvent être exprimées en utilisant les composantes de Park des tensions apparaissant au niveau du filtre (v_{fd} , v_{fq}) et les courants traversant le filtre (i_{fd} , i_{fq}) :

$$\begin{aligned} P_f &= v_{fd}i_{fd} + v_{fq}i_{fq} \\ Q_f &= v_{fq}i_{fd} - v_{fd}i_{fq} \end{aligned} \quad (2.40)$$

En négligeant les pertes dans le filtre de courant, les expressions suivantes peuvent être écrites

$$\begin{aligned} v_{fd} &= v_{sd} = \mathbf{0} \\ v_{fq} &= v_{sq} = v_s \end{aligned} \quad (2.41)$$

Les expressions des puissances active P_f et réactive Q_f peuvent être simplifiées comme suit :

$$\begin{aligned} P_f &= v_{sq}i_{fq} \\ Q_f &= v_{sq}i_{fd} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Les courants de référence (i_{fd-ref} , i_{fq-ref}) qui permettent d'imposer les puissances de référence (P_{fd-ref} , P_{fq-ref}) sont alors donnés par:

$$\begin{aligned} i_{fd-ref} &= \frac{Q_{f-ref}}{v_{sq}} \\ i_{fq-ref} &= \frac{P_{f-ref}}{v_{sq}} \end{aligned} \quad (2.43)$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle, est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée ($Q_{f-ref} = 0$ VAR).

2.7.2 Contrôle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur C est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur.

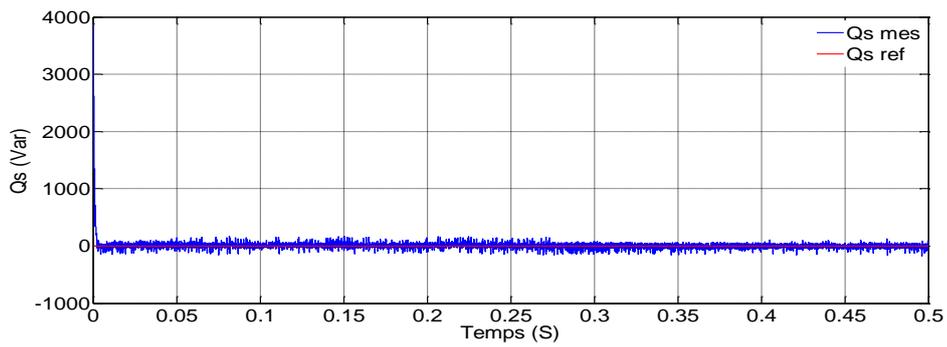
$$C \cdot \frac{dv_{dc}}{dt} = (i_{red} - i_o) \quad (2.44)$$

La tension de référence du bus continu v_{dc-ref} est comparée à celle mesurée aux bornes du condensateur équivalent v_{dc} . Le correcteur Proportionnel Intégral (PI) permet de maintenir une tension constante du bus continu en générant la référence du courant à injecter dans le condensateur i_{c-ref} . La puissance nécessaire pour charger ce condensateur P_{c-ref} est obtenue simplement par la multiplication du courant de charge i_{c-ref} et la tension v_{dc} .

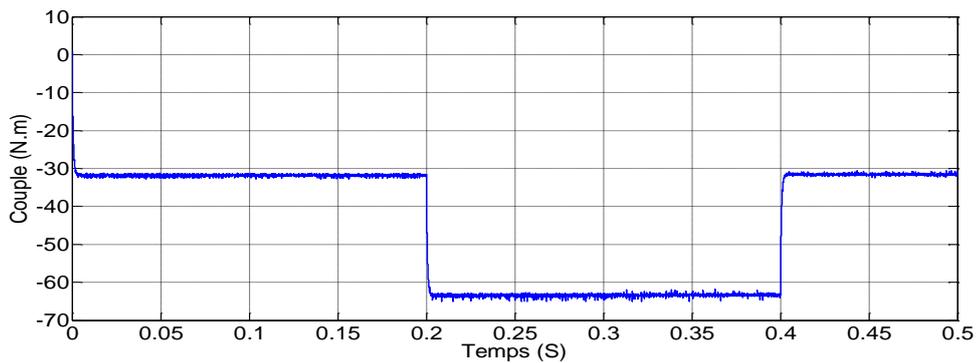
Le courant dans le condensateur est issu d'un noeud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (Fig 2.19)

$$i_c = (i_{red} - i_o) \quad (2.45)$$

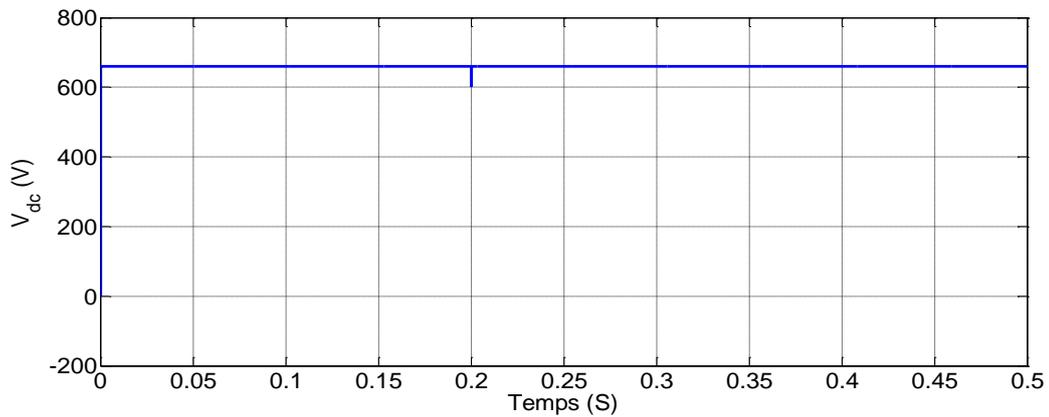
La Figure (2.22) présente le schéma bloc du contrôle de la tension du bus continu. On considère, pour simplifier la chaîne de régulation, que le courant de référence i_{fq-ref} est



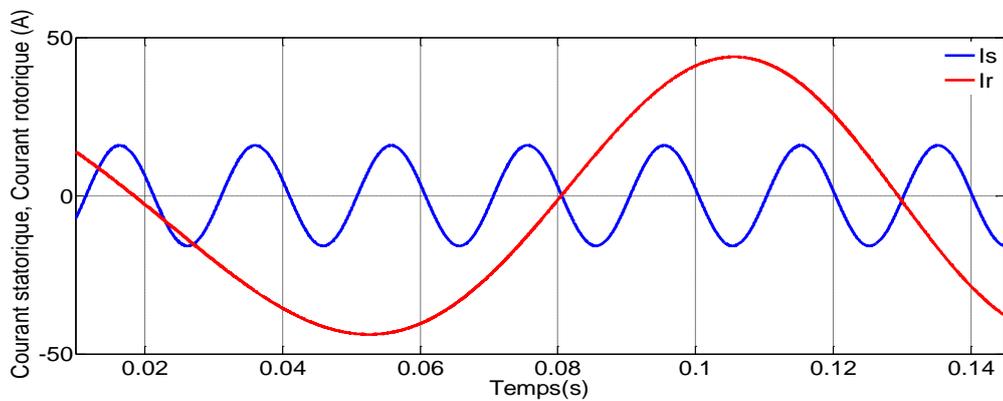
b) puissance réactive



c) Couple électromagnétique



d) Tension du bus continu



e) Zoom sur le courant rotorique et statorique

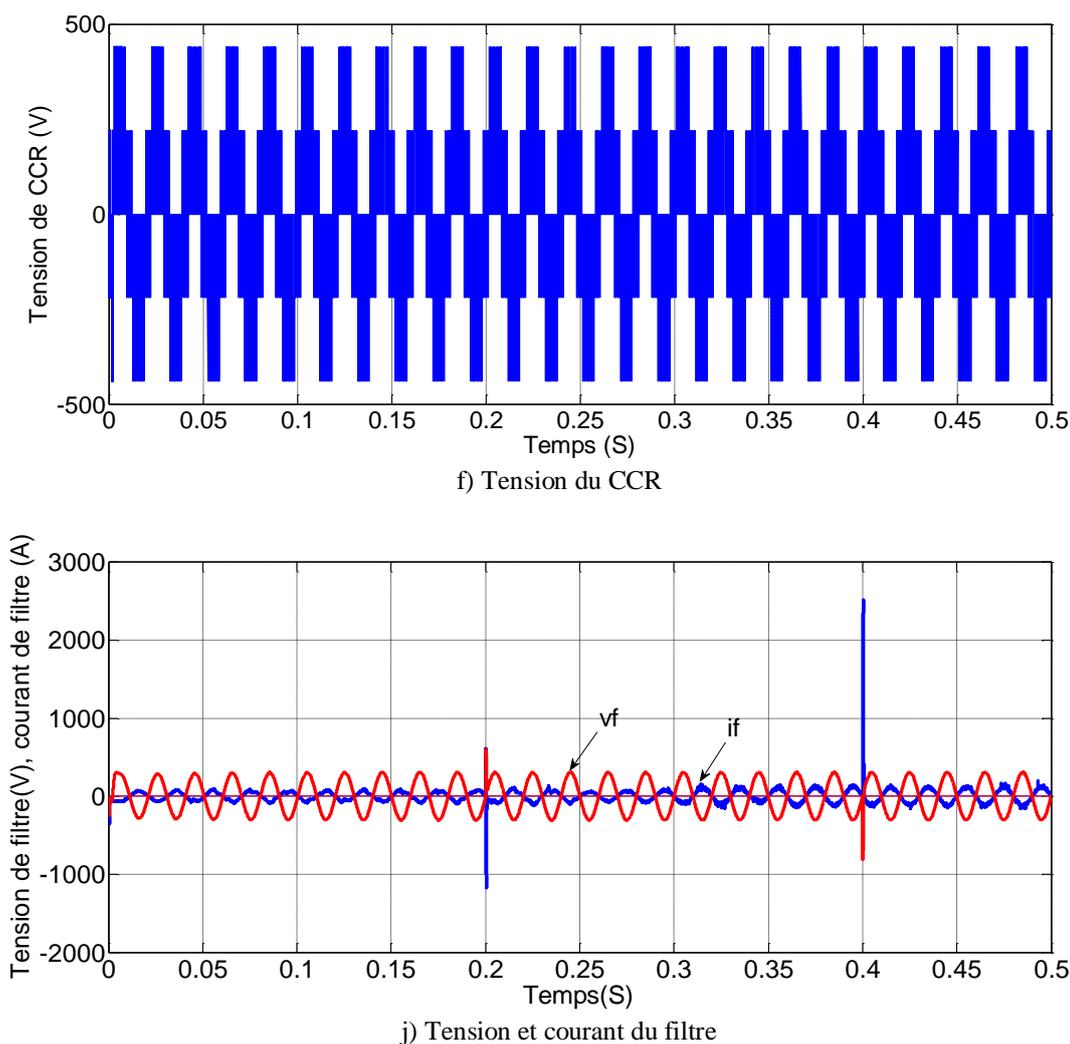


Fig.2.24 résultats de simulation

L'analyse par simulation effectuée, traite du système éolien permettant le contrôle des puissances active et réactive à travers la commande découplée de ces dernières (Fig. 2.24). Les Figure (2.24.a) et (2.24.b) montrent que les puissances active et réactive délivrées par la MADA suivent bien les références correspondantes. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la MADA.

Nous constatons de la figure du filtre, que le courant délivré par le système éolien est en opposition de phase par rapport à la tension. Ceci confirme que le système éolien n'injecte que la puissance active dans le réseau.

La tension du bus continu v_{dc} est maintenue constante quelles que soient les variations des puissances.

Pour éviter la complexité de bloc de calcul de modulation de tension MLI et la nécessité de faire un découplage des courants par rapport aux tensions et pour réduire le nombre des régulateur et d'améliorer les Caractéristiques dynamiques du système on va proposer au 3^{ième} chapitre.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation, la simulation et l'analyse d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse variable. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Un fonctionnement stable du système éolien a été obtenu avec l'application de la stratégie d'extraction de maximum de puissance (MMPT). La commande découplée des puissances active et réactive permet de réguler les puissances active et réactive fournies au réseau selon des consignes de référence bien définies. La stratégie de commande des convertisseurs côté machine (CCM), et côté réseau (CCR) a été élaborée dans l'objectif de réguler la tension du bus continu et de contrôler les puissances active et réactive transisant, et d'imposer au système de fonctionner avec un facteur de puissance unitaire.

Le fonctionnement global du système de l'aérogénérateur et sa commande ont été illustrés par les réponses à la commande en puissance, en régimes transitoire et permanent. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de ce mode de contrôle.

2.9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. K. Mishra, L. Ramesh, S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, « Review of Wind Turbine System and its Impact for Grid Stability », *Journal of Electrical Engineering*. Vol.11, Issue 1. 2011. pp. 153–165.
- [2] L. Shuhui, T.A. Haskew, « Analysis of Decoupled d-q Vector Control in DFIG Back-to-Back PWM Converter », *IEEE CNF Power Engineering*. June 2007. pp.1-7.
- [3] Y. Bekakra, D. B. attous, « Active and Reactive Power Control of a DFIG with MPPT for Variable Speed Wind Energy Conversion using Sliding Mode Control », *World Academy of Science, Engineering and Technology* 60 2011.
- [4] T. Ghennam, B. Francois, E.M. Berkouk, “Local supervisory algorithm for reactive power dispatching of a wind farm”, *13th European conference on power electronics and applications (EPE 2009)*, Barcelona, Spain, 5-8 September 2009.
- [5] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service”, thèse de doctorat, Nancy-I, 2010.
- [6] X. Guillaud, P. Barre, J.P. Hautier, “Synthesis of control law with the method of Causal Ordering Graph”. *International Conference on Electrical Machine (ICEM 2000)*, vol. 4, pp 1917-1921, 2000.
- [7] A. M. Eltamaly, A. I. Alolah, M. H. Abdel-Rahman, « Modified DFIG control strategy for wind energy applications », *SPEEDAM 2010, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2010 IEEE, pp. 659-653, 2010.
- [8] M. Machmoum, F. Poitiers, « Sliding mode control of a variable speed wind energy conversion system with DFIG », *International Conference and Exhibition on Ecologic Vehicles and Renewable Energies, MONACO*, March 26-29 (2009).
- [9] Choon Yik Tang, Yi Guo, John N. Jiang, « Nonlinear Dual-Mode Control of Variable-Speed Wind Turbines with Doubly Fed Induction generators », *IEEE, Transactions on Control Systems Technology*, July 2011, 19 (4), pp. 744-756

- [10] M.E.H. Benbouzid al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems," in Proceedings of the ICEM'06, Chania (Greece), September 2006.
- [10] F. Poitiers, Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [12] A. Boyette, Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 2006.
- [13] L. Moreau, Modélisation, conception et commande de génératrices à reluctance variable basse vitesse, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2005.
- [14] T. Ackermann et al., "An overview of wind energy – Status 2002," Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 6, pp. 67-128, 2002.
- [15] www.homerenergy.com.

Chapitre 3

DPC de la machine asynchrone à double alimentation

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter une nouvelle stratégie de contrôle de la MADA en utilisant le contrôle direct des puissances active et réactive (DPC) de la machine asynchrone à double alimentation. Elle est défini comme la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation de l'onduleur sont choisis directement par un tableau de commutation. Dans les paragraphes suivants on résume le principe de fonctionnement de ce type de contrôle (Commande directe des puissances actives et réactives).

La première application développée était le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle était connue sous le nom de Contrôle Direct de Couple (DTC). Dans ce cas, on contrôle le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sans aucun bloc de modulation.

Ensuite, une technique similaire appelée Contrôle Direct de Puissance (en anglais Direct Power Control, DPC) était proposée et développée pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau. Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées.

3.2 Commande directe des puissances actives et réactives de la MADA

Le développement de cette nouvelle technique de commande est basé exactement sur les mêmes relations vectorielles qui gouvernent la commande directe de couple et de flux [7]. Le contrôle direct des puissances (DPC) est défini comme la structure de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, en remplaçant les variables de courant utilisées dans les systèmes imbriqués. Dans cette définition, on distingue deux types de correcteurs DPC principaux, le DPC classique et le DPC avec modulation vectorielle. Une autre définition plus restrictive analyse le DPC comme le contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle et qui n'a pas besoin d'utiliser des blocs de modulation car les états de commutation sont choisis directement par un tableau de commutation. Ainsi, il existe deux différents types de structures de Contrôle Direct de Puissance proposées dans la littérature. Cette définition n'inclut que le DPC classique [4]. Dans ce chapitre on s'intéresse au DPC classique, on résume le principe de fonctionnement de ce type de contrôle, en analysant leur structure et en présentant leurs points forts et faibles en basant sur les résultats de simulation obtenus.

3.2.1 Principe du contrôle direct des puissances (DPC)

Afin de bien comprendre le principe de fonctionnement, L'idée principale du DPC classique est illustrée par la Figure 3.15. La commande s'intéresse uniquement à l'échange des puissances active et réactive entre la machine et sa source d'alimentation, dans les puissances active et réactive instantanées sont calculés à partir des courants et de la tension et comparés à leurs valeurs de référence; leurs erreurs sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis

qui déterminent, avec l'aide d'un tableau de commutations et la valeur du secteur où se trouve la tension du réseau les instants de commande des interrupteurs.

Le contrôle direct de puissance (DPC) est basé sur le concept du contrôle direct du couple et de flux (DTC). Lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature. Ainsi, pour analyser la variation de puissance, il faut analyser la variation de courant. Donc il suffit essentiellement d'échanger le terme couple par puissance active dans la commande directe de couple et de flux afin d'obtenir un entraînement à commande directe des puissances active et de flux. Malheureusement, une grande difficulté persiste dans le calcul de l'angle du flux rotorique. À cet égard, la commande directe des puissances active et réactive offre un moyen robuste de connaître le secteur actuel du flux rotorique.

Le traitement de la puissance réactive est identique en tout point à celui du flux dans la commande directe de couple et de flux. L'élection du mode de commutation du convertisseur est réalisée de façon à ce que l'erreur entre la valeur de référence de la puissance active instantanée, p_{ref} , et la valeur mesurée, p , rentre dans la bande d'hystérésis $2 \times Dp$. De la même façon, l'erreur de la puissance réactive doit rester dans la bande d'hystérésis $2 \times Dq$.

les erreurs des puissances active et réactive instantanées sont introduites dans deux comparateurs à hystérésis de deux niveaux, dont les sorties (dp et dq) sont mises à 1 lorsqu'il faut augmenter la variable de contrôle (p ou q) et à 0 lorsque la variable de contrôle doit rester inchangée ou doit diminuer [4].

Suite à ces conclusions, le Tableau 3.4 peut être repris en termes de puissance active et réactive afin d'obtenir le Tableau 3.5 ci-dessous.

Un apport en flux rotorique contribue au redressement du facteur de puissance au stator, c'est-à-dire à une diminution de la puissance réactive consommée (positive) par la machine. Cette relation est toujours vraie, quelque soit le mode d'opération de la machine [7].

Alors on peut agir selon le tab.3.1.

	Augmentation	Diminution
Puissance réactive	V_{i-1}, V_i et V_{i+1}	V_{i-2}, V_{i+2} et V_{i+3}
Puissance active	V_{i+1} et V_{i+2}	V_{i-1} et V_{i-2}

Table. 3.1

Il en découle que le Tableau 3.2 des vecteurs optimaux est dérivé de la même manière en donnant priorité au contrôle de la puissance active sur la puissance réactive.

	nombre du secteurs
--	--------------------

L'évolution de flux		1	2	3	4	5	6
Q	P	Vecteurs tension					
Q ⁺⁺	P ⁺⁺	V ₂	3V	4V	5V	6V	1V
	p ⁼	7v	0v	7v	0v	7v	0v
	p ⁻⁻	6V	1V	2V	3V	4V	5V
Q ⁻⁻	P ⁺⁺	3V	4V	5V	6V	1V	2V
	p ⁼	0v	7v	0v	7v	0v	7v
	p ⁻⁻	5V	6V	1V	2V	3V	4V

Table. 3.2

$$\begin{aligned} Q^{++} &\Rightarrow Q_{ref} \geq Q + \Delta Q \\ Q^{--} &\Rightarrow Q_{ref} \leq Q - \Delta Q \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} P^{++} &\Rightarrow P_{ref} \geq P + \Delta P \\ P^{--} &\Rightarrow P_{ref} \leq P - \Delta P \\ P^= &\Rightarrow P_{ref} \geq P - \Delta P \text{ et } P^= \Rightarrow P_{ref} \leq P + \Delta P \end{aligned} \quad (3.2)$$

Une réalité fondamentale sur laquelle s'appuie la commande des puissances active et réactive est que le déplacement du flux rotorique dans la machine suit une progression continue dans le temps et qu'il semblera traverser chaque secteur un à un s'il est échantillonné suffisamment. L'étude du Tableau (3.2) nous indique que si le flux rotorique était par exemple dans le secteur 2 et que le vecteur 3 venait tout juste d'être appliqué, la variation de puissance réactive mesurée au stator doit inévitablement être négative puisque le vecteur 3 augmente l'apport en puissance réactive au rotor. S'il n'en avait pas été ainsi, nous serions contraints d'admettre que notre estimation du secteur n'est plus juste et que le flux serait plutôt dans le secteur 1 ou 5. Compte tenu qu'il était précédemment dans le secteur 2, il serait peu probable qu'il soit maintenant dans le secteur 5, puisqu'il aurait «sauté» par-dessus deux autres secteurs. Le synopsis précédent peut être représenté à l'aide des tableaux de références (Tableau 3.3 et Tableau 3.4) basés sur le Tableau 3.2. La première table de référence vérifie la condition de variation de la puissance réactive. C'est-à-dire qu'elle vérifie si la variation de puissance réactive mesurée au stator correspond bien à celle anticipée pour le secteur et le vecteur courant [7].

Secteur	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇
1	0	-	-	+	+	+	-	0
2	0	-	-	-	+	+	+	0

3	0	+	-	-	-	+	+	0
4	0	+	+	-	-	-	+	0
5	0	+	+	+	-	-	-	0
6	0	-	+	+	+	-	-	0

Tab 3.3 : Suivi de la variation de la puissance réactive [7]

En réponse à la table de vérification de variation de la puissance réactive, dans le cas où il y a incohérence entre la valeur anticipée et celle mesurée, le Tableau (3.4) suggère une modification du secteur en cours. Par exemple, reprenons notre exemple précédent où nous supposons que le flux se situe dans le secteur 2 et où, suite à l'application du vecteur 3, la variation de puissance réactive au stator a été positive, ce qui est en contradiction avec le Tableau 3.3. À cet effet, le Tableau 3.3 suggère de décrémenter (-1) le secteur en cours. Si l'on se réfère à nouveau au Tableau 3.1, pour le secteur 1 et le vecteur 3, la variation anticipée de puissance réactive concorde maintenant avec celle mesurée [7].

Secteur	V ₀	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇
1	0	0	-1	+1	0	+1	+1	0
2	0	+1	0	-1	+1	0	-1	0
3	0	-1	+1	0	-1	+1	0	0
4	0	0	-1	+1	0	-1	+1	0
5	0	+1	0	-1	+1	0	-1	0
6	0	-1	+1	0	-1	+1	0	0

Table 3.4 : La mise à jour des secteurs [7]

Le processus de régulation de la puissance active et réactive ne nécessite que de simples régulateurs à hystérésis et la détection du secteur ne dépend donc d'aucun paramètre interne ou externe à la machine, ni de la connaissance de la position du rotor. Les équations (3.29) et (3.30) sont à elles seules suffisantes pour gouverner la MADA.

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sq} \cdot I_{sq} + V_{sd} \cdot I_{sd}) \quad (3.3)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} \cdot I_{sd} - V_{sd} \cdot I_{sq}) \quad (3.4)$$

3.2.2 Structure générale du contrôle direct des puissances active et réactive de la MADA

La structure détaillée de la commande directe des puissances active et réactive de la MADA est présentée à Figure 3.15. Trois tables de références, deux régulateurs à hystérésis et le calcul des puissances actives et réactives sont nécessaires à son fonctionnement.

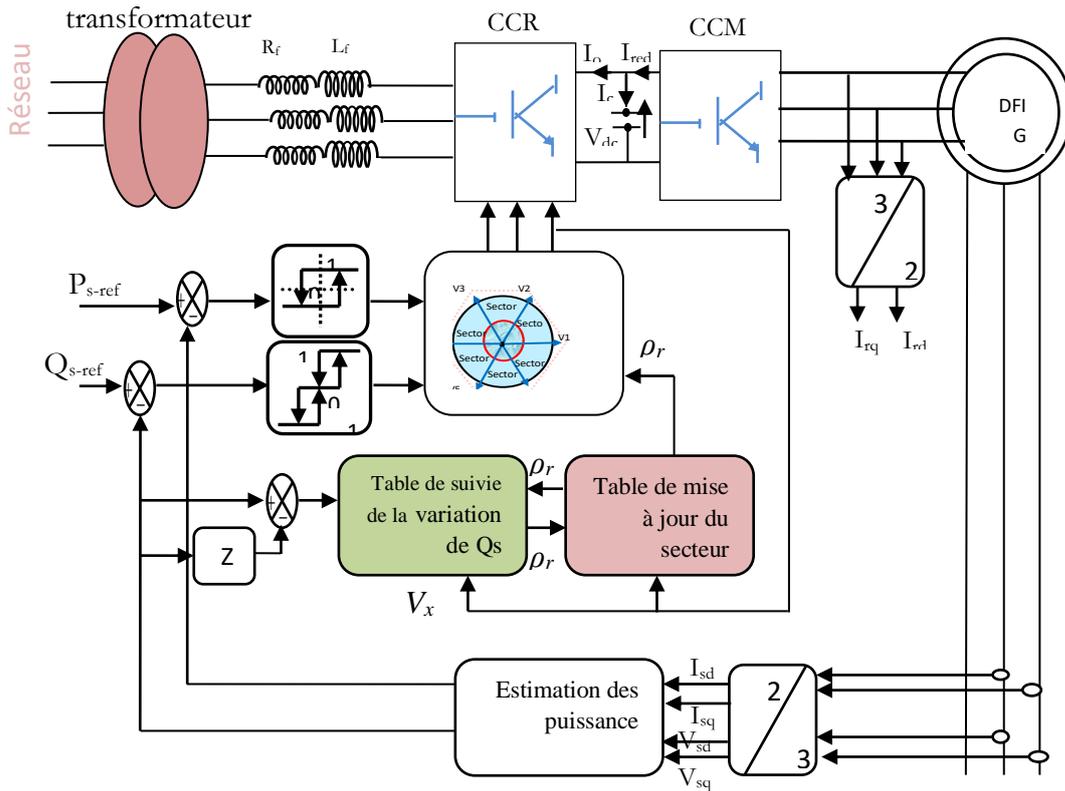
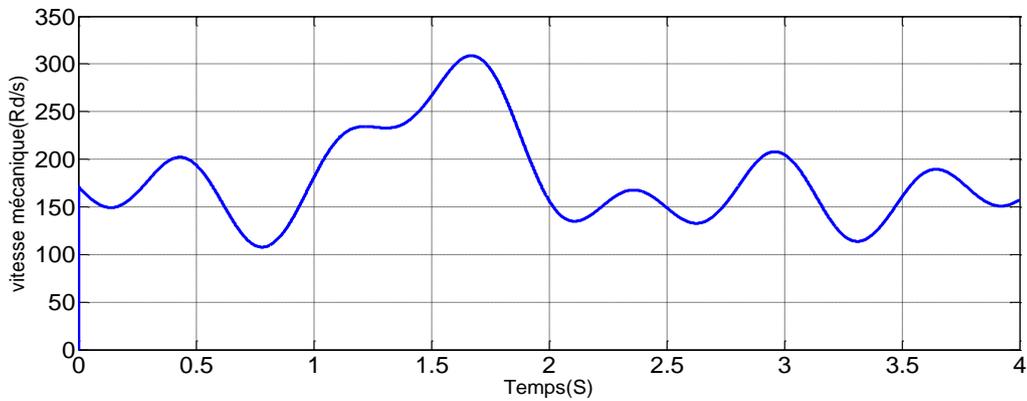


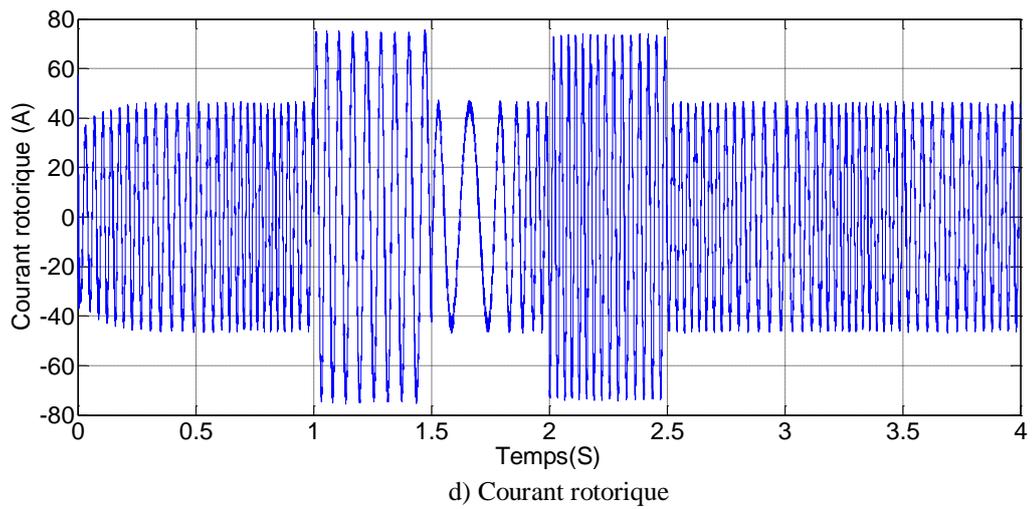
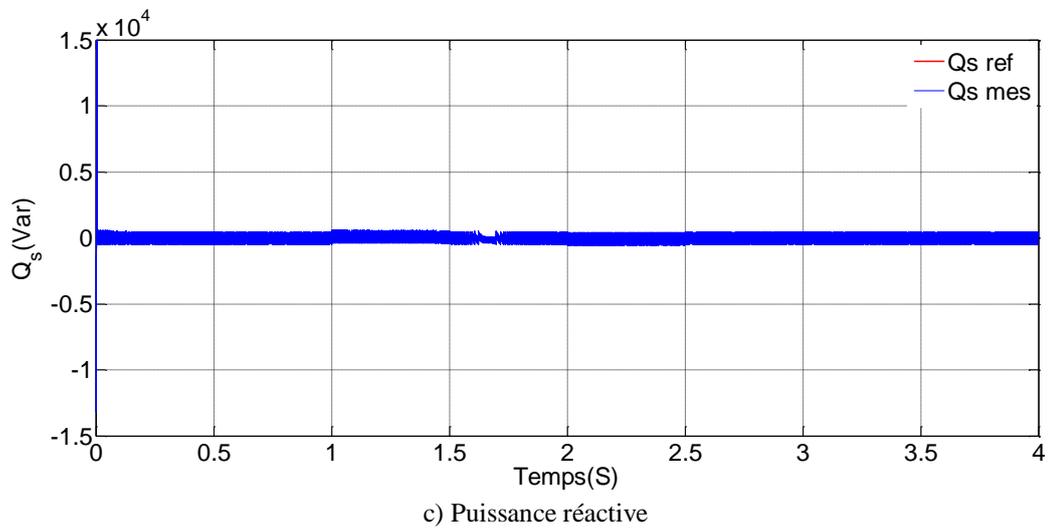
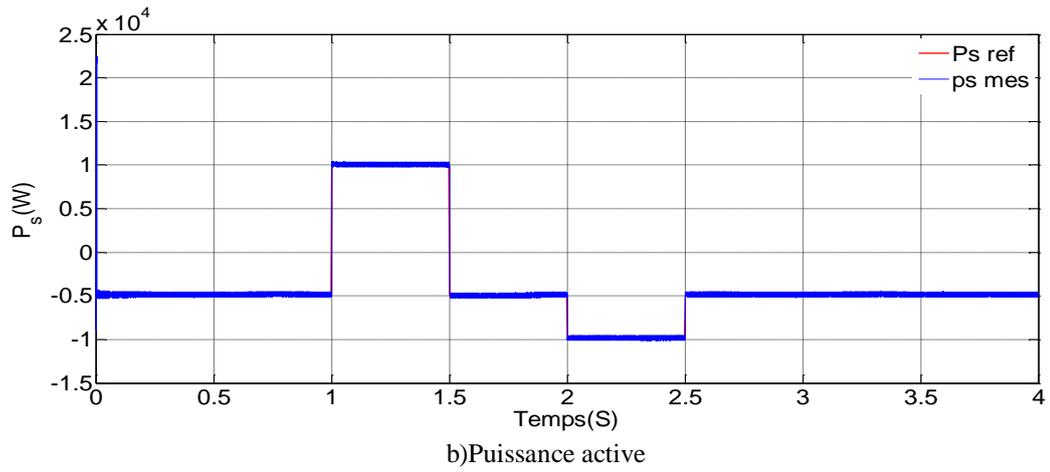
Fig.3.1 Structure de la commande directe des puissances de la MADA

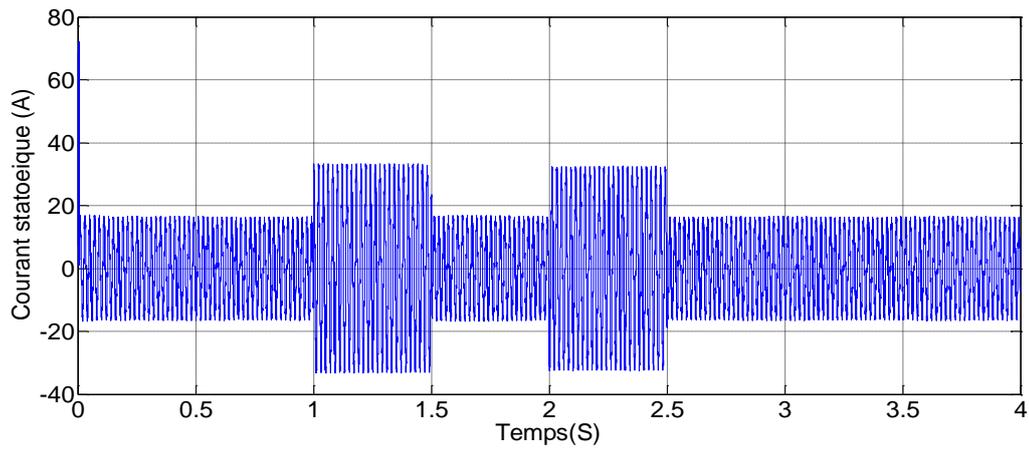
3.2.3 Résultats de la simulation

La figure 3.2 représente les résultats de simulation de la commande directe des puissances active et réactive de la MADA. A $t = 0.5s$, la référence en puissance réactive est ajustée à zéro de sorte que le facteur de puissance au stator est maintenu unitaire. Une consigne de la puissance active est appliqué en référence aussi. D’après les résultats obtenus, on constate que les références sont poursuivies avec une vitesse et une précision si bien qu’il est difficile de distinguer la référence de la réponse, même sur une échelle de temps relativement courte. Nous pouvons observer aussi que les réponses transitoires de la commande directe des puissances sont très similaires à la commande directe du couple et de flux.

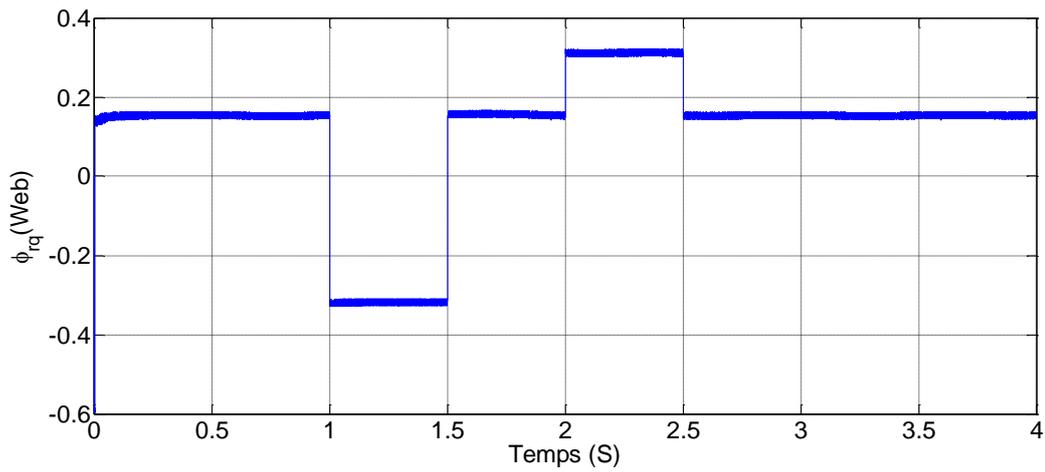
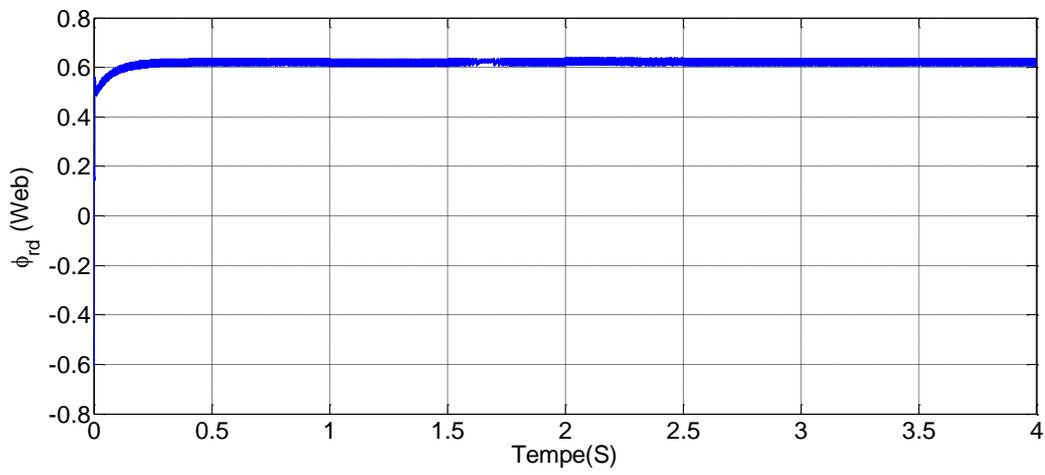


a) Vitesse mécanique

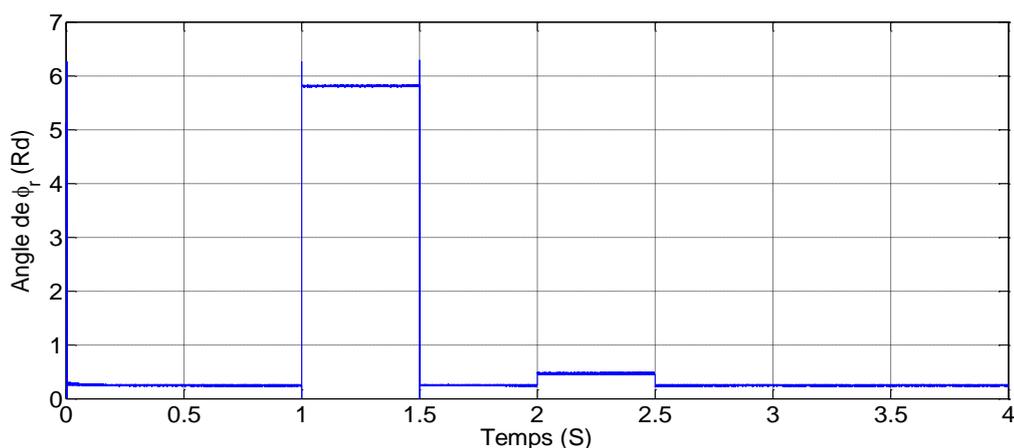




c) Courant statorique



E) Flux rotorique



f) Angle de flux rotorique

Fig.3.2 Résultats de simulation

Conclusion

Dans le but d'améliorer les performances de la commande de la chaîne de conversions éolienne, nous avons introduit le concept de la commande directe des puissances active et réactive. Les performances de la commande directe des puissances a été testée. Les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants.

3.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] X. Luo, "Direct power control of AC motors," Master's thesis, University of Nevada, Reno, 2009.
- [2] G. Escobar, A. M. Stankovic, J.M. Carrasco, E. Galvan, and R. Ortega, "Analysis and design of direct power control (DPC) for a three phase synchronous rectifier via output regulation subspaces," IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 3, pp. 823–830, May 2003.
- [3] A. Lopez de Heredia Bermeo, "Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension", thèse de doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble Cidae (Mondragón, Espagne), 2006.
- [4] L. Shuhui, T.A. Haskew, « Analysis of Decoupled d-q Vector Control in DFIG Back-to-Back PWM Converter », IEEE CNF Power Engineering. June 2007. pp.1-7.
- [5] F. Bonnet, P Vidal and M pietrzak-david, "Dual Direct Torque control Of Doubly fed Induction Machine", IEEE Trans Industrial Electronics, vol,54,No,5,October 2007.
- [6] T. Etienne « Contribution à la commande de l'éolienne à MADA en permettant l'amélioration de la qualité de l'ond du réseau électrique, montreal, 2009

- [9] S. Belkacem, F. Nacéri, R. Abdessemed , “A Novel Robust Adaptive Control Algorithm and Application to DTC-SVM of AC Drives”, Serbian Journal of Electrical Engineering (SJEE), vol. 7, no. 1 , Serbia, pp. 21-40, May 2010.
- [10]S. Belkacem, F. Nacéri, R. Abdessemed, “Robust Nonlinear Control for Direct Torque Control of Induction Motor Drive Using Space Vector Modulation”, Journal of Electrical Engineering, vol. 10, no. 3, pp. 79-87, Sep 2010.
- [11]M. Hajian, J. Soltani, G. Arab Markadeh and S. Hosseinnia, “Adaptive Nonlinear Direct Torque Control of Sensorless IM Drives With Efficiency Optimization”, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 57, no. 3, pp. 975-958, 2010.
- [12]Z. G. H Abootorabi, R. Arab Markadeh, J. Soltani, “ Direct Torque Control of Synchronous Reluctance Motor using Feedback Linearization Including Saturation and Iron Losses”, Epe Journal, vol .19, no. 3, 2009.
- [13]Z. G. H. Abootorabi, R. Arab Markadeh , J. Soltani, “ Direct Torque and Flux Regulation of Synchronous Reluctance Motor Drives Based on Input–Output Feedback Linearization” , Energy Conversion and Management Elsevier, vol. 51, pp. 71–80, 2010.
- [14]M. O. Hamiti, Réduction des Ondulations de Couple d’une Machine Synchrone à Réductance Variable. Approches par la Structure et par la Commande, Thèse de Doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy-I, Juin 2009.

Chapitre 4

Commande de la MADA à Fréquence de Modulation Constante

4.1 Introduction

Les performances de la commande vectorielle appliquée à la Machine asynchrone à double alimentation ne dépendent pas uniquement des paramètres de la machine ; mais dépendent aussi en grande partie des caractéristiques dynamiques et statiques de l'onduleur qui lui est associé. La commande souvent adaptée aux convertisseurs statiques est la stratégie MLI. Plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmoniques possibles. Parmi les variantes de la MLI, la plus en vue ces derniers temps essentiellement dans la conduite des machines à courant alternatif, la technique dite modulation vectorielle ou Space Vector Modulation (SVM). Dans ce chapitre on présente le principe de cette technique.

4.1 Principe de la SVM

Le principe de cette méthode repose sur la détermination des portions de temps (durée de modulation) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension durant la période d'échantillonnage et la détermination des séquences des allumages et des extinctions des composants du convertisseur afin minimiser les harmoniques des tensions appliquées à la machine.

4.3 Modélisation de l'onduleur de tension

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (4.1), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m égales à $v_{dc}/2$ connectés entre eux par un point noté n_0

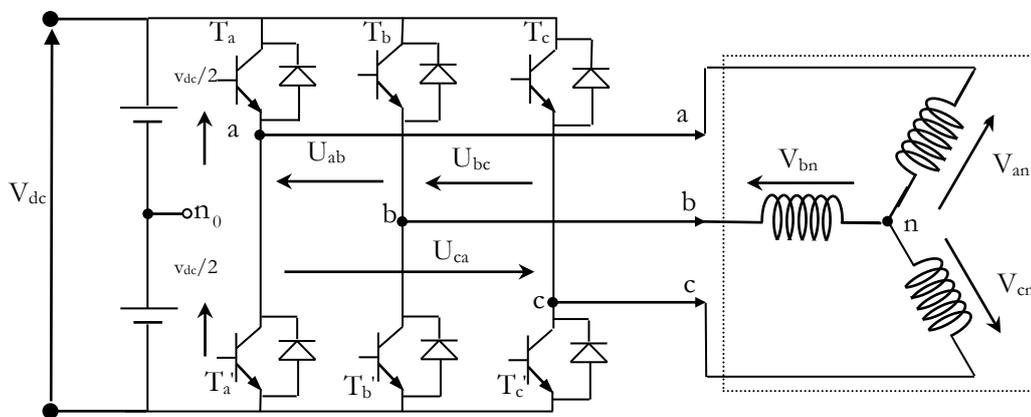


Fig. 4.1 Schéma de l'onduleur de tension à deux niveaux.

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T'_i les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

- si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T'_i est ouvert,
- si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T'_i est passant.

Le schéma de la SVM (Space Vector Modulation) génère une commande dédiée à la commutation. L'onduleur à deux étages possède six transistors, il y a 8 états de commutations possibles. La figure (4.2) fait le lien entre les différentes séquences,

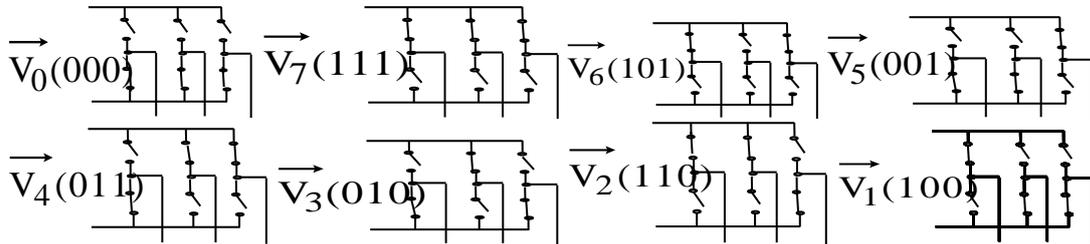


Fig. 4. 2 États des interrupteurs pour chaque vecteur de tension.

Les 6 commutateurs peuvent prendre 23 états différents représentés dans la figure 4.2. Ces 8 états sont codés de S0 à S7. Les vecteurs tensions des états S1 à S6 sont appelés vecteurs actifs tandis que S0 et S7 sont appelés vecteurs nuls, parce qu'ils n'ont aucun angle et phase. Chaque bras de commande a besoin d'être complémentaire. Cela veut dire d'avoir, sur un même bras, lorsque le transistor de l'étage supérieur est fermé, celui du bas doit obligatoirement être ouvert, et vice versa.

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée les tensions phase neutre s'expriment comme suit[8] :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Appliquons la transformation triphasée/biphasée respectant le transfert de puissance :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.3.1. Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Les interrupteurs T_i et T'_i sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur. Le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que ΔI soit égal à h [6]. Le comparateur bascule ou l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que $\Delta I < h$ illustrée par la figure (4.3), Les conditions de commutation sont définies en terme des états logiques Si correspondants de la façon suivante[9] :

$$\begin{aligned}
 S_i &= -1 & \text{si } i_i &\geq i_{ref} + \Delta i \\
 S_i &= 1 & \text{si } i_i &\leq i_{ref} - \Delta i \\
 S_i &= S_{i-1} & \text{si } i_i &= i_{ref}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Tel que :

i_i ($i=1,2,3$) : représentent les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c).

$i_{ref}(i=1,2,3)$: représentent les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur[6].

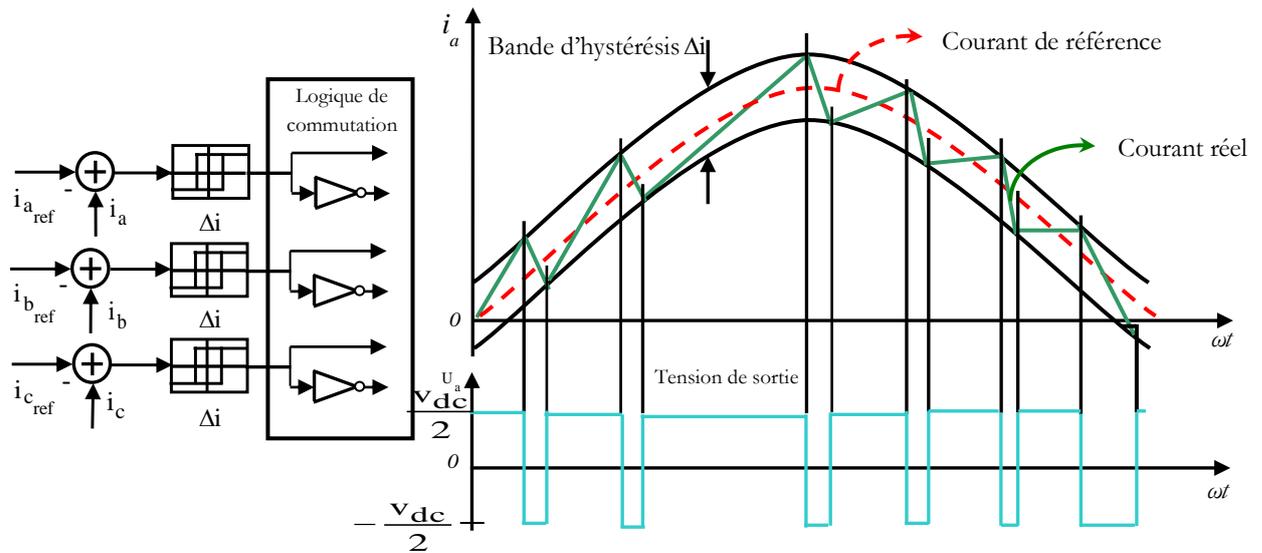


Fig. 4.3 Illustration de la bande de courant à hystérésis.

4.3.2. Contrôle des tensions par MLI

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), qui consiste à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante [8], figure (4.4).

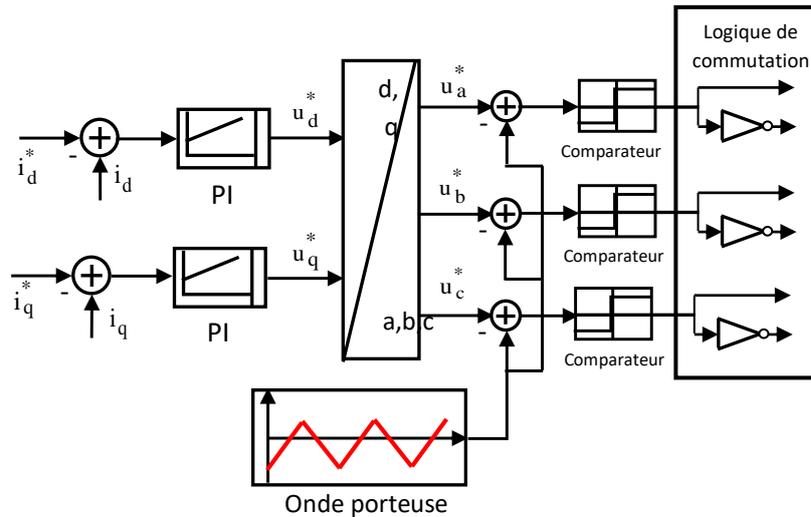


Fig. 4.4 Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale.

4.3.3 La modulation MLI vectorielle

Dans cette modulation, on représente par un seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteur complémentaires. Cette MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés pour chaque bras de l'onduleur mais sur la détermination d'un vecteur de contrôle global approximé sur une période de modulation T . [5] Les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan (α, β) par la figure (4.5).

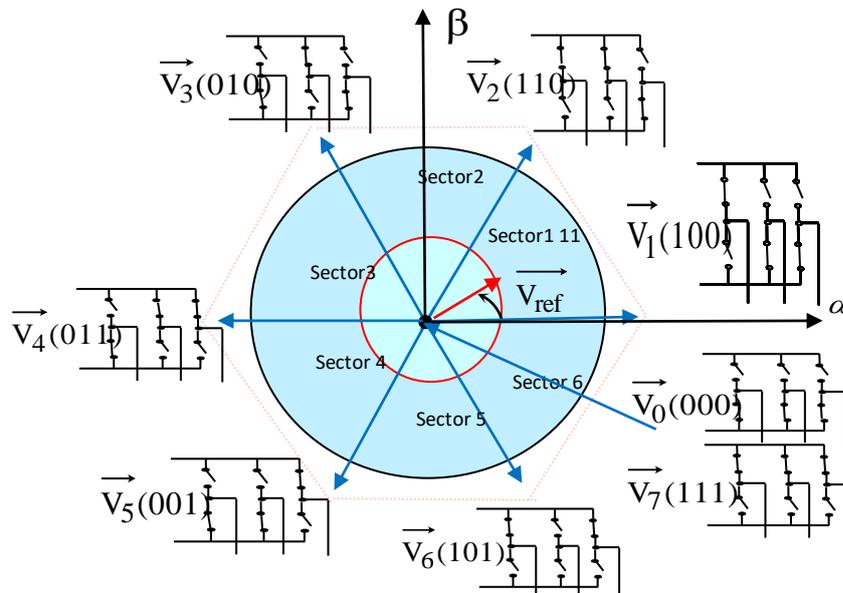


Fig. 4.5 Représentation des vecteurs de tension dans le repère (α, β) .

La figure (4.6) représente le cas où le vecteur référence se trouve dans le secteur 1 et les vecteurs adjacents sont représentés par V_1 et V_2 . La MLI vectorielle consiste à projeter le

vecteur de tension statorique de référence $V_{s \text{ ref}}$ désiré sur les deux vecteurs de tension adjacents correspondant V_1 et V_2 . Si nous notons par T_1 et T_2 les deux temps d'application de ces vecteurs, T_0 temps d'application des vecteurs nuls, leur somme doit être inférieure à la période T_s de commutation de l'onduleur.

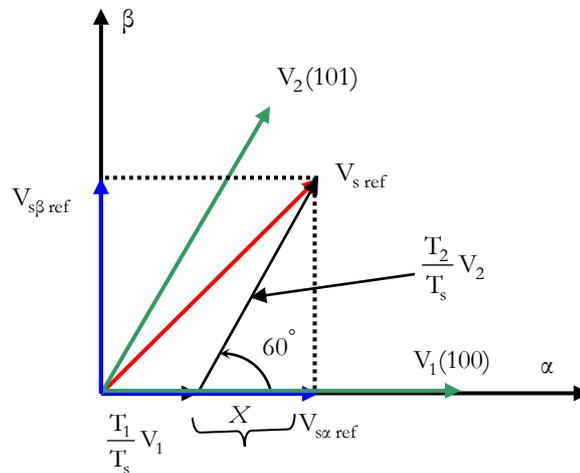


Fig. 4.6 Décomposition d'un vecteur tension de référence $V_{s \text{ ref}}$

Dans le cas du secteur 1 figure (4.6), le vecteur de tension de référence $V_{s \text{ ref}}$ moyenne est donné comme suit [9] :

$$\begin{aligned} V_{s \text{ ref}} T_s &= T_1 V_1 + T_2 V_2 \\ T_s &= T_1 + T_2 + T_0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Où

T_s : représente la période de commutation,

T_1 : le temps d'application du vecteur V_1 ,

T_2 : le temps d'application du vecteur V_2 ,

T_0 : la durée d'application de la séquence de roue-libre.

En supposant qu'initialement, le vecteur $V_{s \text{ ref}}$ coïncide avec le vecteur V_1 , deux séquences sont actives. La séquence qui correspond au vecteur V_1 est appliquée durant la durée T_1 et la séquence de roue-libre est appliquée durant la durée T_0 . La séquence qui correspond au vecteur V_2 est inactive car la durée T_2 est nulle [13]. Au fur et à mesure que le vecteur $V_{s \text{ ref}}$ s'éloigne du vecteur V_1 et on s'approche du vecteur V_2 , T_1 diminue et T_2 augmente. Quand le vecteur $V_{s \text{ ref}}$ atteint le vecteur V_2 , T_1 sera nul et T_2 sera maximale.

4. 4 Les étapes de la réalisation d'un bloc SVM

4. 4.1 Détermination des tensions de références V_α, V_β

A partir de la relation (4.1) nous pouvons définir les tensions aux bornes des enroulements du moteur. Pour obtenir ces tensions dans le repère (α, β) nous utiliserons l'équation (4.2), ce qui, pour les huit vecteurs de commutation de l'onduleur, fournira le résultat tableau (4.1).

S_a	S_b	S_c	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}	V_{sz}	$V_{s\beta}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	0
1	1	0	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{\sqrt{3}}$
0	1	0	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{\sqrt{3}}$
0	1	1	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	0
0	0	1	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{\sqrt{3}}$
1	0	1	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$-\frac{v_{dc}}{\sqrt{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0

Table 4.1 Tensions

4. 4.2 Détermination des secteurs

Généralement, le secteur est déterminé par l'angle γ où $\gamma = V_{\beta}/V_{\alpha}$. Dans cet étude le secteur est déterminé par une méthode simple basée sur les tensions V_{α} , V_{β} . La détermination est faite comme dans l'organigramme suivant.

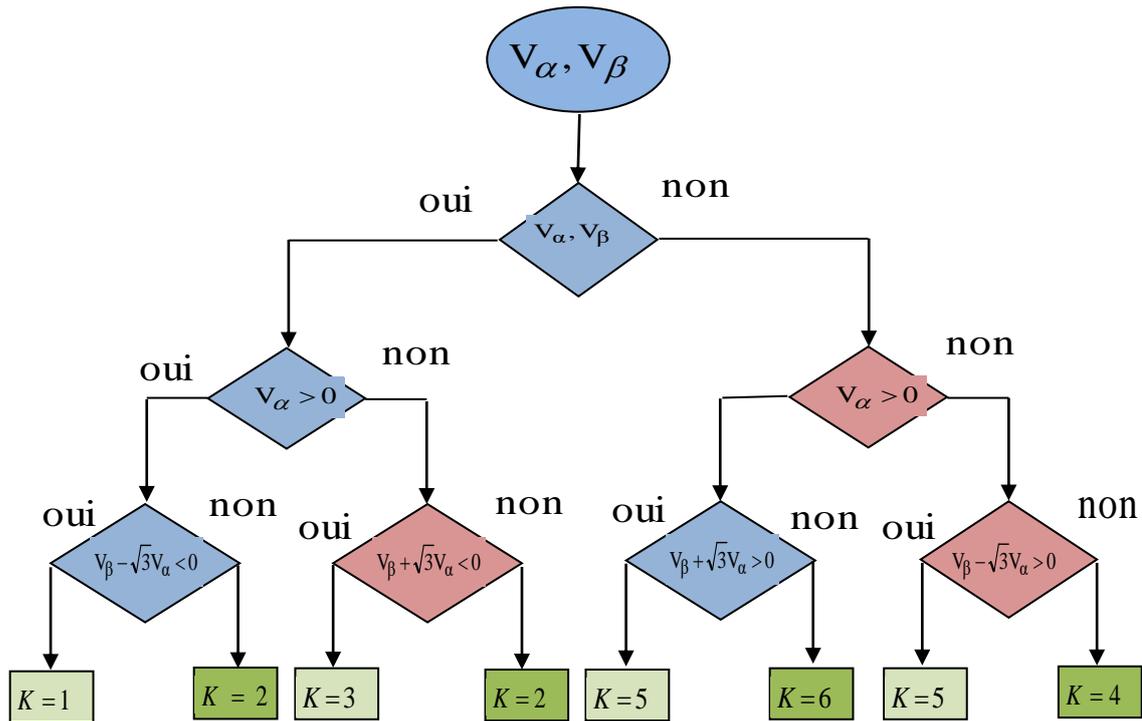


Fig. 4.7 détermination du secteur.

4. 4.3 Calcul des variables X, Y et Z

Les tris variables X, Y et Z sont reliées avec les deux tensions V_α, V_β comme indiqué par l'équation (4.5)

$$\begin{cases} X = \sqrt{3} * \frac{T}{V_{DC}} * V_\beta \\ Y = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{T}{V_{DC}} * V_\beta + \frac{3}{2} * \frac{T}{V_{DC}} * V_\alpha \\ Y = \frac{\sqrt{3}}{2} * \frac{T}{V_{DC}} * V_\beta - \frac{3}{2} * \frac{T}{V_{DC}} * V_\alpha \end{cases} \quad (4.5)$$

Pour des fréquences de commutation élevées, le vecteur de tension de référence peut être considéré comme constante au cours de chaque période de commutation. La durée de vecteurs actifs V_1 et V_2 qui sont adjacentes à V_{ref} sont calculées par la résolution de l'équation suivante:

$$\begin{cases} V_{ref} \cdot \frac{T}{2} = V_1 \cdot T_1 + V_2 \cdot T_m \\ T_0 = \frac{T}{2} - T_1 - T_m \end{cases} \quad (4.6)$$

Avec T_1, T_m, T_0 représentent les temps d'application des vecteurs V_1, V_2, V_0 . T_0 est la durée d'une période d'échantillonnage des vecteurs nuls doivent être remplis, à titre de chaque période de commutation (la moitié de la période d'échantillonnage) qui debute et se termine

avec un vecteurs nul. Il y aura deux vecteurs nuls chaque $T/2$ ou quatre vecteurs nuls par T , la durée de chaque vecteur nul est à $To/4$ [1].

Les valeurs des temps T_1 et T_m pour chaque secteur sont calculés à partir des valeurs de X, Y et Z, dans le tableau (2) ci-dessous:

K	1	2	3	4	5	6
T_1	Z	Y	-Z	-X	X	Y
T_m	Y	-X	X	Z	-Y	-Z

Table 4.2 : Determination of X,Y,Z

Le schéma bloc utilisé pour le calcul des temps pour chaque secteur est donné par la figure suivante.

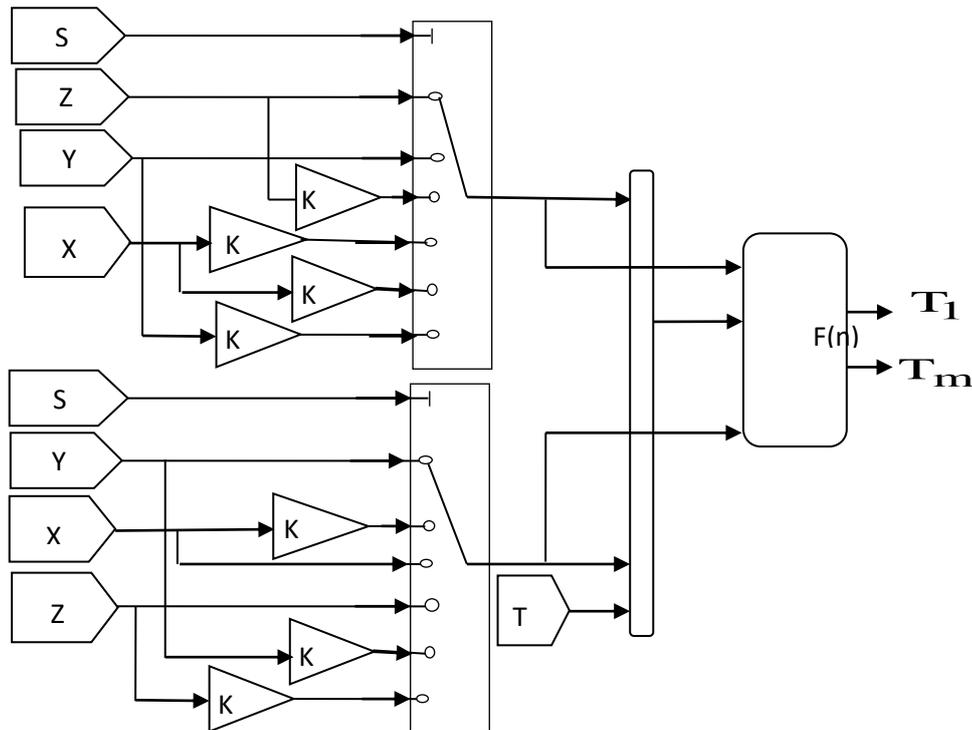


Fig.4.8 Calcul des temps T_1, T_m

4. 4.5 Génération des signaux modulateurs T_{aon} T_{bon} et T_{con}

Les signaux de modulation sont déterminés par les équations suivantes (4.7) et la figure (4.9) montre le modèle Simulink:

$$\begin{cases} T_{aon} = (T - T_1 - T_m) / 4 \\ T_{bon} = (T_{aon} + T) / 2 \\ T_{con} = (T_{bon} + T) / 2 \end{cases} \quad (4.7)$$

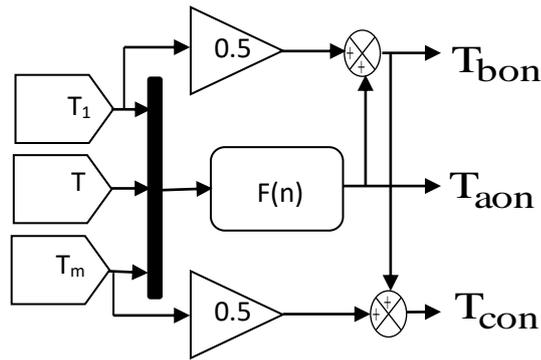


Fig.4.9. Modèle de calcul des temps t_{aon} , t_{baon} , t_{con}

Les temps de commutation t_{am} , t_{bm} , T_{cm} peuvent être déterminés par rapport à chaque secteur et aux temps t_{aon} , t_{bon} , t_{con} , comme le montre dans le tableau (3)

K	1	2	3	4	5	6
t_{am}	t_{bon}	t_{aon}	t_{aon}	t_{con}	t_{con}	t_{bon}
t_{bm}	t_{aon}	t_{con}	t_{bon}	t_{bon}	t_{aon}	t_{con}
t_{cm}	t_{con}	t_{bon}	t_{con}	t_{aon}	t_{bon}	t_{aon}

Table 4.3: Determination of t_{am}, t_{bm}, t_{cm}

4.6 Commande de la MADA à fréquence de modulation constante

La structure générale de la commande de la MADA à fréquence de modulation constante est donnée par la figure suivante.

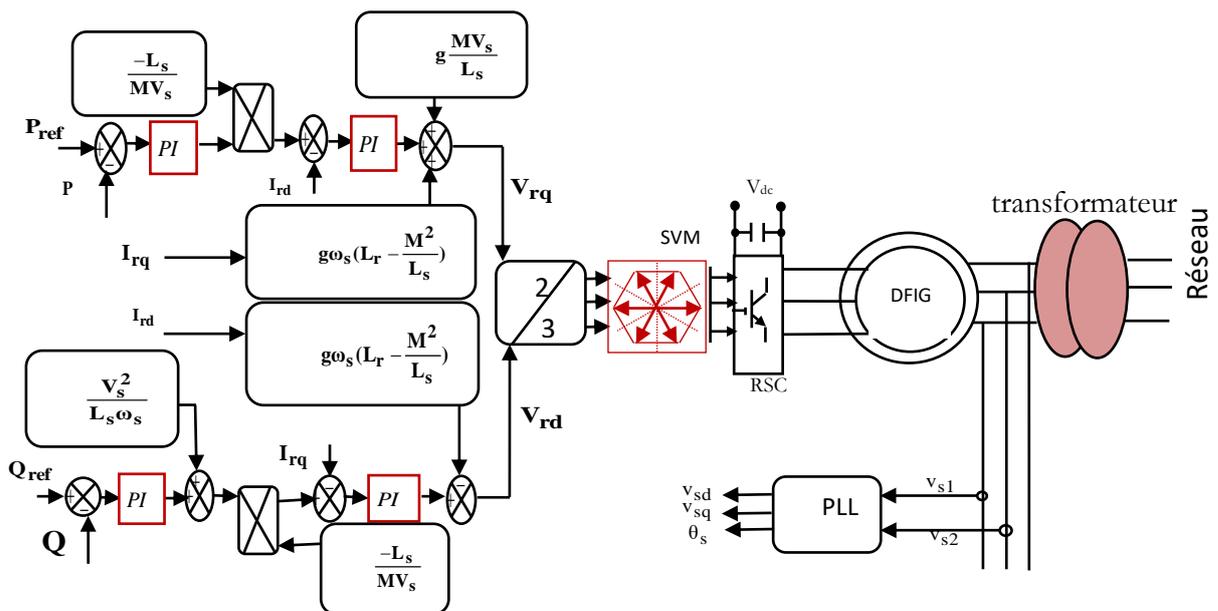
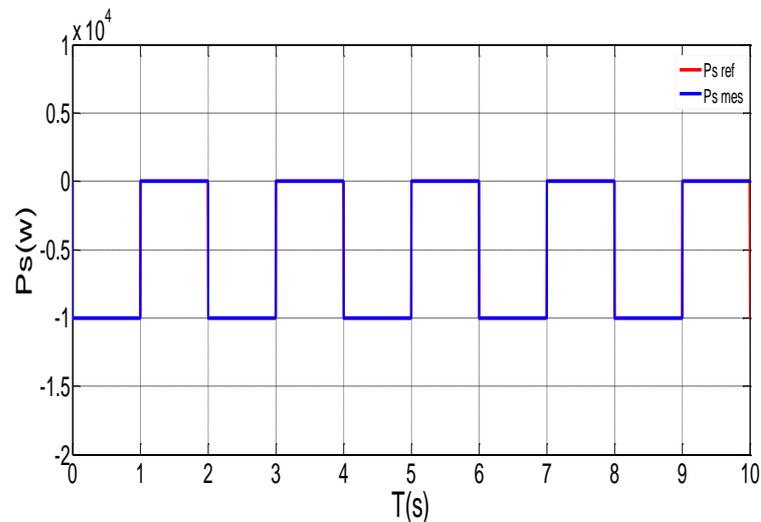


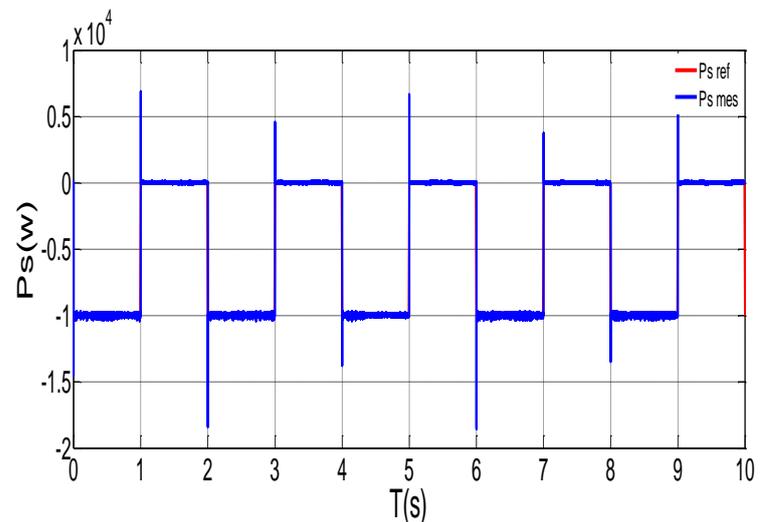
Fig. 4.10 Commande de la MADA à fréquence de modulation constante

4.7 Résultats de simulation

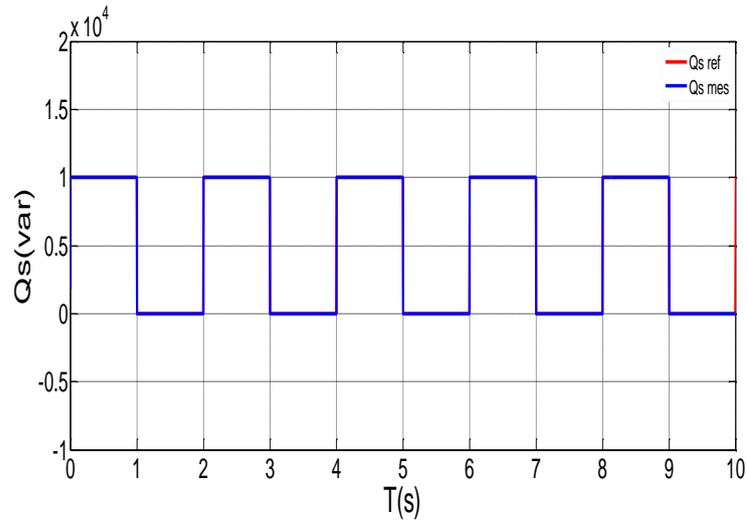
L'analyse par simulation effectuée traite du système éolien permettant le contrôle des puissances active et réactive à travers la commande découplée alimenté à Fréquence de Modulation Constante SVM. La comparaison entre les deux modes d'alimentation de système de conversion d'énergie éolienne (SVM et PWM) a approuvé l'efficacité de la commande proposée. Les figures 4.11 montrent que les puissances active et réactive délivrées par la MADA suivent bien les références correspondantes sans dépassement avec une diminution remarquable des harmoniques. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la MADA.



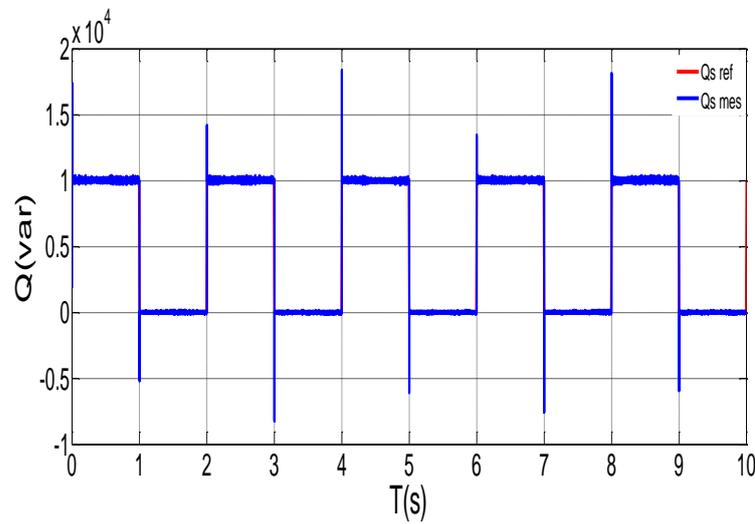
a) Puissance active avec SVM



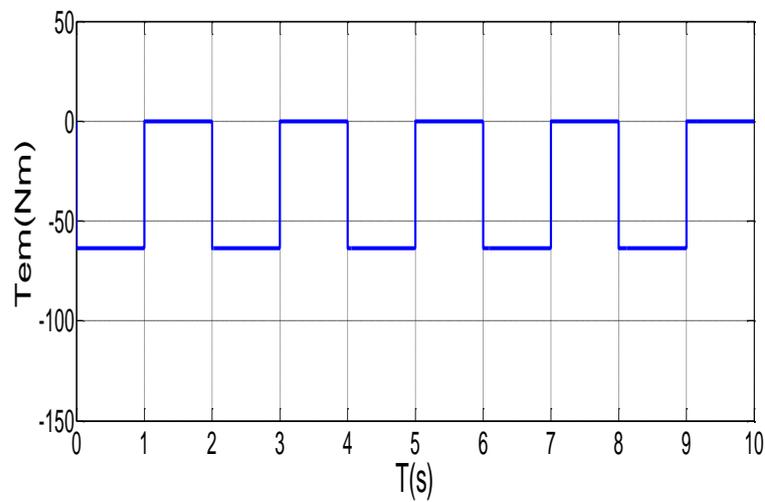
b) Puissance active avec PWM



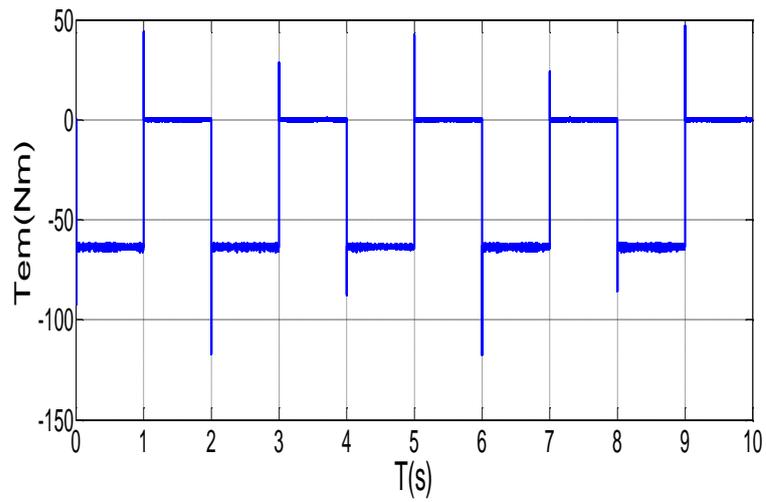
c) Puissance réactive avec SVM



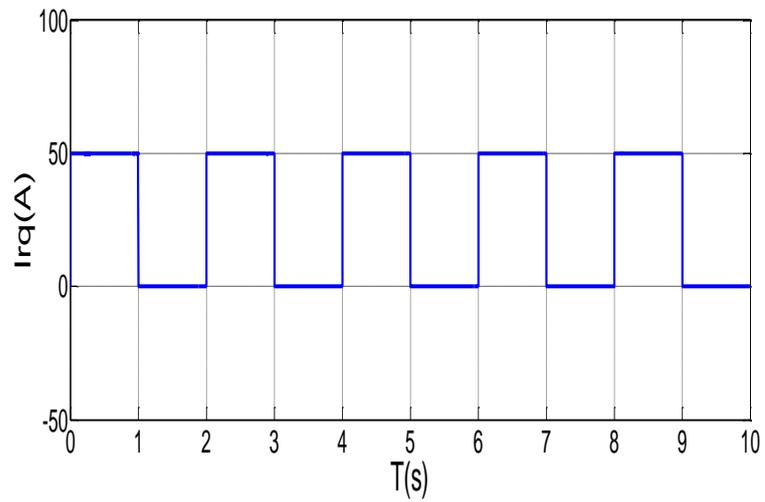
d) Puissance réactive avec PWM



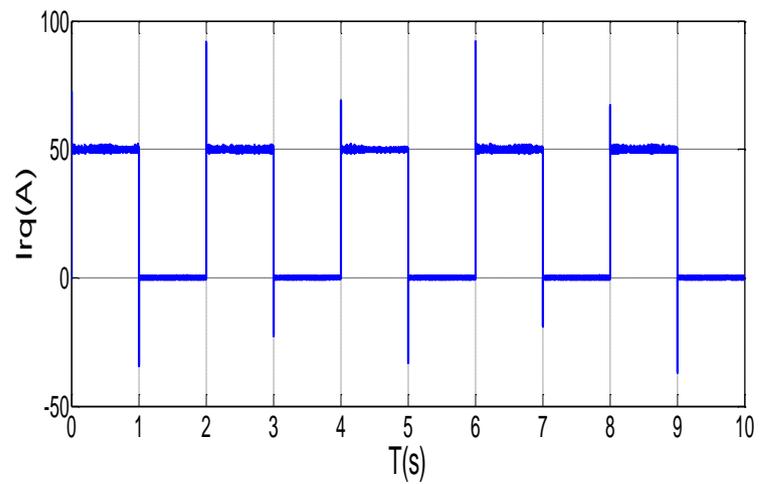
e) Couple électromagnétique avec SVM



f) Couple électromagnétique avec PWM



j) Courant rotorique I_{rq} avec SVM



h) Courant rotorique I_{rq} avec PWM

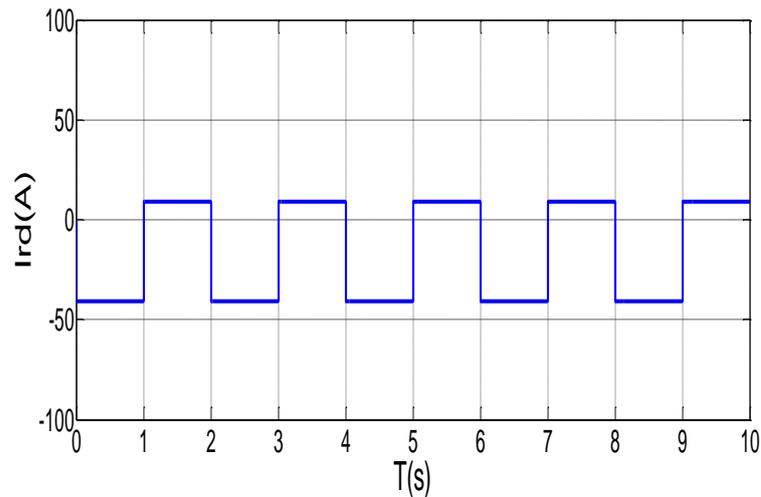
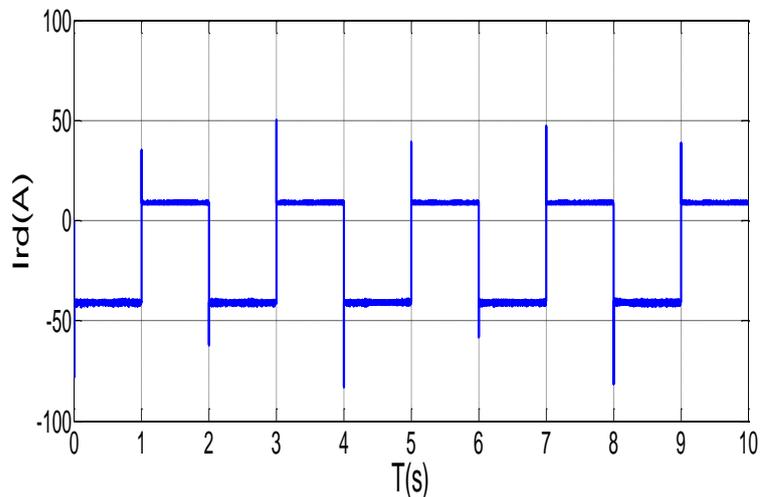
i) Courant rotorique I_{rd} avec SVMj) Courant rotorique I_{rd} avec PWM

fig.4.11 Résultats de simulation

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé la technique MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion) de type SVM (Space Vector Modulation) à l'aide de l'environnement « Simulink » du logiciel Matlab. Et ce, dans le cadre du contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à la conversion d'énergie éolienne.

D'après les résultats obtenus par la simulation, on voit clairement que l'utilisation de SVM arrive à maintenir les puissances active et réactive à leurs valeurs désirées avec un régime transitoire minimum, et une réduction importante d'oscillations des puissances et du couple effectuées par l'onduleur et présente aussi une réponse rapide au changement des consignes.

D'une façon générale, on peut dire que l'efficacité de ce mode de contrôle apparaît d'une manière remarquable, si on la compare aux résultats obtenus avec celle de la PWM.

4.9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **F. Boumaraf**, L.Khettache, «SVM Control of a Doubly Fed Induction Generator in WECS », International Conference on Electromechanical engineering, ICEE'2012, Skikda 20-21 November 2012.
- [2] **F. Boumaraf**, L.Khettache, A. Benakcha, R Abdessemed, « RST Control of Doubly Fed Induction Generator with Variable Speed WECS», The 2nd International Conference on Electronics and Oil, ICEO'13, 05-06 March 2013, Ourgla, Algeria.
- [3] W. Yu, J. Lai and S.Y. Park , «An Improved Zero-Voltage Switching Inverter Using Two Coupled Magnetic in One Resonant Pole» IEEE Trans. on Power Electron., Vol.25, No.4, pp. 952-961, April. 2010.
- [4] J. Hua, Y. Hea and L Xub, « Improved rotor current control of wind turbine driven doubly-fed induction generators during network voltage unbalance »,Electric Power Systems Research 80 (2010) 847–856
- [5]A. K. Mishra, L. Ramesh, S.P. Chowdhury,S.Chowdhury, « Review of Wind Turbine System and its Impact for Grid Stability», Journal of Electrical Engineering. Vol.11, Issue 1. 2011. pp. 153–165.
- [6]L. Shuhui, T.A. Haskew, « Analysis of Decoupled d-q Vector Control in DFIG Back-to-Back PWM Converter», IEEE CNF Power Engineering. June 2007. pp.1-7.
- [7] Y. Bekakra, D. B. attous, «Active and Reactive Power Control of a DFIG with MPPT for Variable Speed Wind Energy Conversion using Sliding Mode Control», World Academy of Science, Engineering and Technology 60 2011.
- [8]S. Belkacem, F. Nacéri and R. Abdessemed, “Improvement in DTC-SVM of AC Drives Using a New Robust Adaptive Control Algorithm” Accepted for Publication at the International Journal of Control Automation and System, IJCAS, Appear in, vol. 9, no. 2, 2011.
- [9]S. Belkacem, F. Nacéri, R. Abdessemed , “A Novel Robust Adaptive Control Algorithm and Application to DTC-SVM of AC Drives”, Serbian Journal of Electrical Engineering (SJEE), vol. 7, no. 1 , Serbia, pp. 21-40, May 2010.
- [10] H.Karimi-Davijani, A.Sheikholeslami, R. Ahmadi, and H. Livani, Active and reactive power control of DFIG using SVPWM converter», in Proc.of IEEE UPEC, pp.1-5, 2008.
- [11] Badrul H. Chowdhury ,and Srinivas Chellapilla, «Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation», Electric Power Systems Research, Volume 76, Issues 9-10, June 2006, pp.786-800.
- [12] J.W Jung, A. Keyhani, «Space Vector PWM Inverter», Departement of Electrical and Computer the Ohio State University, 2005.
- [13] R. Penaa, R. Cardenasb, E. Escobarb, J. Clarec, P. Wheelerc, « Control strategy for a doubly-fed induction generator feeding an unbalanced grid or stand-alone load, Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 355- 364, 2009.
- [14]A. M. Eltamaly, A. I. Alolah, M. H. Abdel-Rahman, « Modified DFIG control strategy for wind energy applications», SPEEDAM 2010, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2010 IEEE, pp. 659-653, 2010.

- [15] M. Machmoum, F. Poitiers, «Sliding mode control of a variable speed wind energy conversion system with DFIG», International Conference and Exhibition on Ecologic Vehicles and Renewable Energies, MONACO, March 26-29 (2009).
- [16] Choon Yik Tang, Yi Guo, John N. Jiang, «Nonlinear Dual-Mode Control of Variable-Speed Wind Turbines with Doubly Fed Induction generators», IEEE, Transactions on Control Systems Technology, July 2011, 19 (4), pp. 744-756
- [17] Yao Xing-jia, Liu Zhong-liang, Cui Guo-sheng, «Decoupling control of Doubly-Fed Induction Generator based on Fuzzy-PI Controller», IEEE Trans. Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2010), pp 226-230, 2010.
- [18] Md. Rabiul Islam¹, Youguang Guo, Jian Guo Zhu, «Steady State Characteristic Simulation of DFIG for Wind Power System», IEEE Trans. Electrical and Computer Engineering (ICECE), pp.151-154, 2011.
- [19] T. Luu, A. Nasiri, «Power Smoothing of Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbine Using Ultra capacitors», IEEE Trans. IECON 2010 - 36th Annual Conference., pp. 3293-3298, 2010.
- [20] C.O. Omeje, D.B. Nnadi, and C.I. Odeh, «Comparative Analysis of Space Vector Pulse-Width Modulation and Third Harmonic Injected Modulation on Industrial Drives», The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 13. Number 1. May 2012 (Spring).
- [21] H. Zhang, Q. Wang, E. Chu, Xi. Liu, and L. Hou, «Analysis and Implementation of A Passive Lossless Soft-Switching Snubber for PWM Inverters», IEEE Trans. on Power Electron. Vol. 26, No.2, pp. 411- 426, Feb.2011
- [22] R. Huang and S. K. Mazumder, «A Soft Switching Scheme for Multiphase DC/Pulsating-DC Converter for Three-Phase High-Frequency-Link Pulse width Modulation (PWM) Inverter», IEEE Trans. on Power Electron., Vol.25, No.7, pp.1761-1774, July.2010.

Chapitre 5

Commande de la MADA par la Logique Floue

5.1 Introduction

Aujourd'hui, la logique floue est d'une grande Actualité. L'option courante est qu'il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage et de prise de décision provenant du japon ; cependant cette argumentation n'est pas du tout correcte.

En effet les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi A Zadah de l'université de californie de berkley .A cette époque la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux en effet les ordinateurs avec leur fonctionnement exacte par tout ou rien (1et 0) ont commencé a se répandre sur une large échelle; par contre la logique floue permet de traiter de variable non exacte dont la valeur peut varier entre (1et 0).

La logique floue suscite actuellement un intérêt général auprès des chercheurs et des industriels [1]. Elle peut généraliser des modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine, de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellements prise en charge par les humains [2]. En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles. Dans ce chapitre, on présente la base de la théorie de la logique floue, puis le principe de la conception d'un régulateur PI flou ainsi que son application pour le réglage de la vitesse et des courants d'une machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système de conversion éolien . On présente aussi les résultats de simulation.

5.2 Principe de la logique floue

Dans la perspective des sciences de l'ingénieur, nous pouvons admettre que dans les situations où les méthodes traditionnelles de modélisation à partir d'observation physiques s'avèrent non satisfaisantes, les sciences subjectives, particulièrement la logique floue, peuvent rendre beaucoup de services, dès lors que les connaissances sur la façon de résoudre un problème, de piloter un grand système, d'effectuer un réglage...etc. sont disponibles [3]. Cela suppose que l'on sache définir des méthodes rigoureuses de représentation des connaissances. En pratique la résolution d'un problème concret peut avoir recours à l'utilisation conjointe des méthodes objectives traditionnelles et celles subjectives. La logique floue offre un cadre formel, qui n'existait pas auparavant.

5.2.1 Ensembles flous

La théorie des ensembles flous est une théorie mathématique dont l'objectif principal est la modélisation des notions vagues et incertaines du langage naturel. Elle évite les inadéquations de la théorie des ensembles classiques quant au traitement de ce genre de connaissances. La fonction d'appartenance d'un ensemble classique A est définie par:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (5.1)$$

Cela signifie qu'un élément x est soit dans A ($\mu_A(x) = 1$) ou non ($\mu_A(x) = 0$). Or dans plusieurs situations, il est parfois ambigu que x appartienne ou non à A. Par exemple [10], la considérons l'ensemble A représentant les PCs qui sont trop chers pour une population d'étudiants. Après une enquête menée au sein de cette population, un PC ayant un prix supérieur ou égal à 2500 \$ sera déclaré trop cher, quand un prix inférieur ou égal à 1 000 \$ n'est pas trop cher. Il existe un nombre important de PCs ayant un prix entre ces deux limites, [10]. Dans cet intervalle, on peut utiliser des valeurs, comprises strictement entre 0 et 1, pour classer ces prix comme étant partiellement trop cher. Cette classification permettra de définir une nouvelle fonction d'appartenance, $\mu_A(x)$, associée à l'ensemble A représentant les PCs trop cher. $\mu_A(x)$ indique la valeur de vérité de la proposition un PC est trop chers. Si $\mu_A(x)$ est égal à 1 alors il est sûr et certain que x est dans A, $\mu_A(x)$ est égal à 0 implique que sûr et certain x n'appartient pas à A, $\mu_A(x)$ est strictement entre 0 et 1 implique que x appartient à A avec un degré de vérité égal à $\mu_A(x)$. A est donc l'ensemble flou associé à la valeur linguistique trop cher. A sera noté par, [10]

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \text{ avec } \mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (5.2)$$

Si x est discret, A est noté par:

$$A = \sum_x \mu_A(x) / x \quad (5.3)$$

Si X est continu, A est noté par:

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \quad (5.4)$$

Où $\mu_A(x)$ est la fonction d'appartenance à A et X est l'ensemble de toutes les valeurs possibles de x (l'univers de discours de x). La figure (5.1) illustre la différence entre la représentation de la valeur trop chère par un ensemble classique et par un ensemble flou.

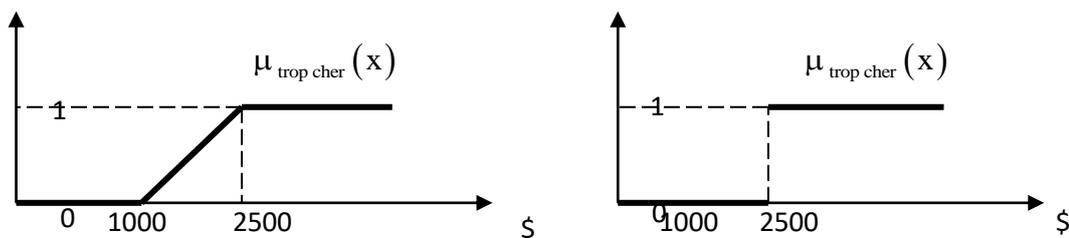


Fig.5.1 Ensemble flou et ensemble classique pour la valeur linguistique "trop chère"

5.2.2 Univers du discours

Un des premiers pas dans la conception d'une application floue est de définir l'ensemble de référence ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est l'ensemble de référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte donné la notion d'univers de discours se conçoit aisément: reprenons le concept de température: l'utilisateur pourra décrire la variable "température" par un certain nombre de mots: par exemple "chaud", "froid", "tiède", ou "très chaud", "assez chaud", "tiède", "assez froid", "très froid". Pour chacun de ces prédicats, on pourra donner une fonction d'appartenance. L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable [11].

5.2.2.1 Variable linguistique

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs associées sont linguistiques plutôt que numériques. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que: $\{x, T(x), U, G, M\}$ Où:

- x est le nom de la variable,
- $T(x)$ est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x ,
- U est l'univers du discours associé avec la valeur de base,
- G est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x ,
- M est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

5.2.3 Propriétés des ensembles flous

a. Égalité:

Deux ensembles flous A et B de X sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de X :

$$\forall x \in X, \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (5.5)$$

b. Inclusion:

Un ensemble flou A est inclus dans un ensemble flou B si toutes ses valeurs de fonction d'appartenance sont inférieures à celles de B sur tout le domaine X .

$$\forall x \in X: \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (5.6)$$

c. Support:

Le support est défini comme l'ensemble des valeurs du domaine X pour lesquelles la fonction d'appartenance n'est pas nulle.

$$\text{supp}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (5.7)$$

d. Hauteur :

La hauteur d'un ensemble flou A est la valeur max de la fonction d'appartenance sur le domaine X. Un ensemble flou A est dit *normal* si $h(A)=1$.

$$h(A) = \max_{x \in X} \mu_A(x) \quad (5.8)$$

e. 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)

$$\text{kern}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (5.9)$$

f. Cardinal :

Le cardinal d'un ensemble flou A est la somme des fonctions d'appartenance (cf. ensemble classique).

$$|A| = \text{Card}(A) = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \quad (5.10)$$

g. Partition floue :

Soit N ensembles flous A_j du référentiel X. $(A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N)$ est dite une partition floue si:

$$\forall x \in X \quad \sum_{j=1}^N \mu_{A_j}(x) = 1, \text{ avec } A_j \neq \emptyset \text{ et } A_j \neq X \quad \forall 1 \leq j \leq N \quad (5.11)$$

La figure (5.4) illustre un exemple d'une partition floue formée de cinq ensembles flous.

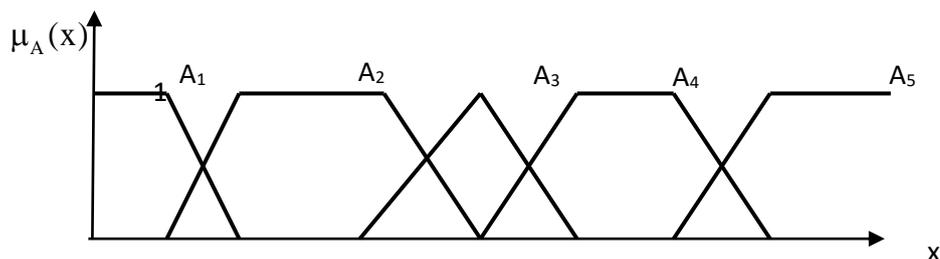


Fig. 5.2 Exemple d'une partition floue formée de cinq ensembles flous

5.2.4 Opérateurs de la logique floue

Il est important de savoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance comme dans l'exemple "l'air est froid et le vent est fort" ou dans "si l'air est froid ou si le vent est fort" il faut fermer la porte. Il apparaît deux types de composition ET, et OU auxquels il faut ajouter la négation. Notons x et y les variables linguistiques caractérisant la température de l'air et la force du vent et $\mu_A(x)$, $\mu_B(y)$, $\mu_E(z)$, $\mu_O(z)$, $\mu_C(z)$ avec $z = \{x, y\}$,

les fonctions d'appartenance associées aux propriétés respectives "l'air est froid", "le vent est fort", "l'air est froid et le vent est fort", "l'air est froid ou le vent est fort", "l'air n'est pas froid".

5.2.4.1 Opérateur NON

La propriété "l'air n'est pas froid" peut être caractérisée de façon évidente par la fonction d'appartenance :

$$\mu_c(z) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.12)$$

La figure (5.3) met en évidence cette relation:

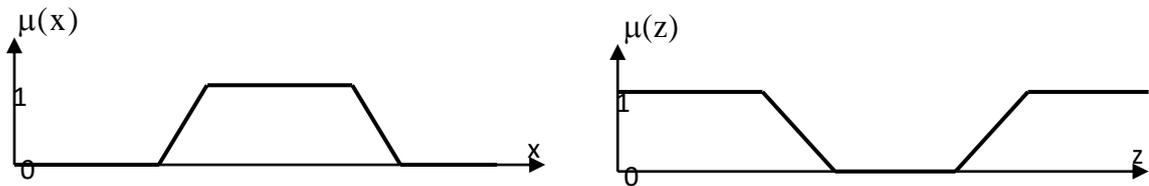


Fig. 5.3 Opérateur NON

A noter qu'il s'agit de l'opérateur NON, appelé aussi "complément", "négation" ou "inverse".

5.2.4.2 Opérateur Et

La solution la plus simple et la plus utilisée pour caractériser la satisfaction simultanée de deux propriétés est de poser :

$$\mu_E(z) = \mu_{A \cap B}(z) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (5.13)$$

On parle alors d'opérateur minimum.

Cette opération est représentée à la figure (5.4) Comme on le voit, il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_E(z)$ n'atteigne pas la valeur 1.

On peut facilement vérifier que l'opérateur minimum est commutatif, c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ sans que le résultat change.

Cet opérateur peut être appliqué à plus de deux ensembles. Dans ce cas s'applique le théorème d'associativité.

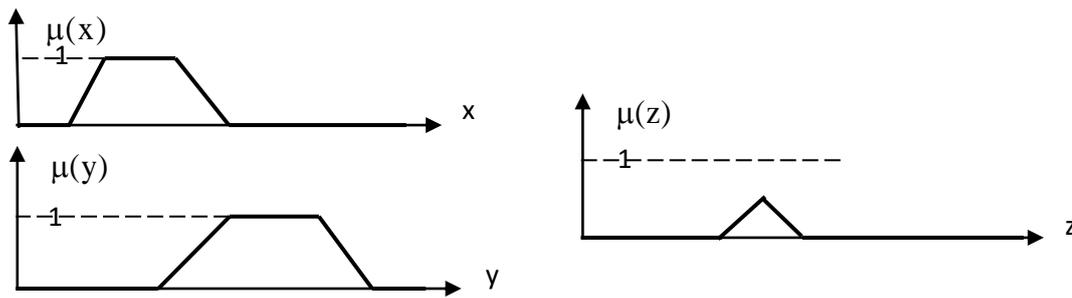


Figure 5.4 Opérateur ET

A noter qu'il s'agit de l'opérateur ET, appelé aussi " intersection".

5.2.4.3 Opérateur Ou

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique floue se fait en général par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur maximum.

$$\mu_O(z) = \mu_{A \cup B}(z) = \max(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (5.14)$$

La figure (5.6) montre cette opération. A noter qu'il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_O(z)$ atteigne deux fois la valeur 1.

Evidemment, l'opérateur maximum est aussi commutatif et associatif.

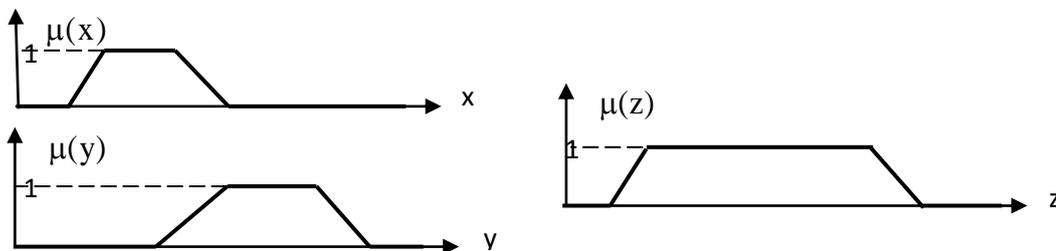


Fig. 5.6 Opérateur OU

Cependant, dans certaines circonstances, il peut être judicieux d'utiliser d'autres opérateurs, soit pour simplifier le traitement numérique, soit pour mieux tenir compte des opérations floues.

5.2.4.4 Autre opérateur de la logique floue

5.2.4.4.1 Opérateur ET et OU réalisés par opérateurs arithmétiques

Souvent, l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit appliqué aux fonctions d'appartenance, selon la relation

$$\mu_E(z) = \mu_{A \cap B}(z) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (5.15)$$

Il s'agit de l'opérateur produit.

La règle de calcul (5.15) peut être étendue à plus de deux termes dans le produit lorsqu'il faut combiner trois ou plusieurs ensembles. L'opérateur produit est souvent utilisé dans le domaine de réglage et de commande par logique floue comme alternative à l'opérateur minimum.

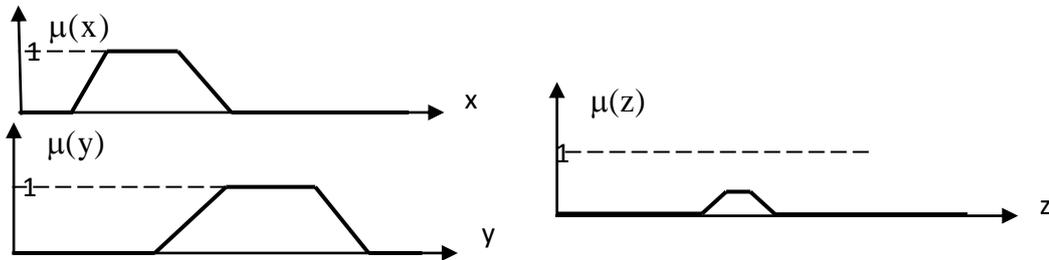


Fig. 5.7 Opérateur ET réalisé par la fonction produit

Par analogie, on peut réaliser l'opérateur **OU** par la formation de la somme des fonctions d'appartenances ou plus précisément par la valeur moyenne, à savoir:

$$\mu_o(z) = \mu_{A \cup B} = \frac{1}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(y)] \tag{5.16}$$

On parle alors de l'opérateur somme.

La figure (5.8) montre l'effet de cet opérateur. La somme est divisée par 2. En effet, il est fort possible que la somme $[\mu_A(x) + \mu_B(y)]$ dépasse le domaine admissible $[0,1]$. Afin que cette somme reste dans le domaine défini, on peut l'écarter ou la normaliser, comme effectuer dans la définition (5.16). Dans ce cas aussi, il est possible d'étendre la règle de calcul (5.16) à plusieurs termes. Il faut alors diviser la somme par le nombre de termes, afin d'obtenir une normalisation simple.

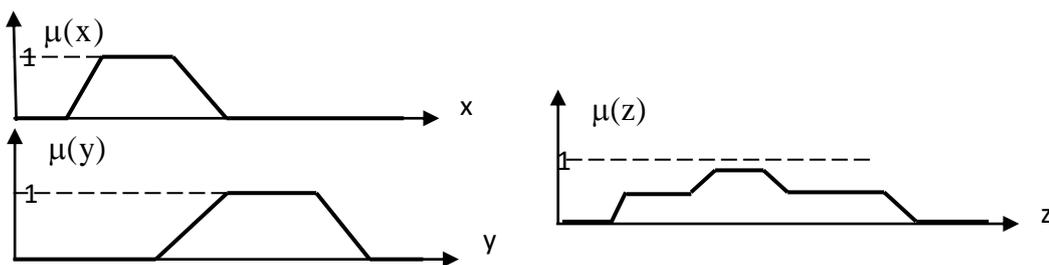


Fig. 5.8 Opérateur OU réalisé par la fonction de la somme

5.2.3.4.2 Opérateurs ET flou et Ou flou

Les opérateurs Et flou et OU flou sont des opérateurs combinés entre l'opérateur minimum et ou l'opérateur maximum et la moyenne arithmétique.

L'opérateur Et flou est défini par [11].

$$\mu_E(z) = \mu_{A \cap B}(z) = \beta \cdot \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] + [(1 - \beta) / 2] [\mu_A(x) + \mu_B(y)] \tag{5.17}$$

Et l'opérateur Ou flou par:

$$\mu_O(z) = \mu_{A \cup B}(z) = \beta \cdot \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] + [(1-\beta)/2][\mu_A(x) + \mu_B(y)] \quad (5.18)$$

Avec le facteur $\beta=1 \in [0,1]$, il est possible de pondérer l'influence des deux termes. Pour $\beta=1$, on aboutit respectivement à l'opérateur minimal ou maximal. Par contre, pour $\beta=0$, on obtient pour les deux opérateurs la moyenne arithmétique correspondant à l'opérateur somme selon (5.17). Dans ce cas, le ET flou et le OU flou se confondent. On peut étendre les deux opérateurs ET flou et le OU flou à trois ou à plusieurs termes. La somme qui apparaît entre crochets doit alors être divisée par le nombre de termes de la somme. La figure (5.9) représente l'opérateur ET flou et montre l'influence du facteur β sur l'allure de la fonction d'appartenance $\mu_E(z)$.

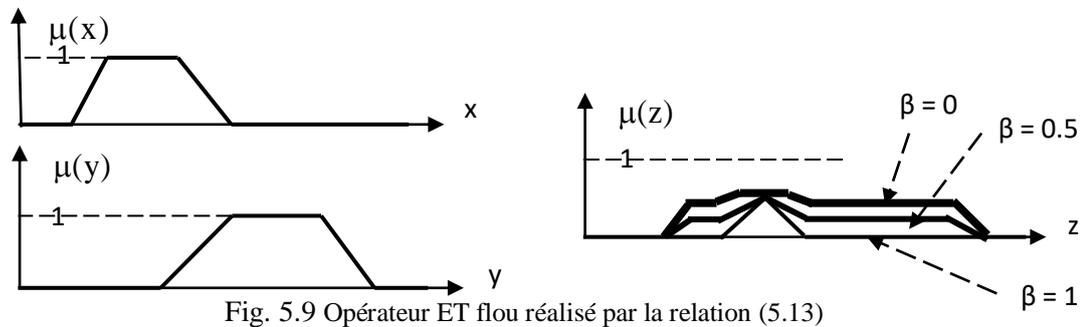


Fig. 5.9 Opérateur ET flou réalisé par la relation (5.13)

L'influence du facteur β sur la fonction d'appartenance résultante pour l'opérateur OU flou est mise en évidence par la figure (5.10)

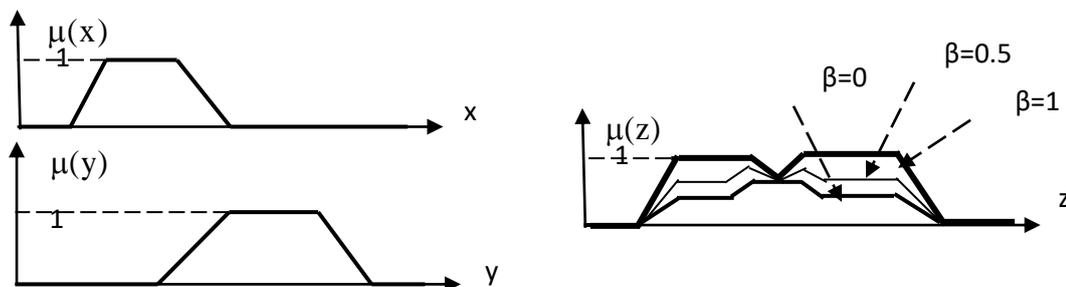


Fig. 5.10 Opérateur OU flou réalisé par la relation (3.14)

5.2.4.4.3 Opérateurs min-max et opérateur β

L'opérateur min-max est défini par la combinaison des opérateurs minimum et maximum, selon :

$$\mu(z) = \beta \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] + (1-\beta) \max[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (5.19)$$

Le facteur $\beta \in [0,1]$, permet de pondérer les deux opérateurs. Pour $\beta=1$, on obtient l'opérateur ET, réalisé par la formulation du minimum, tandis que pour $\beta=0$, on aboutit à

l'opérateur OU, réalisé par la formulation du maximum. Par contre, $\beta=0,5$ conduit à l'opérateur Ou, réalisé par la formation de la somme. La figure (5.11) montre l'effet de l'opérateur min-max en fonction du facteur β . On constate bien la grande variation de l'allure de la fonction d'appartenance résultante.

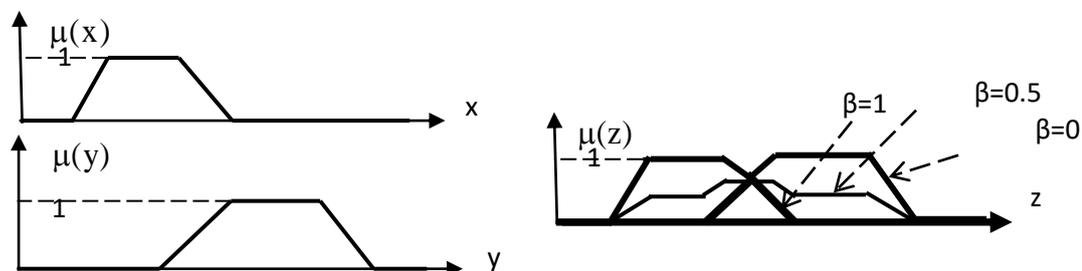


Fig. 5.11 Opérateur min-max réalisé par la relation (3.15)

5.3 Règles linguistique (flous)

Une règle floue est une affirmation (**Si** Prémisse **Alors** Conclusion (conséquence)) dont la prémisse et la conséquence sont des propositions floues ou des combinaisons de propositions floues par des connecteurs logiques (souvent le **ET** et le **OU**). Par exemple, la règle floue "Si x_1 est A_1 et x_2 est A_2 Alors y est B " est formée d'une prémisse composée de deux propositions floues (si x_1 est A_1 et x_2 est A_2) combinées par le connecteur logique ET, et une conséquence formée par une proposition floue simple (y est B). Des exemples de règles floues "S'il fait très chaud alors ouvrir la fenêtre".

"Si la chaussée est mouillée alors ralentir".

"Si la maison est neuve et si elle n'est pas loin de la mer alors son coût est très élevé".

Quand des conditions sont liées par une logique "OU", on considère le degré d'appartenance maximum parmi les conditions d'entrée. Et quand des conditions sont liées par "ET", on considère le degré d'appartenance minimum parmi les conditions d'entrée.

Il y a plusieurs formes de règles Si...Alors..... La forme générale est [12]:

Si (un ensemble de conditions est satisfait) Alors (un ensemble de conséquences)

Prenons deux types de règles suivants :

-Les règles de type Mamdani où les conclusions, comme les prémisses, sont des propositions floues :

Si x est A_1 et y est B_1 **Alors** Z est C_1

-Les règles de type Takagi-Sugeno où dans les conclusions, une sortie est une fonction :

Si x est A_1 et y est B_1 **Alors** $z = f(x, y)$

La combinaison de ces différentes règles se fait à l'aide de l'opérateur **ou**. La justification du choix de l'opérateur se fonde sur la pratique du langage courant : en effet, une telle énumération est comprise dans le sens [13]

Si... alors...

ou

Si... alors...

ou

...

Bien que l'opérateur **ou** ne soit pas explicitement mentionné.

5.3.1 Opérateurs linguistiques

Dans le langage humain, on utilise très souvent les opérateurs linguistiques comme : très, près de, presque, plus ou moins, etc. Ces opérateurs s'appellent les modificateurs des ensembles flous. Ils permettent de déterminer l'ensemble flou correspondant à une modification sur l'ensemble flou de départ [12] :

très :

$$\mu_A^2(x) = (\mu_A(x))^2 \quad (5.20)$$

plus ou moins :

$$\mu_A^{1/2}(x) = \sqrt{\mu_A(x)} \quad (5.21)$$

non :

$$\mu_{1-A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (5.22)$$

hautement :

$$\mu_{h(A)}(x) = (\mu_A(x))^3 \quad (5.23)$$

Ex : A="jeune", A² ="très jeune", A^{1/2} ="plus ou moins jeune", 1-A="non-jeune"[14]

$$A = \{ 1/10, 0.81/20, 0.36/30, 0.25/40, 0.16/50, 0/60, 0/70 \}$$

$$A^2 = \{ 1/10, 0.65/20, 0.13/30, 0.07/40, 0.02/50, 0/60, 0/70 \}$$

$$A^{1/2} = \{ 1/10, 0.9/20, 0.6/30, 0.5/40, 0.4/50, 0/60, 0/70 \}$$

$$1-A = \{ 0/10, 0.19/20, 0.64/30, 0.75/40, 0.84/50, 1/60, 1/70 \}$$

Alors :

Un homme de 30 ans appartient aux catégories jeunes, très jeunes, plus ou moins jeunes, non-jeunes, respectivement avec des degrés d'appartenance qui sont respectivement 0.36, 0.13, 0.6, 0.64.

5.4 Contrôleur flou

Un régulateur flou est un système à base de connaissance particulière composé de quatre modules principaux à savoir : la base de règle, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification comme il est montré par la figure (5.12).

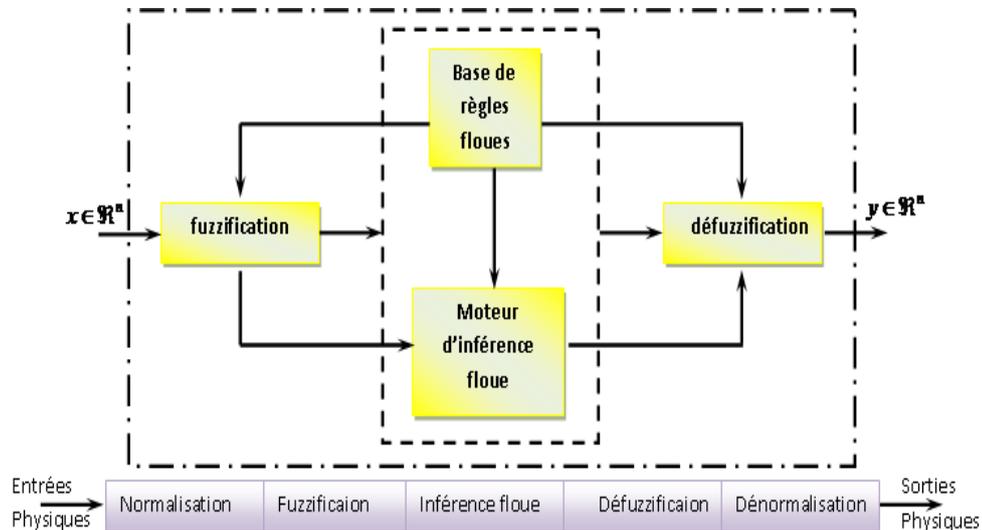


Fig. 5.12 Schéma synoptique général d'un contrôleur flou

A partir du schéma de la figure (5.12), on peut distinguer les niveaux suivants

- Une interface de fuzzification ;
- Une base de connaissances ;
- Une logique de prise de décision ;
- Une interface de défuzzification ;
- Le système à contrôler.

L'interface de fuzzification inclut les fonctions suivantes

- Mesure des variables d'entrée ;
- Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants ;
- Représentation de la fonction de fuzzification convertissant les données d'entrée en variables linguistiques ;

La base de connaissance est composée :

- D'une base de données fournissant pour définir les règles de contrôle linguistique.
- D'une base de règles caractérisant les buts et les stratégies de commande émis par les Experts au moyen d'un ensemble de règles linguistiques de contrôle.

La logique de prise de décision (inférences) : est le noyau du contrôleur flou; sa fonction est la prise de décision en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférences.

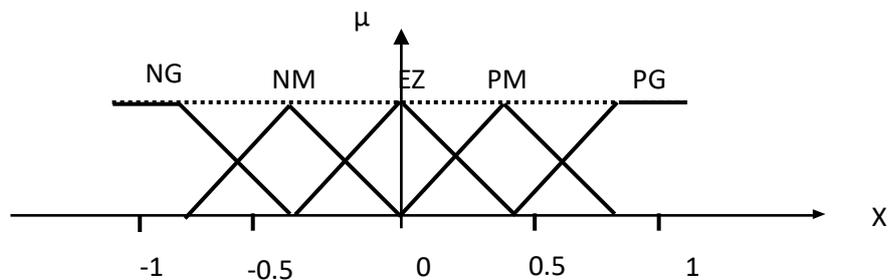
L'interface de défuzzification : cette interface réalise la fonction suivant :

- Une défuzzification fournissant une action de contrôle physique à partir d'une action de contrôle floue.

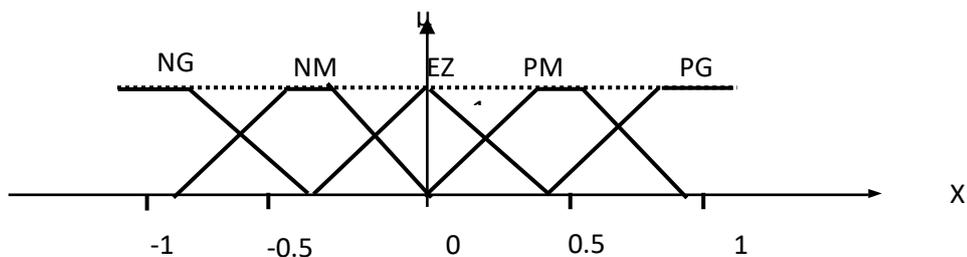
5.4.1 Fuzzification

Les grandeurs provenant du système à régler, utilisées par le régulateur par logique floue, sont mesurées à l'aide d'organes de mesure généralement de type analogique. Etant donné que l'implémentation du régulateur flou se fait presque exclusivement de manière digitale, il faut prévoir donc un convertisseur analogique/digital. La définition des fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrée se fait après le passage des grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques.(grandeurs ou variables floues) qui peuvent être traitées par les inférences [15]

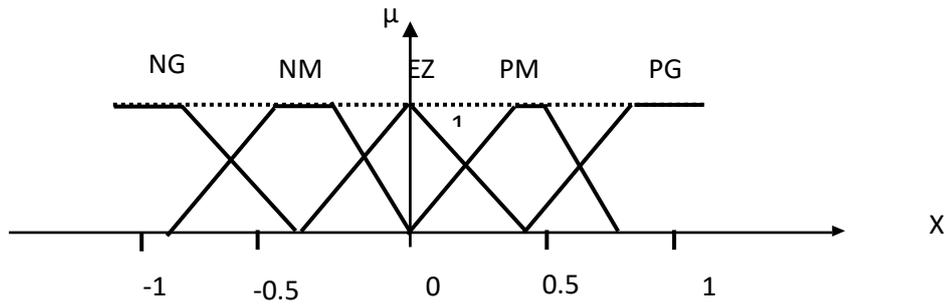
Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes (Figure 5.13). Il faut éviter les chevauchements (Figure 5.14) et les lacunes entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles voisins. En effet, cela provoque des zones de non intervention du régulateur (zones mortes), ce qui conduit le plus souvent à une instabilité de réglage. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous représentés par des fonctions d'appartenance. Le choix du nombre d'ensembles dépend de la résolution et de l'intervention du réglage désirée.



a. Fonction d'appartenance symétriques et équidistance

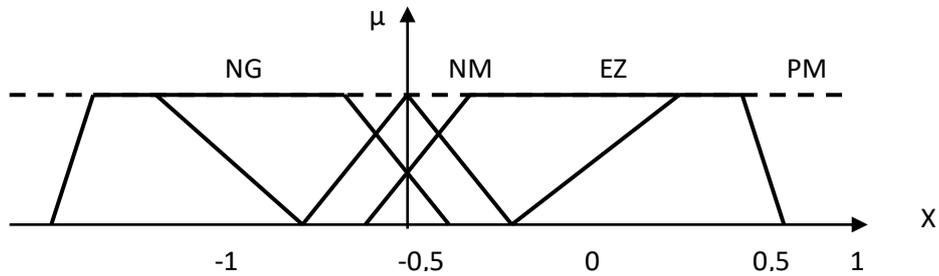


b. Fonction d'appartenance symétriques et non équidistance

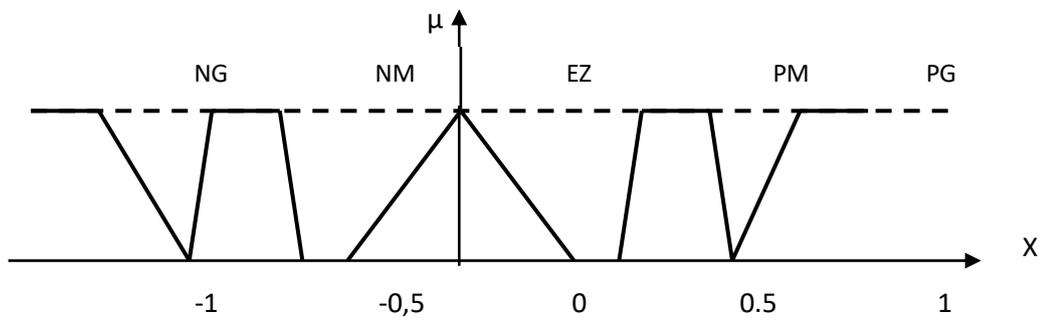


c. Fonction d'appartenance non symétriques et non équidistance

Fig. 5.13 Différentes formes pour les fonctions d'appartenance.



a. Formes avec chevauchement très important



b. Formes avec lacunes (chevauchement insuffisant)

Fig. 5. 14 Forme à éviter pour les fonctions d'appartenances des variables d'entrées

5.4.2 Inférences (déductions floues)

Les déductions floues lient les grandeurs mesurées (transformées en variables linguistiques) à la variable de sortie exprimée également comme variable linguistique. Il existe différentes possibilités d'exprimer les inférences, à savoir par description linguistique, par description symbolique, par matrices d'inférence ou par tableau d'inférence [16].

Plusieurs possibilités existent pour la réalisation des opérateurs de la logique floue qui s'appliquent aux fonctions d'appartenance. A partir de ces possibilités, on introduit la notion de méthodes d'inférences permettant un traitement numérique de ces inférences; en général, on utilise l'une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max - Min (contrôleur de type Mamdani).
- Méthode d'inférence Max - Prod (contrôleur de type Larsen).
- Méthode d'inférence Somme - Prod (contrôleur de type Zadeh).

5.4.3 Exemple de la méthode d'inférence Max-Min [14]

Afin de mettre en évidence le traitement numérique des inférences, on fera appel à un cas de deux variables d'entrée x_1 et x_2 et une variable de sortie x_r . Chacune est composée de trois ensembles NG (négatif grand), EZ (environ zéro) et PG (positif grand) et définie par des fonctions d'appartenance, comme le montre la figure (5.16). Pour les variables d'entrée on suppose que les valeurs numériques sont $x_1=0,44$ et $x_2=-0,67$; [14]

Dans cet exemple, l'inférence est composée de deux règles :

$x_r := \text{si } (x_1 \text{ PG ET } x_2 \text{ EZ}), \text{ ALORS } x_r := \text{EZ OU}$

$\text{si } (x_1 \text{ EZ OU } x_2 \text{ NG}), \text{ ALORS } x_r := \text{NG.}$

La première condition ($x_1 \text{ PG ET } x_2 \text{ EZ}$) implique pour $x_1=0,44$ un facteur d'appartenance $\mu_{\text{PG}}(x_1=0,44) = 0,67$ et pour $x_2 = -0,67$ un facteur d'appartenance $\mu_{\text{PG}}(x_2=-0,67) = 0,33$. La fonction d'appartenance de la condition prend la valeur minimale de ces deux facteurs d'appartenance $\mu_{C1}=0,33$ à cause de l'opérateur ET. La fonction d'appartenance $\mu_{\text{EZ}}(x_r)$ pour la variable de sortie est donc en crête à 0,33 et cela à cause de l'opérateur alors réalisé par la formation du minimum. La fonction d'appartenance partielle $\mu_{R1}(x_r)$ pour la variable de sortie x_r est mise en évidence par un trait renforcé sur la figure(5.16).

La condition ($x_1 \text{ EZ OU } x_2 \text{ NG}$) de la deuxième règle implique des facteurs d'appartenance $\mu_{\text{EZ}}(x_1=0,44)=0,33$ et $\mu_{\text{NG}}(x_2=-0,67)=0,67$. La fonction d'appartenance de la condition prend la valeur maximale de ces deux facteurs $\mu_{C2}=0,67$ à cause de l'opérateur OU. De la même manière que la première condition, la fonction d'appartenance de la deuxième condition $\mu_{\text{NG}}(x_r)$ de la variable de sortie est en crête à 0,67. La fonction d'appartenance partielle $\mu_{R2}(x_r)$ est également mise en évidence par un trait renforcé (Figure 5.16).

La fonction d'appartenance résultante $\mu_{\text{Res}}(x_r)$ s'obtient par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance partielles $\mu_{R1}(x_r)$ et $\mu_{R2}(x_r)$ puisque ces deux fonctions sont liées par l'opérateur OU.

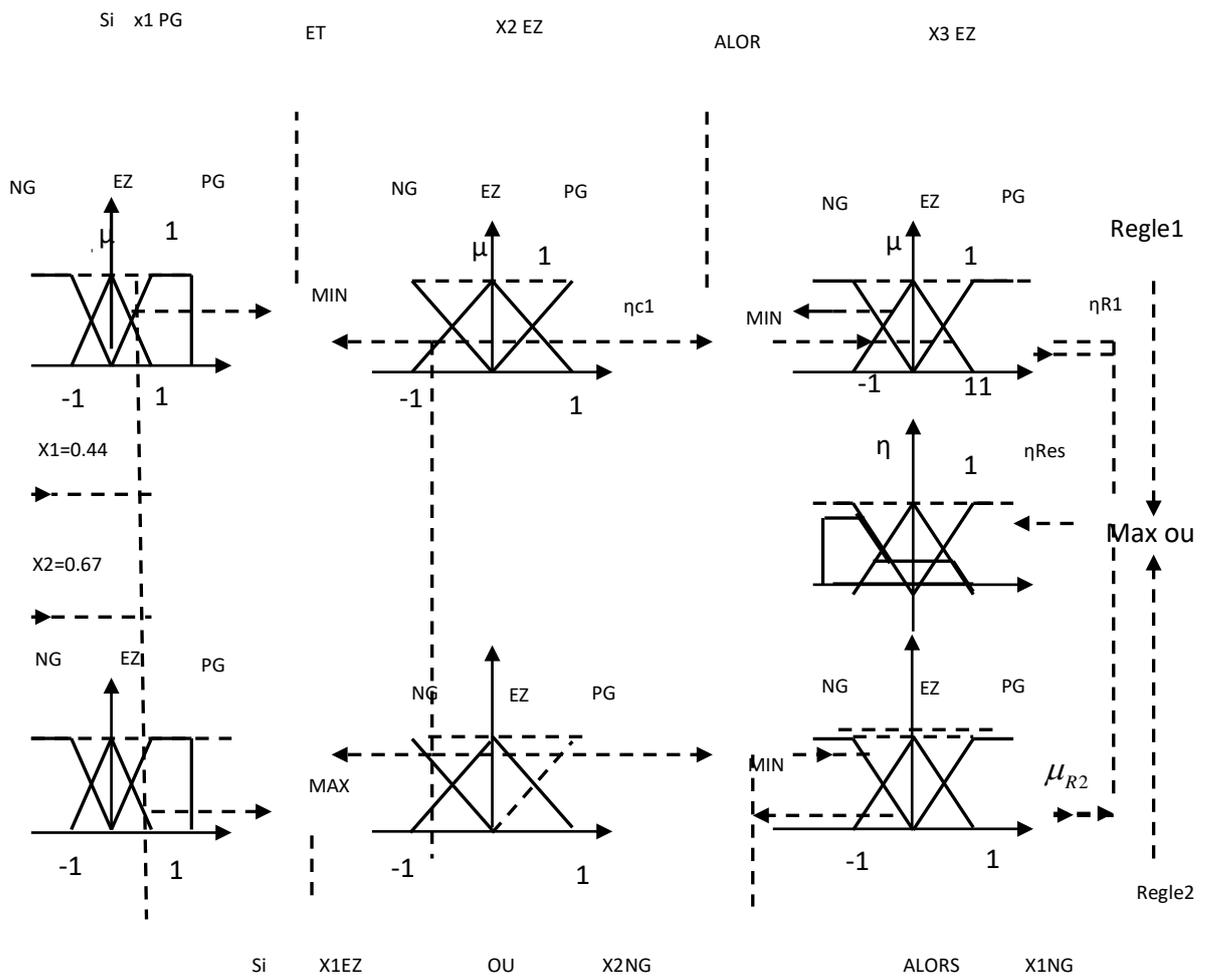


Fig. 5.16 Méthodes d'inférences Max-Min pour deux variables d'entrée et deux règles

En toute généralité, on obtient la fonction d'appartenance partielle $\mu_{Ri}(x_r)$ de chaque règle par les relations :

- Pour la méthode d'inférence Max - prod et Somme - prod

$$\mu_{Ri}(x_r) = \mu_{ci} \cdot \mu_{oi}(x_r) \tag{5.24}$$

- Pour la méthode d'inférence Max-Min

$$\mu_{Ri}(x_r) = \text{Min}[\mu_{ci}, \mu_{oi}(x_r)] \text{ avec } i = 0, 1, \dots, m. \tag{5.25}$$

La fonction d'appartenance résultante est donnée par les expressions suivantes :

- Pour la méthode d'inférence Max-prod et Max-Min

$$\mu_{Res}(x_r) = \text{Max}[\mu_{R1}(x_r), \mu_{R1}(x_r), \dots, \mu_{Rm}(x_r)] \tag{5.26}$$

$$\mu_{Res}(x_r) = [\mu_{R1}(x_r) + \mu_{R1}(x_r) + \dots + \mu_{Rm}(x_r)] / m \tag{5.27}$$

- Pour la méthode d'inférence Somme – prod :

5.4.4 Défuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification. Etant donné que l'organe de commande nécessite un signal de commande U_{cm} précis à son entrée, il faut donc prévoir une information déterminée (physique). Cette transformation est assurée par le bloc de défuzzification. Ce même bloc réalise la conversion inverse de la fuzzification (conversion digitale/analogique). Plusieurs stratégies de défuzzification peuvent être utilisées ; parmi lesquelles on trouve :

- Méthode de défuzzification par centre de gravité.
- Méthode de défuzzification par valeur maximale.
- Méthode de défuzzification par valeur moyenne des maximas.

5.4.4.1 Défuzzification par centre de gravité

L'une des méthodes de défuzzification les plus utilisées est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $m_{Res}(x_r)$.

a. Centre de gravité lors de la méthode d'inférence Somme – Prod pour la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante, il suffit de calculer son abscisse dont l'expression est donnée par :

$$X_r^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ci} X_i^* S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{ci} S_i} \quad (5.28)$$

$$\text{avec: } S_i = \int_{-1}^1 \mu_{oi}(x_r) dx_r \quad (5.29)$$

$$\text{et: } X_i^* = \frac{1}{S} \int_{-1}^1 x_r \mu_{oi}(x_r) dx_r \quad (5.30)$$

b. Centre de gravité lors de fonction d'appartenance sans chevauchement par analogie avec la relation (5.28), l'abscisse du centre de gravité dans ce cas de fonctions se calcule à l'aide de l'expression suivante:

$$X_r^* = \frac{\sum \mu_{CE} X_E^* S_E}{\sum \mu_{CE} S_E} \quad (5.31)$$

avec:

$$\mu_{CE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_{CEi} \quad \text{pour la méthode Somme - Prod.}$$

et $\mu_{CE} = \text{MaX}[\mu_{CEi}]$ pour les méthodes MaX - Min et MaX - Prod

C. Centre de gravité lors de la méthode des hauteurs pondérées Cette méthode est un cas particulier des fonctions d'appartenance sans chevauchement. Dans ce cas toutes les surfaces SE des fonctions d'appartenance sont uniformisées et prises égales à 1. L'abscisse du centre de gravité se réduit à l'expression suivante:

$$x_r^* = \frac{\sum \mu_{CE} x_E^*}{\sum \mu_{CE}} \quad (5.32)$$

5.4.4.2 Défuzzification par valeur maximale

La méthode de défuzzification par centre de gravité exige en général une envergure de calcul assez importante. Par conséquent, il sera utile de disposer d'une méthode plus simple. Quelques fois on fait appel à la méthode de défuzzification par valeur maximale. Le principe de cette méthode réside dans le choix de l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante. Cependant cette méthode présente un inconvénient. Lorsque l'abscisse de la valeur maximale est limitée entre x_{r1} , et x_{r2} Figure (5.17); toutes les valeurs comprises entre ces deux limites peuvent être utilisées. Cette méthode n'est donc pas recommandable pour le réglage par logique floue.

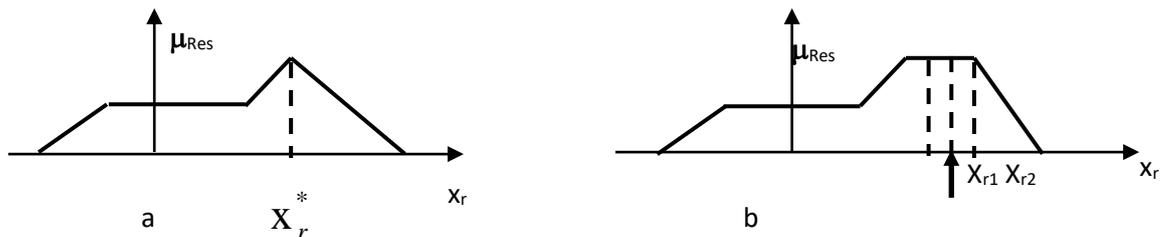


Fig 5.17 Defuzzification par valeur maximale

5.4.4.3 Défuzzification par la valeur moyenne des maximas

Pour éviter l'indétermination présentée lors de la méthode par valeur maximale, on fait appel à la méthode de défuzzification par valeur moyenne des maximas. Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne des abscisses de toutes les fonctions d'appartenance maximales. Cependant, cette méthode présente également un grand inconvénient qui réside dans le saut du signal de sortie si la dominante change d'une fonction d'appartenance partielle à une autre Figure (5.18) Par conséquent, ce comportement provoque un mauvais comportement du circuit de réglage.

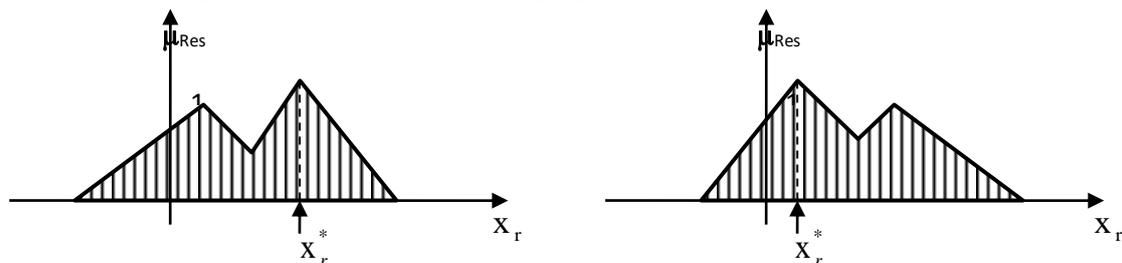


Fig. 5.18 Discontinuité lors de la défuzzification par la valeur maximale

5.5 Différentes approches pour la détermination des règles

Il existe deux approches principales pour la détermination des règles d'un contrôleur flou. La première est une méthode purement heuristique; les règles sont déterminées de telle sorte que l'écart entre la consigne et la sortie puisse être corrigé. Cette détermination repose sur la connaissance qualitative du comportement du processus. La seconde approche est une méthode pouvant déterminer d'une manière systématique la structure linguistique et/ou les paramètres satisfaisants les objectifs et les contraintes de contrôle, [15].

Une autre méthode a été introduite pour la détermination des règles et cela en se référant à la trajectoire du système en boucle fermée. La recherche intuitive du comportement du système en boucle fermée, pour la détermination des règles dans le domaine temporel, utilise fréquemment l'erreur e (observation) et la variation de l'erreur Δe . (Dynamique du processus) ainsi que la variation de la commande ΔU (entrée du processus à réguler).

La procédure à suivre, pour la détermination des règles du contrôleur flou est expliquée en considérant les points indiqués sur la figure (5.19). Pour chacun de ces points, on explicite l'expertise sous la forme suivante :

Règle 1: Si $e=PG$ et $\Delta e=EZ$ alors $\Delta U=PG$. Départ.

Règle 2: Si $e=PG$ et $\Delta e=NP$ alors $\Delta U =PM$.

Augmentation de la commande pour garder l'équilibre.

Règle 3: Si $e=PM$ et $\Delta e =NP$ alors $\Delta U =PP$.

Très faible augmentation de la commande pour ne pas dépasser la valeur limite.

Règle 4: Si $e=PP$ et $\Delta e=NP$ alors $\Delta U=EZ$. Convergence vers l'équilibre.

Règle 5: Si $e=EZ$ et $\Delta e=NP$ alors $\Delta U=NP$. Freinage du processus.

Règle 6: Si $e=NP$ et $\Delta e=PP$ alors $\Delta U =NM$. Freinage et inversion de la variation de la commande.

Règle 7: Si $e=NM$ et $\Delta e=EZ$ alors $\Delta U=NM$. Rappel du processus vers l'équilibre.

Règle 8: Si $e=NP$ et $\Delta e=EZ$ alors $\Delta U=EZ$. Convergence vers l'équilibre.

Règle 9: Si $e=EZ$ et $\Delta e=EZ$ alors $\Delta U=EZ$. Equilibre.

En considérant point par point le comportement du processus et l'action de variation de commande à appliquer, on en déduit la table du contrôle flou de base qui correspond à la table de règle très connue de Mac Vicar-whilan [15].

$\Delta e \backslash e$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	EZ
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Table 5.1

Sur la diagonale de la matrice d'inférence, on attribue à la variation de la commande l'ensemble EZ. Par conséquent, le système à régler se trouve dans un état transitoire qui ne nécessite pas d'intervention importante pour atteindre le régime stationnaire.

5.5.1 Développement pratique du contrôleur flou

La majorité des contrôleurs flous utilisent des algorithmes se basant sur le schéma simple de Mamdani pour un système mono-variable, figure (5.20).

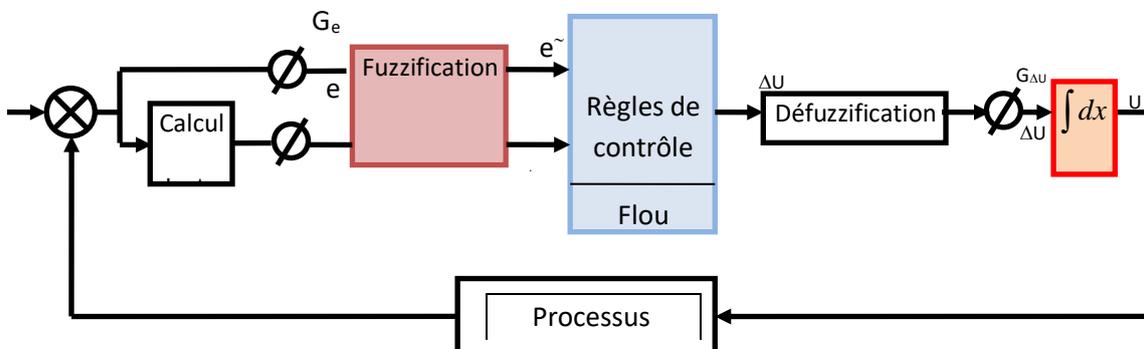


Fig. 5.19 Schéma bloc d'une boucle de régulation à contrôleur flou.

D'après le schéma ci-dessus, le système de régulation floue se compose essentiellement du contrôleur flou et du processus à contrôler. Le contrôleur flou comprend :

- Un bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps (Δe) ;
- Les facteurs d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et à celle de la commande ;
- Un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation ;
- Les règles de contrôle flou ;

- Un bloc de défuzzification de la variation de la commande ;
- Un bloc intégrateur.

La figure (5.20) représente les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

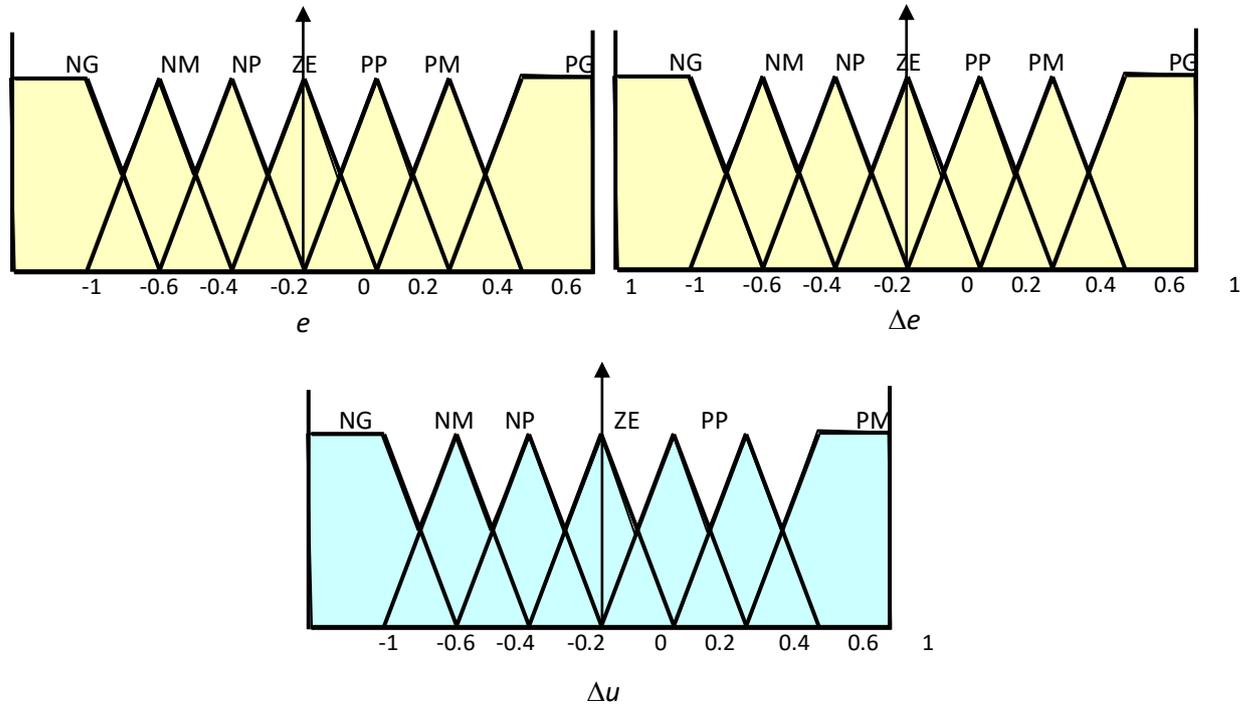


Fig.5.20 Fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

5.6 Loi de commande

5.6.1 Variation de la commande

La loi adoptée est fonction de l'erreur et de sa variation ($U=f(e, \Delta e)$). Par conséquent, la variation de la commande nécessaire est donnée par l'activation de l'ensemble des règles de décision associées. Dans les cas simples, cette variation de commande est obtenue par lecture d'une table de décision définie hors ligne. La forme générale de cette loi de commande est donnée par:

$$U_{k+1} = U_k + G_{\Delta U} \cdot \Delta U_{k+1}$$

Où G_{k+1} est le gain associé à la commande U_{k+1} , généralement choisi faible pour assurer la stabilité du système et ΔU_{k+1} est la variation de la commande.

5.6.2 Implémentation

La valeur de la commande correspondant à une telle situation peut être obtenue en suivant les étapes suivantes :

- 1- Calcul de la présente erreur et de sa variation.

$$\Delta e(K+1)=e(K+1)-e(K).$$

2-Normalisation de l'erreur et de sa variation à l'aide de facteurs d'échelle ou gains correspondants.

$$e(K+1)=e(K+1).G_e$$

$$\Delta e(K+1)= \Delta e(K+1)G_{\Delta e}$$

3-Conversion des valeurs obtenues en variables floues.

4-Lecture du niveau de quantification de la variation de la commande dans la table de décision correspondante.

5-Conversion du niveau obtenu en valeur numérique normalisée de la variation de la commande.

6-Détermination de la commande à appliquer à l'entrée du processus à réguler à l'aide du facteur d'échelle ou du gain correspondant

$$U.(K+1)=U.(K)+G_u U(K+1)$$

5.7 Conception d'un RLF

Les étapes principales pour concevoir un RLF sont montrées à la figure (5. 21). D'abord, il faut étudier le système à régler (procédé) et en faire une description adéquate. Il ne s'agit pas d'une analyse afin d'établir un modèle mathématique [2]. On doit plutôt déterminer les grandeurs mesurables et analyser les comportements dynamiques du procédé vis-à-vis de la variation de la grandeur de commande. La description peut faire appel aux variables linguistiques qui peuvent être incorporées aux connaissances de théorie de commande et/ou aux expériences d'opération. On peut alors établir les bases de données et de règles nécessaires pour déterminer la stratégie de réglage. On passe par la suite à la conception du RLF qui comprend la fuzzification, les inférences et la défuzzification. Il est généralement nécessaire de modifier les fonctions d'appartenance et les règles floues interactivement en plusieurs passages, afin de trouver un comportement acceptable.

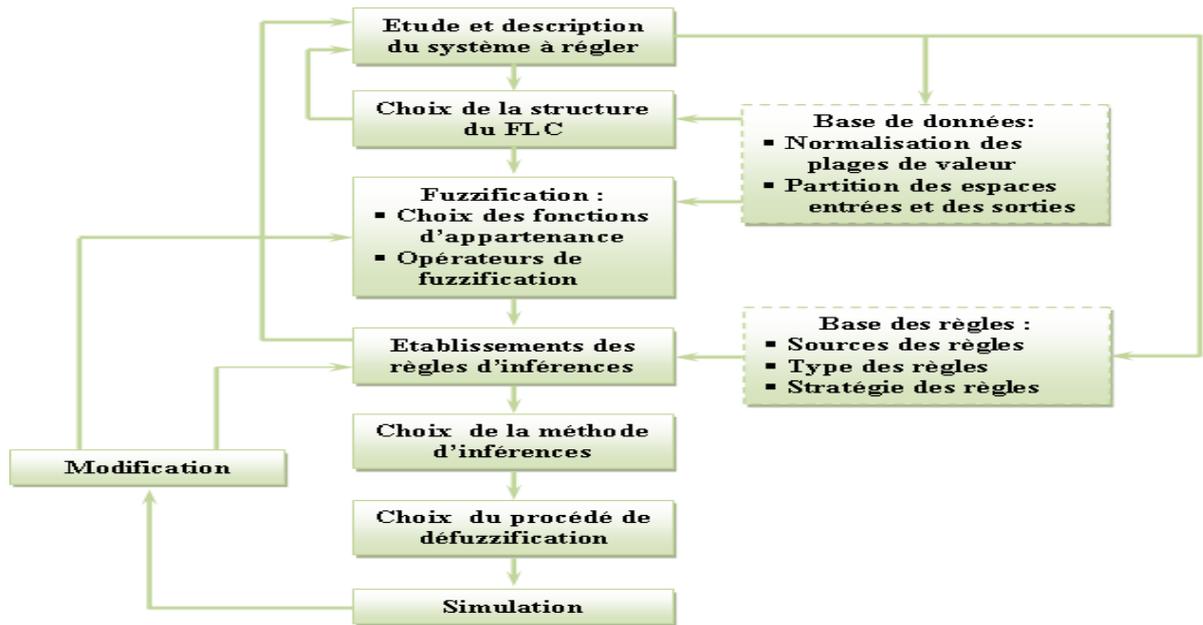


Fig. 5.21 Etapes principales lors de la conception d'un RLF.

5.8 Application de la logique floue à la commande des puissance active et réactive de la MADA

Dans cette partie, nous allons suivre les étapes indiquées dans le diagramme de la figure (5.21) pour concevoir deux régulateurs par logique floue de type Mamdani pour la boucle de commande des courants et des puissances, dans l'objectif et d'améliorer les performances de la commande, les deux régulateurs sont de même type, et possède les mêmes fonctions d'appartenance. La différence réside seulement dans les gains de normalisation. Le schéma bloc générale de la commande de la MADA par la logique floue est donné par la figure (5.22).

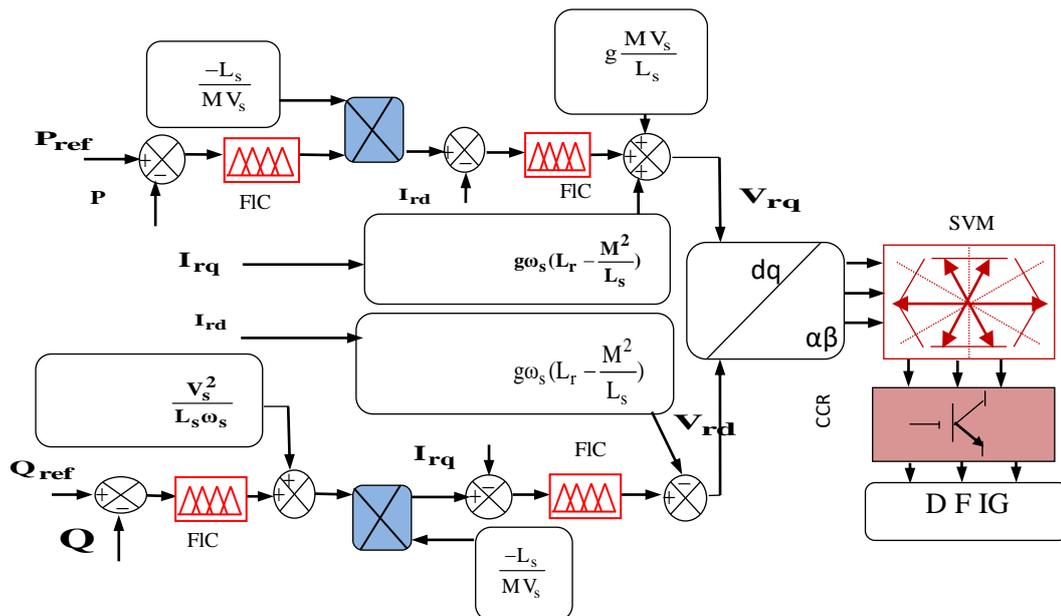


Fig. 5.22. Schéma bloc de commande de la MADA par la logique floue

5.9 Résultat de simulation

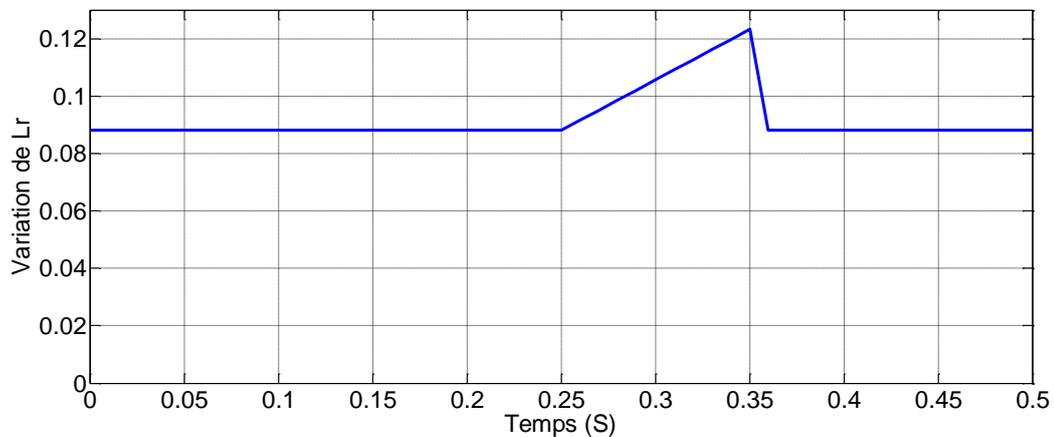
Les résultats de simulation reportés sur les figures suivantes concernent la commande de la chaîne de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable, avec l'application des échelons de référence des puissances actives et réactives.

A travers les figures suivantes, nous observons que les grandeurs mesurées des puissances actives et réactives suivent leurs valeurs de références, au vu de ces résultats, une meilleure poursuite des régulateur flous à celle des régulateur PI présentée au chapitre 2.

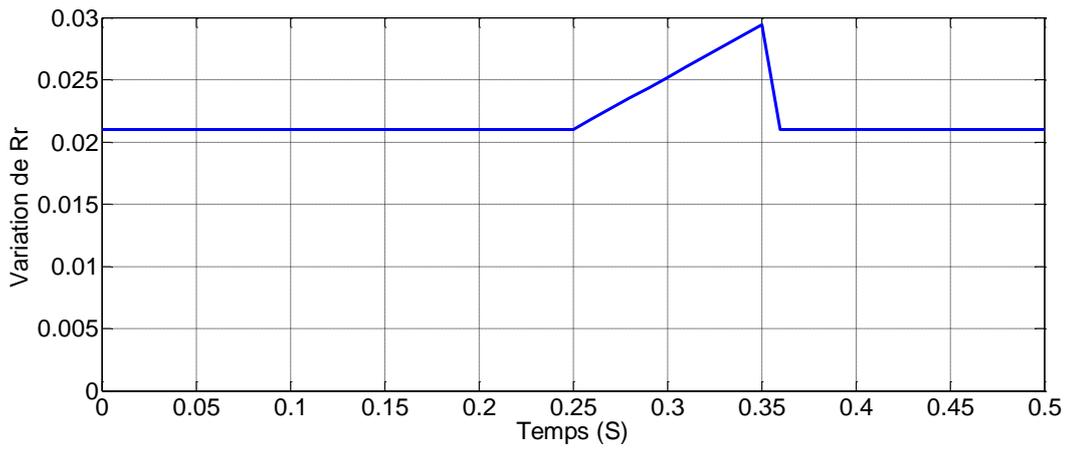
Pour les test de robustesse de la commande par les régulateurs flous, nous avons étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique R_r et de l'inductance L_r sur les performances de la commande.

Nous avons simulé le système pour une augmentation progressive de 150% de la résistance et l'inductance rotorique à l'instant $t=0.25$, aussi un retour à leurs valeurs initiales à $t=0.35$.les figures suivantes illustrent les résultats du test de simulation.

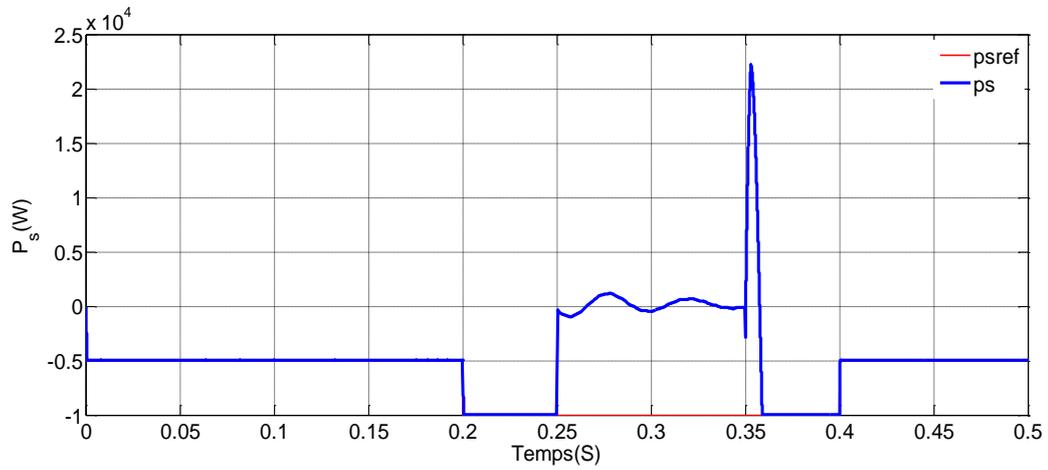
Les résultats de simulation montrent respectivement que ces variations paramétriques introduites à l'instant $t=0.25$ ont une léger influence sur les performances de la commande; contrairement au régulateur PI qui sont totalement influencés entraînent déstabilisation.



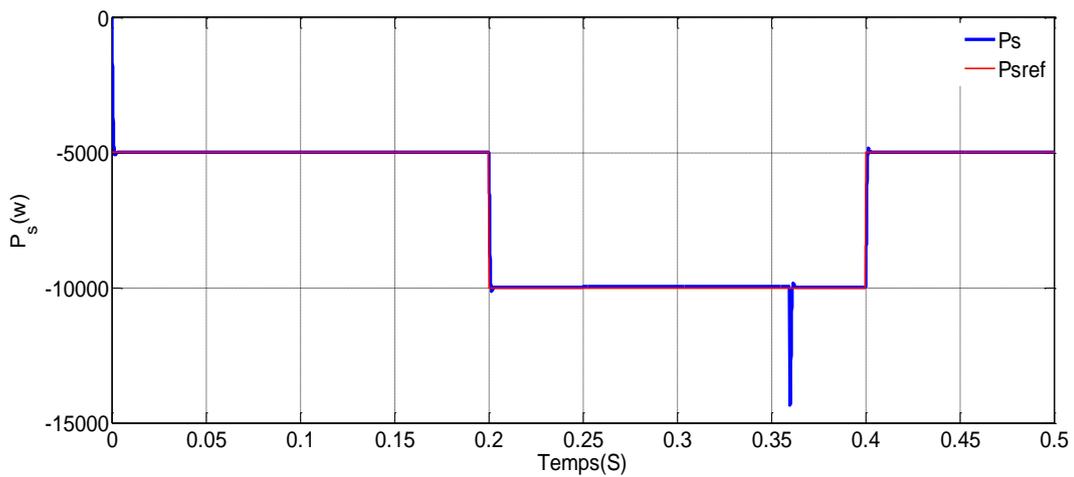
a) Variation de l'inductance rotorique



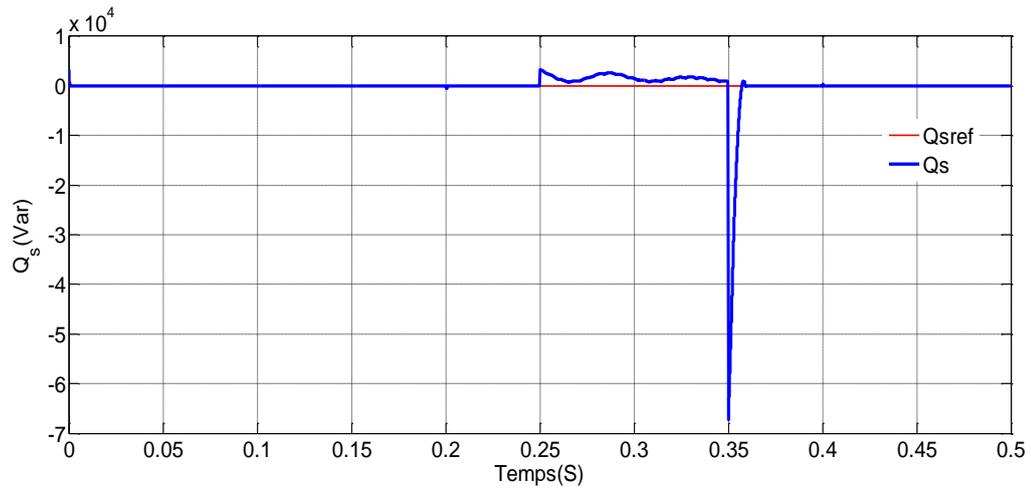
b) Variation de la résistance rotorique



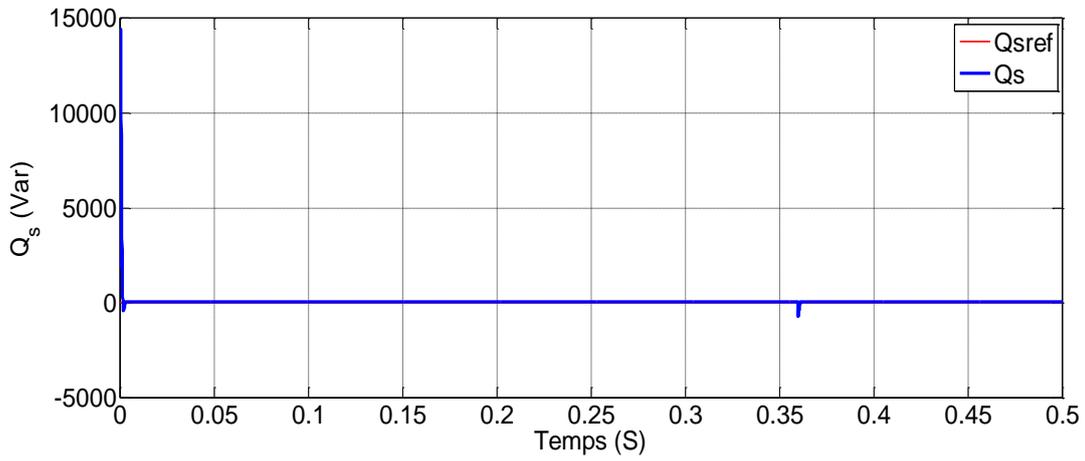
c) Puissance active avec un régulateur PI



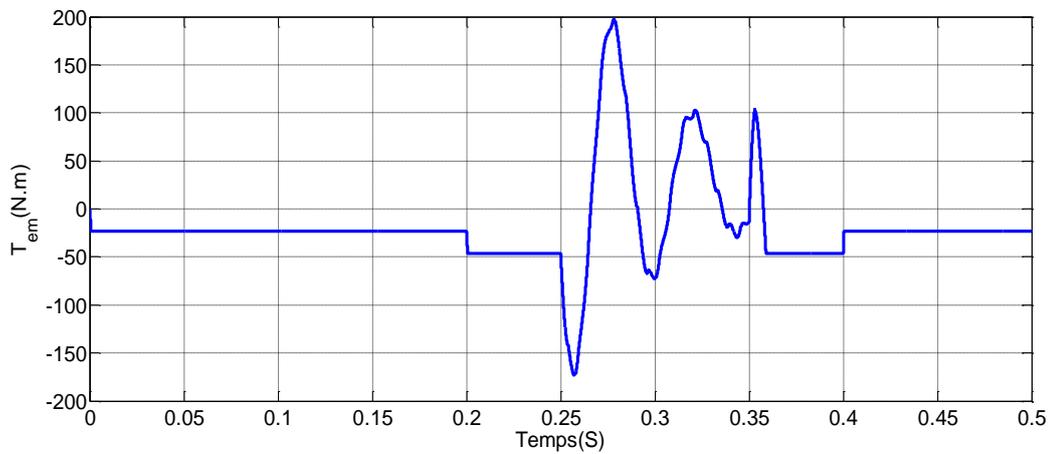
d) Puissance active avec un régulateur flou



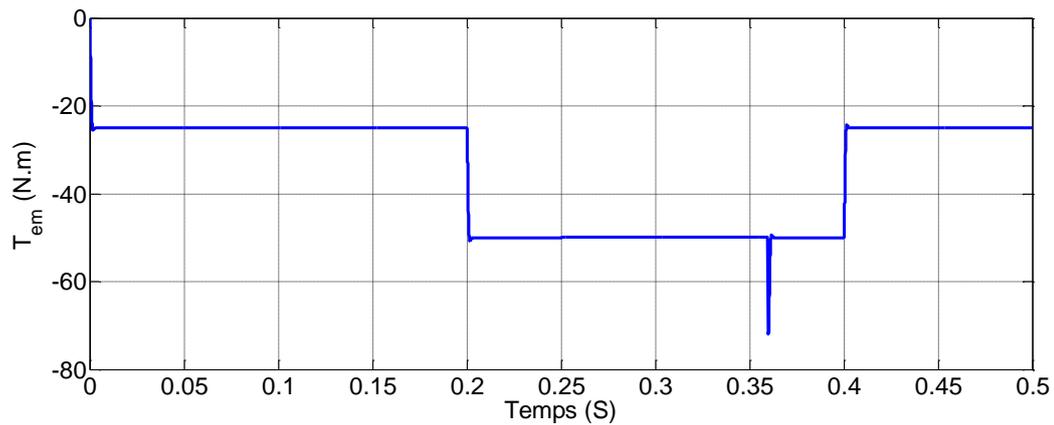
e) Puissance réactive avec un régulateur PI



f) Puissance réactive avec un régulateur flou



j) Couple électromagnétique avec un régulateur PI



h) Couple électromagnétique avec un régulateur flou

Fig. 5.23 Résultats de simulation

5.11 Conclusion

La technique et les notions de base de la logique floue ont été présentées au début de ce chapitre, et les aspects de la commande par logique floue (CLF), ainsi que la conception d'un contrôleur flou ont été introduits tout en justifiant notre choix de ce type de commande qui réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague de sa simplicité de conception. Une simulation à base d'un contrôleur flou a été effectuée pour réaliser le réglage de la vitesse à la place du régulateur PI d'une machine asynchrone à double alimentation.

Les résultats de simulation obtenus montrent que la CLF présente des performances de poursuite très satisfaisantes, et à prouvé son efficacité surtout dans les variations paramétriques. Le problème majeur dans la conception de la CLF est le choix des fonctions d'appartenances pour les variable d'entrées et de sortie.

5.10 Références bibliographiques

- [1] S. Bendaas, f. Nacéri, **F. Boumaraf**, “An Approche for the Conception of the intelligent control for Torque Ripple minimization with Varying Parametres in Electrical Motor Drives”, The 2nd International Conference on Electronics and Oil, ICEO’13, 05-06 March 2013, Ourgla, Algeria.
- [2] Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J., Cartwright, P., Hughes, M. “Wind Energy Generation” In Wiley, (2009).
- [3] Pena, R., Clare, J. C., Asher, G. M. “A doubly fed induction generator using back to back converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine”. In: IEE Proceeding on Electrical Power Applications 143 (September (5)) 1996.
- [4] Poller, M. A. “Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms”. In: Power Tech Conference Proceedings, 2003, IEEE, Bologna, vol. 3, 23–26 June 2003.
- [5] Brekken, T. Mohan, N. “A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions”. In: IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference, 2003, PESC’03, 15-19 June 2003, vol. 2, pp. 760-764.
- [6] Brekken, T. K. A., Mohan, N. “Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions”. In: IEEE Transaction on Energy Conversion, 22 (March (1)) 2007 129–135.
- [7] Lopez, J., Sanchis, P., Roboam, X. Marroyo, “Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips”. In: IEEE Transaction on Energy Conversion, 22 (September (3)) 2007, 709–717.
- [8] Sun, T., Chen, Z., Blaabjerg, F. “Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators”. IEEE Transactions on Energy Conversion, 20 (December (4)), 2005, 896–905.
- [9] Venturini M. “A new sine wave in sine wave out conversion technique which eliminates reactive elements”, In: Proc Powercon 7, San Diego, CA, pp E3-1, E3-15, 27-24 March 1980.
- [10] P. Borne, J. Rozinoer, J.Y dieulot, L. Dubois, " Introduction à la commande floue ", Edition Technip, 1998, Paris.
- [11] J. Godjevac, " Idées nettes sur la logique floue ", Presses polytechniques et universitaires comandes, lausanne, 1999.
- [12] " www.etis.ensea.fr/_revel/html/cours_IA/cours_IA.html", site web.

- [14] L. Baghli, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, France, 1999.
- [15] H. Bühler, "Réglage par logique floue", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1994. P. Borne, J. Rozinoer, J. Y. Dieulot, "Introduction à la logique floue", Edition technip, 1998.
- [16] Kickert. W. J.M and Mamdani, E.H, "Analysis of a fuzzy logic controller", Fuzzy Sets and Systems, 1, 29–44, 1978.
- [17] Buckley, J. J, "Theory of the fuzzy controller: an introduction", Fuzzy Sets and Systems, 51, 249–258, 1992.

Conclusion générale

La première partie de ce travail a pour objectif de présenter les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et de dresser un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne et de proposer en conséquence des solutions aux nouvelles contraintes imposées aux générateurs éoliens. Nous avons alors été amenés à concevoir des algorithmes de commande robuste d'une éolienne à vitesse variable maximisant le rendement aérodynamique tout en améliorant la qualité de la puissance générée.

Afin de commander le système éolien, deux stratégies utilisant le contrôle vectoriel de la MADA ont été détaillées. La stratégie MPPT permet de fournir un maximum de puissance active produite au réseau électrique grâce au fonctionnement à vitesse variable de la MADA. Par contre, la commande découplée des puissances active et réactive permet de réguler ces dernières selon des consignes imposées par le gestionnaire du réseau. Les résultats de cette stratégie ont été exposés et discutés.

La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques. Le contrôle du système éolien s'effectue via deux convertisseurs statiques triphasés, appelées CCM et CCR, situés entre le bobinage rotorique de la MADA et le réseau électrique. Le fonctionnement global du système de l'aérogénérateur et sa commande sont illustrés par les réponses à la commande en puissance, en régimes transitoire et permanent.

Dans le but de faire face aux inconvénients de l'alimentation par la PWM, une nouvelle méthode SVM a été introduite. Elle est capable de travailler avec une fréquence constante du convertisseur de puissance. Ce fonctionnement est assuré par l'utilisation d'une modulation MLI vectorielle pour laquelle, à chaque période de modulation, deux vecteurs actifs de tension et un vecteur de tension nulle sont appliqués. Avec cette technique, les oscillations des puissances et de couple sont notablement réduites. La réponse dynamique du système a été également améliorée, ce qui est confirmé par les résultats de simulations obtenus.

Par la suite la commande par la logique floue a été introduite. Les principes de la commande par logique floue ont été introduits tout en orientant notre choix de cette méthode pour commander la machine asynchrone à double alimentation. Un régulateur flou a été conçu étape par étape pour la boucle de vitesse et de courant

Les résultats obtenus montrent l'intérêt des algorithmes flous dans la régulation des processus aussi bien linéaire que non linéaire. Le réglage par logique floue a surpassé le réglage par (PI) en ce qui concerne la qualité de la réponse dynamique du système et la sensibilité vis à vis des variations paramétriques.

Finalement, la perspective intéressante de cette étude consiste à réaliser toutes ces commandes de la MADA expérimentalement pour vérifier et exploiter les essais des simulations présentés.

Il est proposé une continuation de la recherche dans le domaine de la commande double DTC de la MADA par l'utilisation de la linéarisation entrée-sortie et par l'utilisation de la méthode du backstepping. Aussi l'utilisation de la SVM, des réseaux de neurones avec mode glissant d'ordre 2 et la logique floue type 2 dans le domaine de la commande directe des puissances DPC).