



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté Des Sciences et Techniques Fès
Département de Génie Electrique



Département Génie électrique
Master SMTII

Sous le thème :

*Modélisation et commande de la MADA pour
l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne*

Réalisé par :

Mlle EL kabira EL MJABBER

Soutenu devant :

Pr.H.ELMOUSSAOUI

Pr.H.EL MARKHI

Pr.A.BYOU

Dédicaces

- *A ma chère maman, la personne qui a beaucoup sacrifié pour moi sans elle Je n'aurais eu la volonté d'atteindre ce niveau. Que Dieu puisse la garder éternellement heureuse .Merci du fond du cœur.*
- *A la mémoire de mon cher père.*
- *A toute ma famille.*
- *A tous mes amis.*
- *A tous les enseignants et les éducateurs qui ont contribué à ma formation Durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour.*
- *A toute la promotion SMTII.*
 - *A tous ceux qui me sont chers.*

je dédie ce modeste travail

Remerciements

Je remercie Allah, le Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage pour effectuer ce travail.

Je tiens à présenter mes remerciements à mes honorables professeurs encadrants Mr.H.EL MOUSSAOUI, et Mr H.EL MARKHI pour le temps consacré à la lecture et aux réunions qui ont rythmées les différentes étapes de mon stage. Les discussions que nous avons partagées ont permis d'orienter notre travail d'une manière pertinente. Je les remercie aussi pour leurs disponibilités à encadrer ce travail à travers leurs critiques et leurs propositions d'amélioration.

Aussi, j'adresse mes remerciements les plus profonds à Mr. ABARKAN El Houssain et à tous les professeurs du département Génie Electrique qui ont fournis les efforts nécessaires pour nous apporter toutes les connaissances technologiques

Je remercie chaleureusement Mr.Abdelilah BYOU, pour sa disponibilité et pour le suivi sans faille de notre projet. Nos longues discussions et échanges d'idées nous ont sans aucun doute fait progresser dans notre travail et permis de prendre le recul nécessaire pour mieux appréhender celui-ci. Merci d'avoir toujours pris le temps de répondre à mes requêtes et pour le détail accordé à la relecture de ce mémoire.

Un grand merci à tous nos collègues et amis de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour leurs précieuses aides et orientations.

Je suis reconnaissante à nos proches, parents et amis, qui ont su rester à nos côtés pendant toute notre période de formation.

Mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui auront contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette période de stage.

Sommaire

Chapitre I	7
La description des systèmes éoliennes	7
I.1 Historique	7
I.2 Introduction	8
I.3 Définition de l'énergie éolienne	8
I.4 Généralités sur les différents types d'éoliennes	9
I.4.1 Eoliennes à axe vertical	9
I.4.2 Eoliennes à axe horizontal	10
I.5 Principaux composants d'une éolienne	10
I.6 Le principe de fonctionnement d'une éolienne	13
I.6.Modélisation de la turbine :	14
I.6.1 Principe de fonctionnement de la turbine :	14
I.6.2 Coefficient de puissance	14
I.6.3 Stratégie de maximisation de la puissance	16
I.6.4 Modèle de multiplicateur	17
I.6.5 Modele de l'arbre	17
I.7.Simulations et interprétations :	18
I.8 Synthèse:	21
Chapitre II	22
La Modélisation de la MADA	22
II.1 Introduction	22
II.2 Etats l'art de MADA	22
II.2.1 Les éoliennes à vitesse fixe	22
II.2.2 Les éoliennes à vitesse variable	24
II.2.3 Les modes de MADA en fonctionnement génératrice	24
II.2.4 Structure des machines asynchrones à double alimentation	25
II.3.Modélisation de la MADA	28
II.3.1 Hypothèses simplificatrices	28
II.3.2 Equation électrique de la machines	29
II.3.4 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq :	30
II.4. Modélisation de l'onduleur	33
II.5. Simulation et interprétation	36

II.6. Synthèse	42
Chapitre III	43
Commande vectorielle indirecte de la MADA	43
III.1 Intruduction,	43
III.2.Principe du contrôle vectoriel à flux orienté	43
III.2.1 Modalisation du control vectoriel.....	44
III.2.2 Synthèse du régulateur classique utilisé	46
III.2.3 Commande vectorielle directe	48
III.2.4 Commande vectorielle indirecte	48
III.2.5 Régulation par la logique floue.	49
III.2.6 Commande vectorielle de la machine asynchrone par logique floue	49
III.3. Simulation et interprétation	51
III.4.Synthèse	56
CONCLUSION GÉNÉRALE	57
LISTES DES FIGURES	58
BIBLIOGRAPHIE	58
ANNEXES	62

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nos jours, la demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter, car l'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Les différentes centrales traditionnelles de production d'électricité utilisent des sources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturelle..), et par suite avec le développement, les sources fissiles (l'énergie nucléaire) telles que l'uranium, les hydrocarbures et l'eau, les centrales thermiques sont responsables de rejets des gaz atmosphériques. L'énergie nucléaire présente un avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution, mais le risque d'accident nucléaire demeure, et qui augment au fil des années comme le stockage de déchets nucléaire non réitérable. Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures [1]

Tous ces inconvénients ont poussé les chercheurs de réduire leur exploitation pour pallier à leurs problèmes, en faisant appel aux énergies dites «**renouvelables**» (éolienne et solaire). Ces dernières s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂. L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire. Plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne, c'est le cas de L'Allemagne, L'Espagne et le Danemark, ...etc. [2].

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre que le présent mémoire que je vous présente décrit une étude sur l'utilisation des machines asynchrones dans un système éolien. Le premier chapitre est consacré à la description et la modélisation du système éolien à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre on va aborder l'étude et la modélisation, premièrement de la machine asynchrone à double alimentation. Et deuxièmement de l'onduleur utilisé avec sa commande, sans oubliant leurs différents types (MADA et l'onduleur)

Enfin dans le dernier chapitre, on va étudier dans un premier lieu, la commande vectorielle directe et indirecte avec leur modélisation. En ce qui concerne le deuxième, on va faire la commande vectorielle avec les contrôleurs PI et la logique floue afin de comparer l'efficacité entre les deux.

La validation des résultats des modules obtenus, se fait à l'environnement Matlab/simulink , pour chaque chapitre.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale.

Chapitre I

La description des systèmes éoliennes

I.1 Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et la pression de l'air, dues au réchauffement intégral de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre ; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moulin des grains depuis le 7^{ème} siècle avant Jésus Christ. ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. A partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale.[1]

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180 en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12^{ème} et le 19^{ème} siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19^{ème} siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moulin des grains mais aussi pour le pompage d'eau.

L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 1800 unités installées.

Par ailleurs, la construction d'éoliennes multiples ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin américain.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion, et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis.

Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale de l'énergie éolienne connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années; la majorité de la demande découle de souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles «moins polluants». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : L'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW, en Amérique de sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au moyen Orient 150 MW. Avec certains projets d'énergie éolienne développés (au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du Monde à un prix aussi concurrentiel que celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon [3]).

I.2 Introduction

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe horizontal ou à axe vertical). Et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

En effet, il existe deux types d'éolienne à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Ainsi dans ce qui suit nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes rapides à axe horizontal. Qui sont non seulement plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [4],[5].

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) de plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions(jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences.[2][6]

I.4 Généralités sur les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles: les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

I.4.1 Éoliennes à axe vertical



Figure I.1. Éolienne à axe verticale

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [5]

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

I.4.2 Eoliennes à axe horizontal



Figure I.2. éolienne à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elle représente un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères [6]

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6MW[11]

I.5 Principaux composants d'une éolienne

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

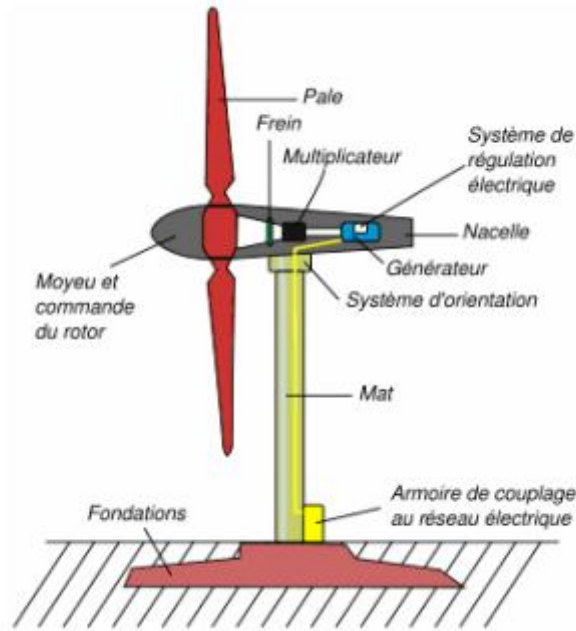


Figure I.3.les composants d'une éolienne

Le **mat**, généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle+rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mat des éoliennes atteint aujourd'hui 80m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100m).les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbre, maisons...Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [11]



Figure I.4.La tour d'une turbine

La **tour** doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor .[29]

Un **rotor**, composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La

puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [21]

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface A d'un disque circulaire est égale à :

$$A = \pi.r^2 = \pi.(d / 2)^2 \quad (I.1)$$

Où r est le rayon du disque circulaire, d est le diamètre

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [21]

Une nacelle montée au sommet du mat et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine[21]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mat de l'éolienne

Les différents composants d'une nacelle [8]

- **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **L'arbre secondaire** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine .
- **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un contrôleur** électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne.

Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5m/s), gérer la pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle .

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- **Divers dispositifs de refroidissement** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grace à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite.

I.6 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

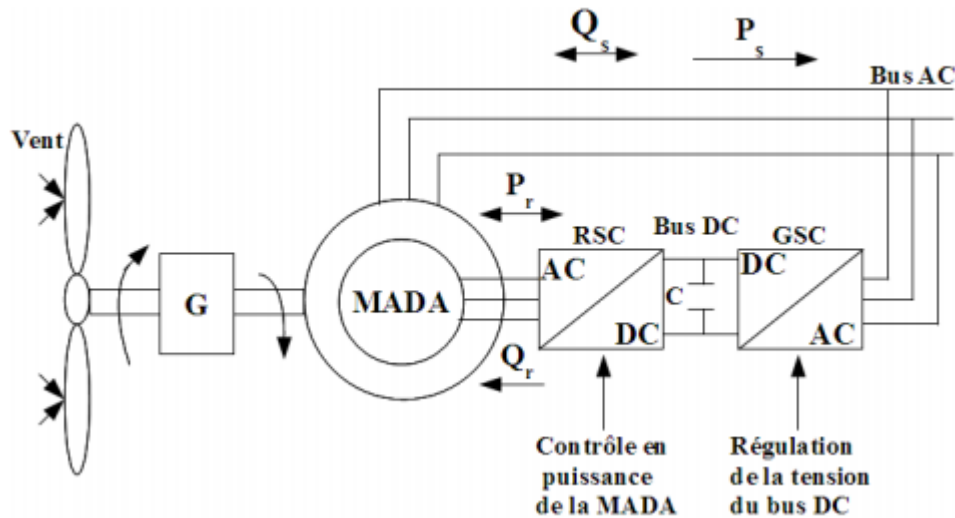


Figure I.5. Schéma du système éolien

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par le central peut être alors de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90KV, voire même 225K.[8]

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15km/h. Et au delà de 90 km/h ; les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90km/h est généralement faible (inférieure à 1%), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent 90km/h ; leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants ...la puissance d'une éolienne

classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5MW sont d'ores et déjà testé par les constructeurs [8]

I.6.Modélisation de la turbine :

I.6.1 Principe de fonctionnement de la turbine :

La turbine est un dispositif qui permettant de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique. Elle est caractérisée par son couple aérodynamique donné par : [10]

$$T = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S v^3 \quad (\text{I.2})$$

Ω_t est la vitesse de la turbine, ρ ($\rho = 1.225 \text{ kg / m}^3$) la densité de l'aire, S l'aire balayer par la turbine et v la vitesse de vent, le coefficient C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend du dimensionnement de la pale, du coefficient de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β .

Alors pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent [8]

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v} \quad (\text{I.3})$$

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par : [13]

I.6.2 Coefficient de puissance

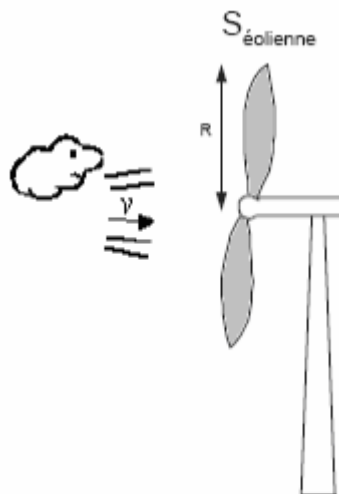


Figure I.6 Eolien simplifié

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent P_{vent} . la puissance extraite par l'éolienne $P_{éolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :[13]

$$P_{éolienne} = C_p \times P_{vent} \quad (I.5)$$

$$P_{éolienne} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^3 \times S_{éolienne} \times C_p \quad (I.6)$$

La relation(6) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent (v) induit une grande variation de puissance générée $P_{éolienne}$

$C_p(\lambda, \beta)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ , qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β , C_p est donné par la relation suivante [14].

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\left(\frac{C_5}{\lambda_i} \right)} + C_6 \lambda \quad (I.7)$$

Avec

$$C_1 = 0.5176, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 21 \text{ et } C_6 = 0.0068$$

Les six coefficients C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 et C_6 sont modifiés pour avoir un C_p maximal égal à 0.498 pour $\beta = 0^\circ$

➤ Loi de Betz

Le maximum du coefficient de puissance C_p a été déterminé par **Albert Betz** comme suit[12] :

$$C_p^{\max}(\lambda, \beta) = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (I.8)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance C_p ne peut être supérieur à 16/27 ?

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominal P à partir d'une vitesse de vent nominal V (Figure). Pour des vitesses de vents supérieures à (V), la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbine, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne à été conçue[10].

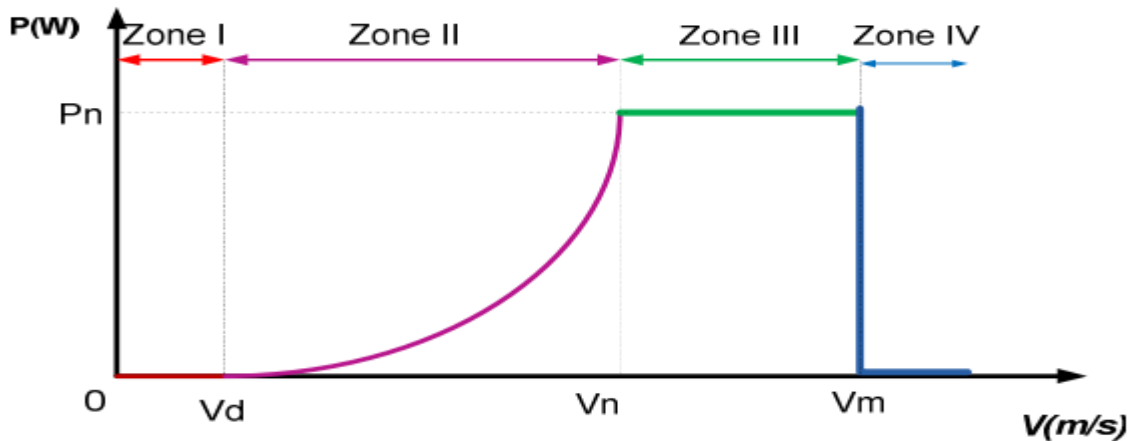


Figure I.7. Puissance captée par une turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent.

La zone I : la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage (V_d) de la turbine, la puissance captée est nulle (la turbine ne fournit pas de puissance).

La zone II : la vitesse du vent est supérieure à celle de la vitesse démarrage (V_d) et inférieure à celle nominale (V). Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent.

La zone III : la vitesse du vent supérieure à celle nominale (V), et plus petites que celle maximale, la puissance captée est limitée à celle nominale (P). Cette zone correspond au régime de charge complète ; où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance fournie par la turbine reste sensiblement égale à (P).

La zone IV : la vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée par un système de protection et la puissance extraite est nulle.

I.6.3 Stratégie de maximisation de la puissance

Les équations de la puissance électrique et mécanique du système en régime permanent permettent à nouveau la formulation du nouvel objectif principal. Cependant, pour la fonction de la puissance mécanique une forme plus simple utilisée. Pour réduire les degrés de liberté des systèmes, la vitesse du vent, seule variable non contrôlable du système, est sortie de la formulation mathématique par l'utilisation d'une forme optimale [14]

La puissance correspondant à une vitesse de vent est :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \times \rho \times S \times V_v^2 \quad (I.9)$$

Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale λ^{opt} , le coefficient de puissance est à sa valeur maximale $C_{pM} = C_p(\lambda^{opt})$, ainsi que la puissance de l'éolienne :

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pM} \times \rho \times S \times V_v^2 \quad (I.10)$$

D'autre part, si l'équation du rapport de vitesse supposé maintenu à la valeur optimale, on, isole la vitesse du vent (I.11) pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale, on obtient l'équation(I.12)

$$\lambda^{opt} = \frac{\Omega \cdot R}{V_v} \Rightarrow V_v = \frac{R}{\lambda^{opt}} \times \Omega \quad (I.11)$$

$$P_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} \cdot C_{pM} \times \rho \times S \times \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \cdot \Omega^3 \quad (I.12)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω uniquement.

En supposant que les conditions sont optimales (à puissance optimale), alors l'équation (I.12) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_{eol}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pM} \times \rho \times S \times \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \cdot \Omega^2 \quad (I.13)$$

I.6.4 Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure(I.11).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [13].

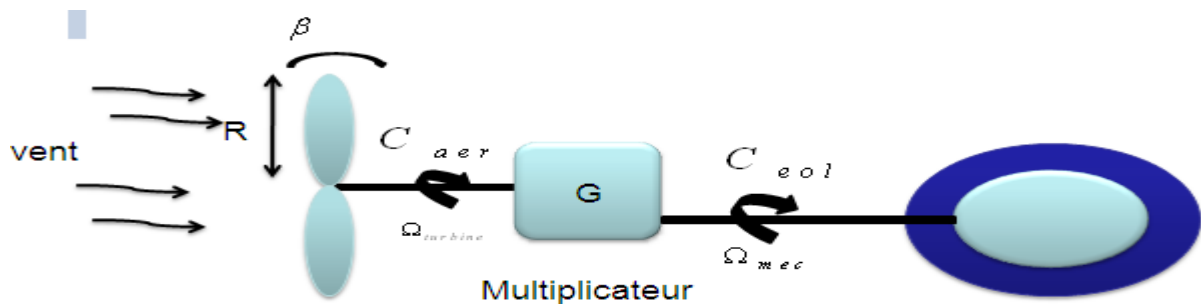


Figure I.8.schéma de la turbine éolienne

Générateur

Avec

$$C_{mec} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (I.14)$$

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m)

G : coefficient de la multiplication

I.6.5 Modele de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :[10]

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{turbine} - f\Omega_{mec} \quad (I.15)$$

f: coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).

$$C_{turbine} = C_{mec} + C_{em} : \text{Couple total de l'éolienne.}$$

C_{em} : Couple électromagnétique du générateur

J : Inertie en (kg. m²).

I.7.Simulations et interprétations :

Schéma de simulation

Les équations (I.2),(I.5),(I.6) et (I.7) permettent d'établir un schéma bloc de la turbine (fig I.9)

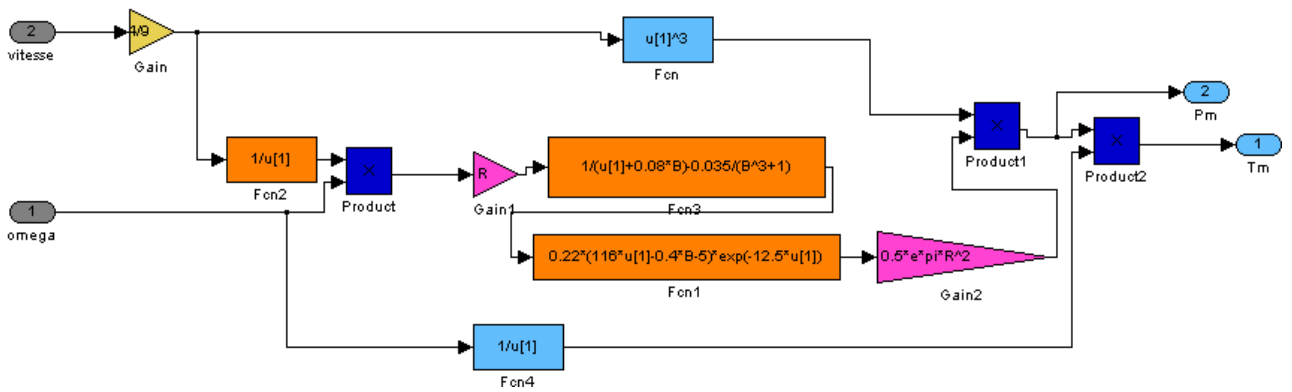


Figure I.9 Modèle de la turbine à vent développé sous simulink/matlab

Simulation

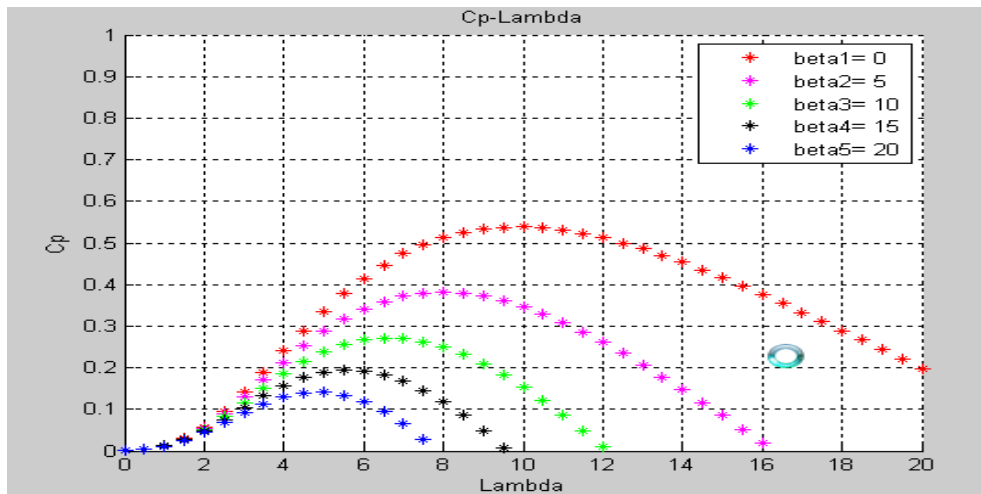


Figure I.10. coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse (λ) et l'angle de calage (β) développé sous Matlab

Les résultats de simulation de la figure I.9 donnent les courbes suivantes:

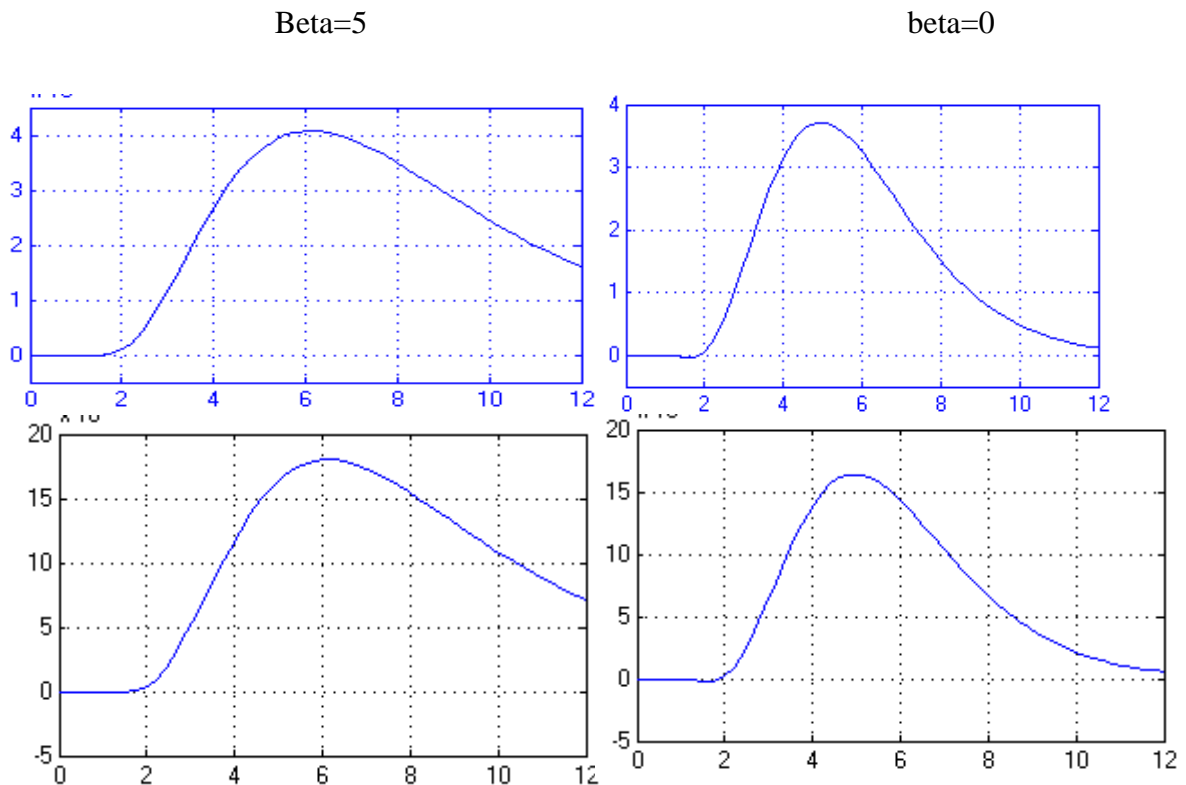


Figure I.11: Caractéristiques de la puissance et du couple à la sortie de la turbine, pour différentes valeurs de l'angle d'attaque des pales

Interprétations :

La **figure(I.10)** représente le coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation(I.7) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β_i . On remarque que si, pour un angle constant, la puissance captée β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à $\lambda_{optimal}$ 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, enfin de maintenir $\lambda = \lambda_{optimal}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent, selon l'équation(I.3).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée.

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38%.

A partir d'une certaine vitesse de vent, la puissance mécanique transmise par la turbine est supérieure à la puissance nominale du générateur électrique (**fig I.11**), les éléments de l'aérogénérateur sont dimensionnés autour de la puissance nominale, et ils ne peuvent donc pas supporter des grandeurs supérieures à certaines limites. Il faut donc limiter la puissance captée par l'éolienne lorsque le vent devient trop important.

I.8 Synthèse:

Dans ce chapitre, pour la première partie, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, et son historique; puis, un bref aperçu sur les différents types des éoliennes, et ces composants avec leurs définitions

Dans la deuxième partie on a présenté la modélisation de la turbine, aussi la loi aérodynamique de Betz et la variation de la puissance extraite du vent en fonction de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse du vent. On a donné aussi le principe de la techniques de réglage de puissance 'MPPT' afin de maximiser la puissance nominale disponible sur l'arbre du générateur à l'aide de code Matlab.

Dans le deuxième chapitre, l'étude va traiter la modélisation des machines asynchrone double alimentée et les différents convertisseurs électroniques assurant la commande de la MADA pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent.

Chapitre II

La Modélisation de la MADA

II.1 Introduction

Pour qu'on puisse bien comprendre le principe de fonctionnement de la MADA et pour accéder facilement à ces paramètres nécessaire pour les contrôler. Alors ce chapitre présente les concepts d'électrotechniques relatifs à la MADA et il est résumé en quatre parties.

D'abord un état d'art qui donne une brève vue sur les différentes structures de la MADA, afin de choisir la plus efficace. Dans la deuxième partie on développe également le modèle mathématique de MADA dans les repères (a, b, c) et (dq). Aussi une présentation des modules mathématiques dans la partie qui suit de l'onduleur utilisé.

Et enfin la validation de tous les modèles obtenue par la simulation sous l'outil Matlab/simulink

II.2 Etats l'art de MADA

II.2.1 Les éoliennes à vitesse fixe.

A. La génératrice asynchrone en mode réseau

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation des génératrices asynchrones triphasées à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique (Figure II.1). Celles-ci ont plusieurs avantages: elles sont robustes, leurs coûts sont faibles, elles ne nécessitent pas l'utilisation d'électronique de puissance, et elles ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateur d'où la possibilité de fonctionnement autonome. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La machine fonctionne par conséquent aux alentours de la vitesse de synchronisme (souvent $N_s=1500$ tr/min) dans le but d'en tirer la meilleure puissance exploitable.

La rotation des pales par des actionneurs (hydrauliques ou électriques), permet l'augmentation de l'angle de calage β . La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de vent trop fort susceptible d'endommager l'aéromoteur, le pitch control permet la mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$)

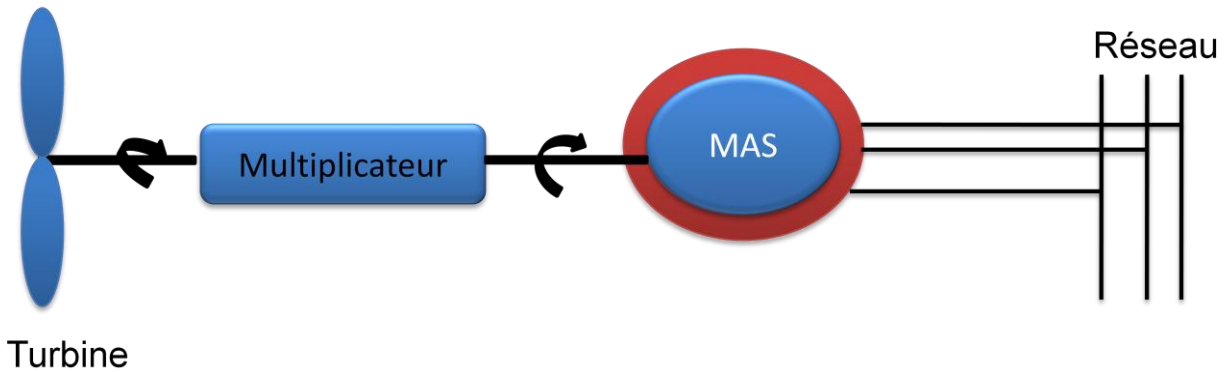


Figure II.1. Schéma de la connexion direct au réseau de l'éolienne avec la machine Asynchrone à cage d'écureuil

B. Génératrice synchrone en mode réseau.

La génératrice synchrone peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur (Figure II.2). Dans la machine synchrone raccordée directement au réseau, le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électriques alternatifs induit par la variation du flux magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit.

Les génératrices synchrones utilisées dans les éoliennes produisent un courant dont la fréquence est identique à celle du réseau. Celle-ci ont plusieurs avantages : pas d'électronique de puissance pour ajuster la fréquence à celle du réseau, c'est ainsi que l'on peut remarquer les éoliennes utilisant les génératrices synchrones. Cependant, les génératrices synchrones restent assez coûteuses et volumineuses, et un phénomène de décrochage peut apparaître. Lorsque le champ inducteur et le champ d'induit sont colinéaires, le couple est nul, et lorsqu'ils forment un angle de 90° , il ya apparition du phénomène de décrochage entraînant l'arrêt de la machine.

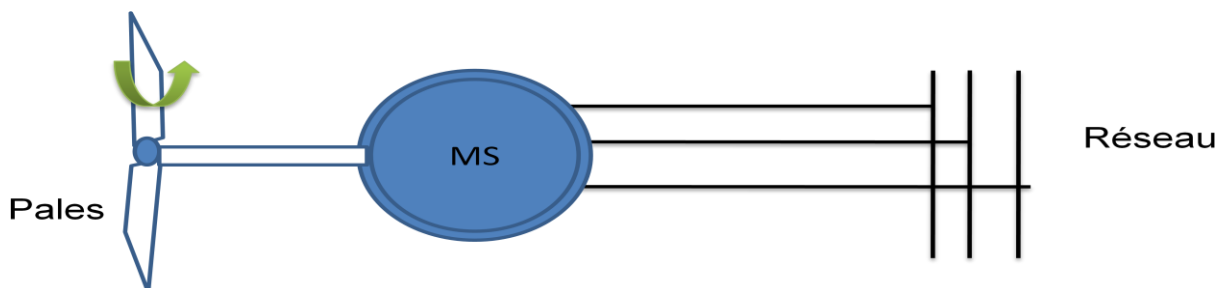


Figure.II.2 Schéma de la connexion directe au réseau de l'éolienne avec la Machine synchrone

.En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

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

II.2.2 Les éoliennes à 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 vent donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. 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, partant de ce constat, nous pouvons utiliser **la machine asynchrone à double alimentation (MADA)**

Alors, la MADA est un générateur à rotor bobiné avec un système de balais et de bagues (slip rings). Le stator de la machine est directement connecté au réseau au travers d'une chaîne de convertisseurs électroniques à bus continu intermédiaire. La MADA est alimentée à partir de la tension réseau et de la tension à la sortie du convertisseur électronique de puissance à fréquence variable associé au rotor. Afin d'obtenir des vitesses de rotation sous-synchrone et hypersynchrone, la chaîne de convertisseurs électronique associée au rotor doit être bidirectionnelle. Cela est effectué à partir d'un convertisseur back-to-back qui est constitué par deux convertisseurs de tension (coté rotor et coté réseau) avec un bus continu en commun. Le convertisseur de tension coté réseau est connecté à celui-ci via trois bobines permettant de filtrer les harmoniques de courant.

Il existe d'autres raisons pour l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour une éolienne à vitesse variable; comme la réduction des efforts sur les parties mécanique, la réduction du bruit, et la possibilité du contrôle des puissances actives et réactive [11], Le convertisseur de puissance coté machine est appelé Rotor Side Converter » (RSC)

II.2.3 Les modes de MADA en fonctionnement génératrice

A. Fonctionnement en mode générateur hyposynchrone

La figure (II.3) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [14]

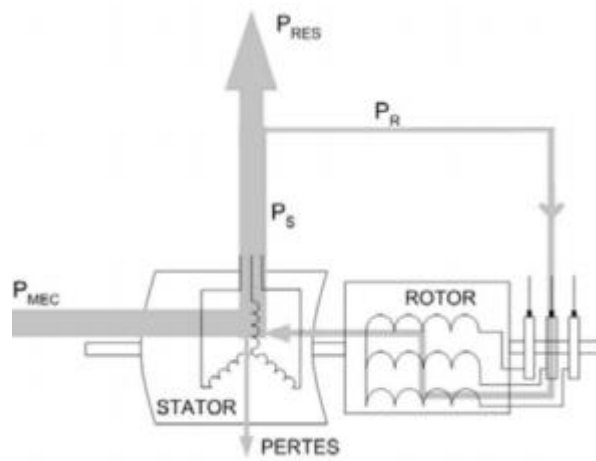


Figure II.3. Génératrice hyposynchrone

B. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure (II.4) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. la machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor. [14]

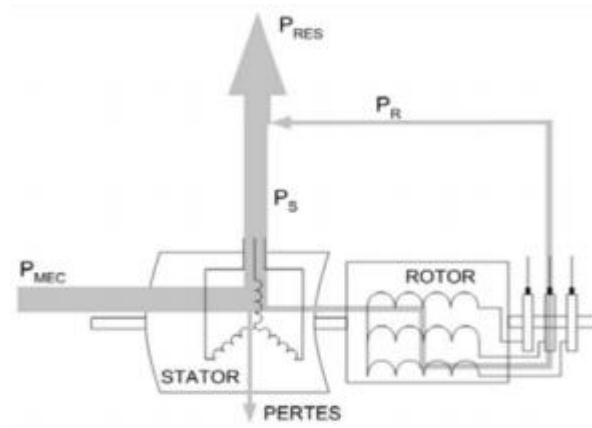


Figure II.4. Génératrice hypersynchrone

II.2.4 Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

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

Procédure de couplage

Pour coupler l'éolienne au réseau, on va suivre la procédure suivante :

- On démarre le système avec le stator de la MADA relié sur une charge.
- On règle ensuite l'amplitude des courants statoriques de manière à ce que tensions statoriques de la MADA aient même amplitude que les tensions du réseau.
- On couple la MADA sur le réseau.
- On débranche la charge maintenant située en parallèle du réseau.
- On peut maintenant réguler le transit de puissance vers le réseau.

A. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure II.5, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [6]. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

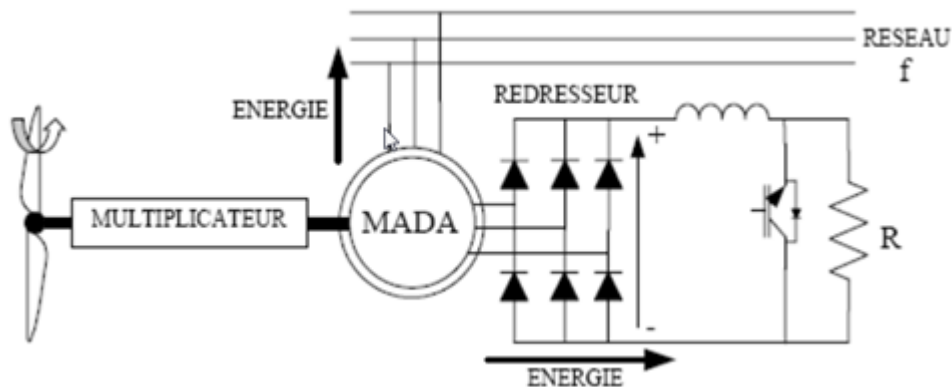


Figure II.5. MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

B. Machine asynchrone à double alimentation : structure de Kramer.

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer) (Figure II.4)[3].

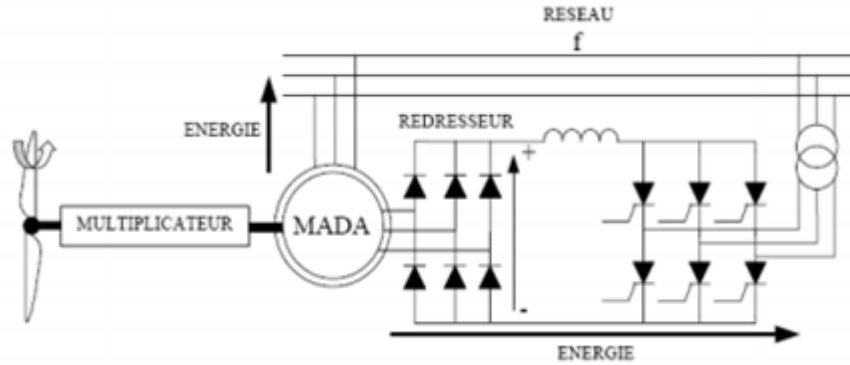


Figure II.6.MADA structure de kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux et il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée, au profit de la structure de Scherbius avec convertisseur à IGBT

C. Machine asynchrone à double alimentation: structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (figure II.7), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius .[11][6]

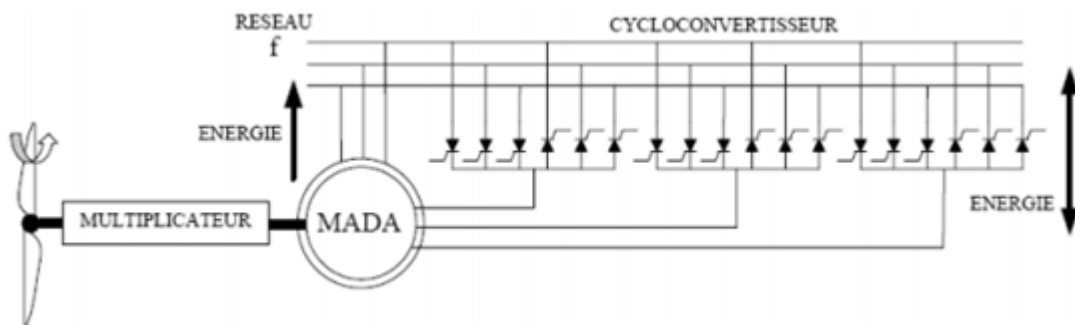


Figure II.7-Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la (Figure II.6). En effet si la variation du glissement doit rester inférieur à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone)[6].

D. Machine asynchrone à double alimentation : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration Figure(II.8) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [13]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'impulsions(MLI) dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal(rejet des premiers harmonique non nuls vers les fréquence élevées). [6]

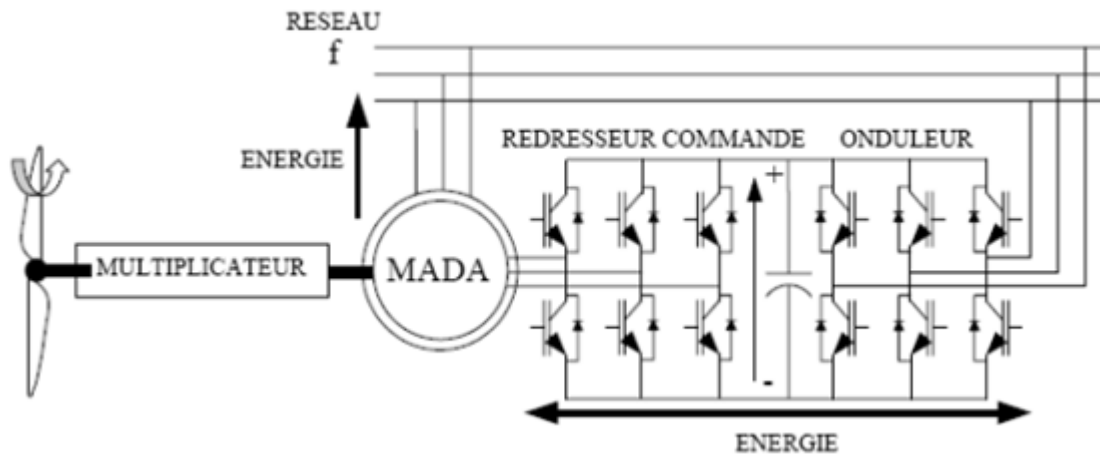


Figure II.8.structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de MADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des relations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance coté réseau. Si le glissement reste inférieur à 30% autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représente moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [6]. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements[15].

II.3.Modélisation de la MADA

II.3.1 Hypothèses simplificatrices.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa

configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont : [15]

- La machine est de constitution symétrique.
- On suppose que le circuit magnétique est parfaitement feuilleté au stator et au rotor (seuls les enroulements sont parcourus par des courants) et que la densité de courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaire (absence d'effet pelliculaire)
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.
- On considère que la force magnétique créée par chacune des phases statorique et rotorique est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotorique et statorique.

II.3.2 Equation électrique de la machines

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations des tensions des phases statorique et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \quad (\text{II.1})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\phi_r] \quad (\text{II.2})$$

$$[V_r] \neq 0$$

Les flux sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.3})$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{II.4})$$

Avec

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Et

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad \text{Et} \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.7})$$

R_s, R_r : résistances des enroulements rotorique et statoriques .

Les flux sont donnés par :

$$[L_{ss}] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad [L_{rr}] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

l_s, l_r : Inductances de fuites statorique et rotorique.

M_s, M_r : Inductances mutuel.

La matrices des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = \begin{pmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(\theta + 2\frac{\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - 2\frac{\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Avec $[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$

En remplaçant (I.3) dans (I.1), on obtient le système suivant :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}].[I_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}].[I_r]) \quad (\text{II.11})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}].[I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}].[I_s]) \quad (\text{II.12})$$

Equations mécanique de la machine

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}].[I_r]) \quad (\text{II.13})$$

Donc l'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - f_r \cdot \omega \quad (\text{II.14})$$

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

II.3.4 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq :

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park [16]

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [17]

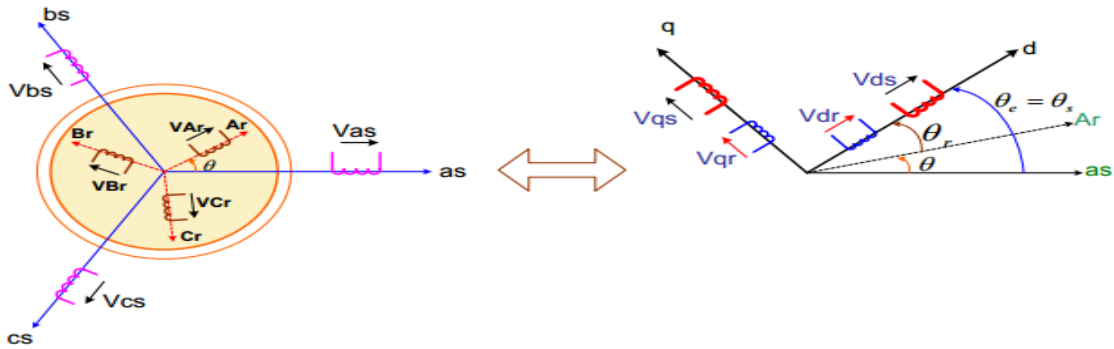


Figure II.9. Passage de triphasé au biphasé

Les deux bobines d et q, produisent le même effet que les trois bobines réelles fixes.

Avec :

- d : axe directe stator et rotor.
- q : axe en quadrature stator et rotor.

La matrice de transformation est défini par :

$$P(\alpha) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ -\sin(\alpha) & -\sin\left(\alpha - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\alpha - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.15})$$

L'angle α est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps.

Le passage du système biphasé au système triphasé est défini par le produit matriciel suivant

$$[X_{ABC}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dq}] \quad (\text{II.16})$$

$P(\theta)$ est la matrice de Park modifiée définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Les tensions rotoriques V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} et les tensions statoriques V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} sont transformées en composantes directes et en quadratures $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$.

Les tensions de statoriques et rotoriques sont :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Les équations dynamiques de la machine sont exprimées par

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \quad (\text{II.20})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \quad (\text{II.21})$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (\text{II.21})$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \phi_{rd} \quad (\text{II.22})$$

R_r et R_s sont respectivement les résistances des bobinages rotoriques et statoriques,

$\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}, \phi_{rq}$, Sont les composantes directs et en quadratures des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Le couple électromagnétique développé par la machine est :

$$C_{em} = p \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sd} i_{rd} - \Phi_{sq} i_{rq}) \quad (\text{II.23})$$

II.4. Modélisation de l'onduleur

➤ L'Onduleur

Afin de générer un courant alternatif sur le réseau électrique on est appelé à utiliser un onduleur, qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Il existe plusieurs structures d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminée où permettant des performances recherchées comme la structure de Karmer qui a utilisées un pont à diode et un pont à thyristors, ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composées de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées. L'apparition de nouveaux composants d'électronique de puissance à permis de développer de nouvelles structures d'une grande performance par rapport aux structures classiques, en l'occurrence, l'onduleur triphasé à trois niveaux

Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI ,qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions .

Pour simplifier l'étude supposons que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c'est-à-dire K_{ci} ($c \in [1, 2, 3], i \in [1, 2]$)
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé .

Un onduleur de tension est donné par la figure (II-10)

On a, donc :

$I_{Kci} = 0$, $V_{Kci} \neq 0$;Interrupteur ouvert,

$I_{Kci} \neq 0$, $V_{Kci} = 0$;interrupteur fermé .

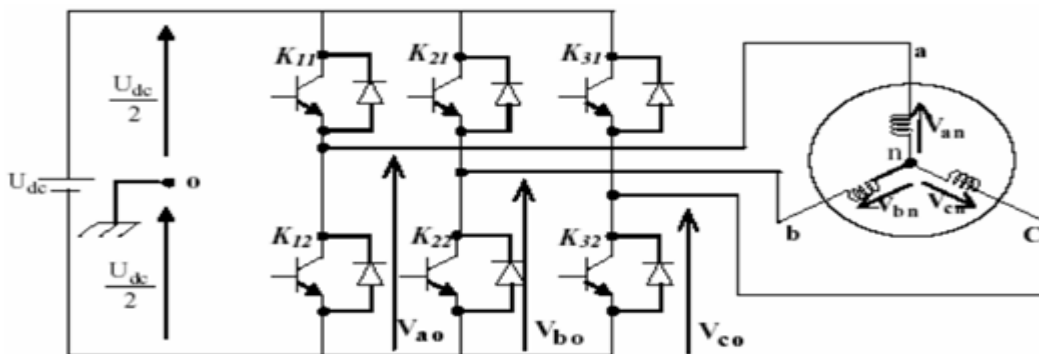


Figure II.10. Schéma d'une onduleur de tension

Les tension composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} , sont obtenues à partir de ces relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{array} \right. \quad (II.24)$$

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tension continues.

Elles sont référencées par rapport à un pont milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao}=V_{an}+V_{no} \\ V_{bo}=V_{bn}+V_{no} \\ V_{co}=V_{cn}+V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

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

V_{no} est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o »

Du système $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$ équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.26})$$

La substitution de (II.25) en (II.26) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.27})$$

En remplaçant (II.27) dans (II.25) ; on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

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

$$[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{dc}] \quad (\text{II.29})$$

Tel que :

$$\begin{cases} [V_{AC}] = [V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]^T \\ [V_{dc}] = [V_{ao}, V_{bo}, V_{co}]^T \\ [V_{dc}] = U_{dc} [S_1, S_2, S_3]^T \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0) \{i=1,2,3\}$.

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion)

➤ **Le principe de la commande MLI**

Le principe de fonctionnement de la MLI consiste à comparer un signal triangulaire (porteuse) avec une onde généralement sinusoïdale appelée modulatrice (figure II.11).

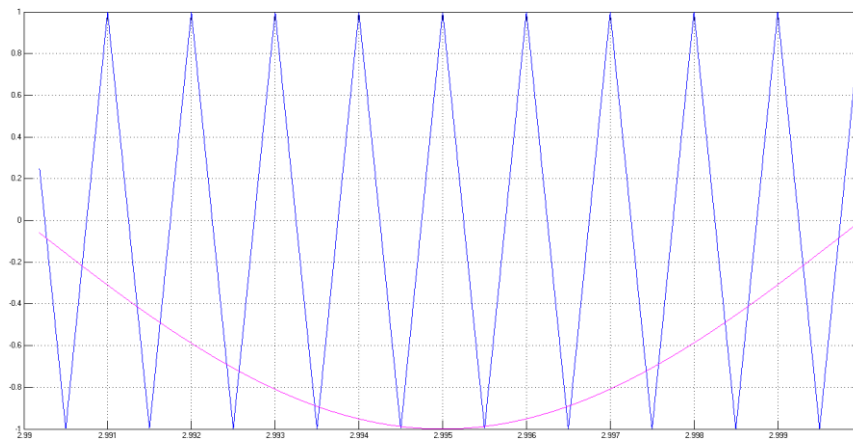


Figure II.11 comparaison du porteuse avec le modulatrice

A chaque interaction des deux signaux, la commande électrique envoie un ordre d'allumage ou d'extinction aux transistors constituant une phase d'onduleur qui produit le signal MLI

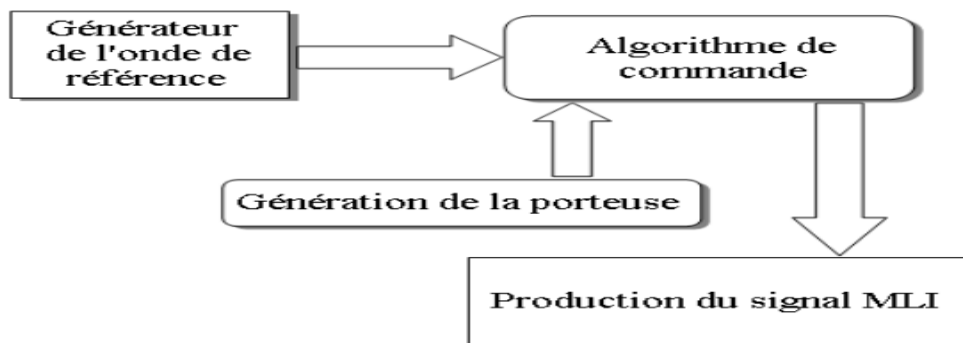


Figure II.12.Principe de la commande MLI triangulo-sinusoïdale

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres : l'indice de modulation m , et le taux de modulation R tel que :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}}, \quad R = \frac{V_{mref}}{V_m} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

f_p : fréquences de modulation ;

f_{ref} : fréquences de référence ;

V_{mref} : amplitude de la tension de référence ;

V_m : valeur de crête de l'onde de modulation ;

➤ **Equation de la porteuse:**

$$V_{pm} = -\frac{1}{2}V_m + 2V_m \frac{t}{T} ; \quad (\text{II.33})$$

➤ **Equation de la référence**

Les signaux de référence forme un système, tel que

$$\begin{aligned} V_{ref1} &= V_{mref} \sin(\omega_{ref}t) \\ V_{ref2} &= V_{mref} \sin(\omega_{ref}t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} &= V_{mref} \sin(\omega_{ref}t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{II.34})$$

Les tensions à la sortie de l'onduleur, est générée par le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

$V_{1,2,3}$: désignent les tensions de phase à la sortie de l'onduleur.

$V_{10,20,30}$: désignent les tensions simple au borne de chaque bras de l'onduleur..

II.5. Simulation et interprétation

Les paramètres de la machine sont donnés en annexe II

Schémas de simulation

La module Mathématique de la MADA nous permettons d'établir sous simulink le module suivant :

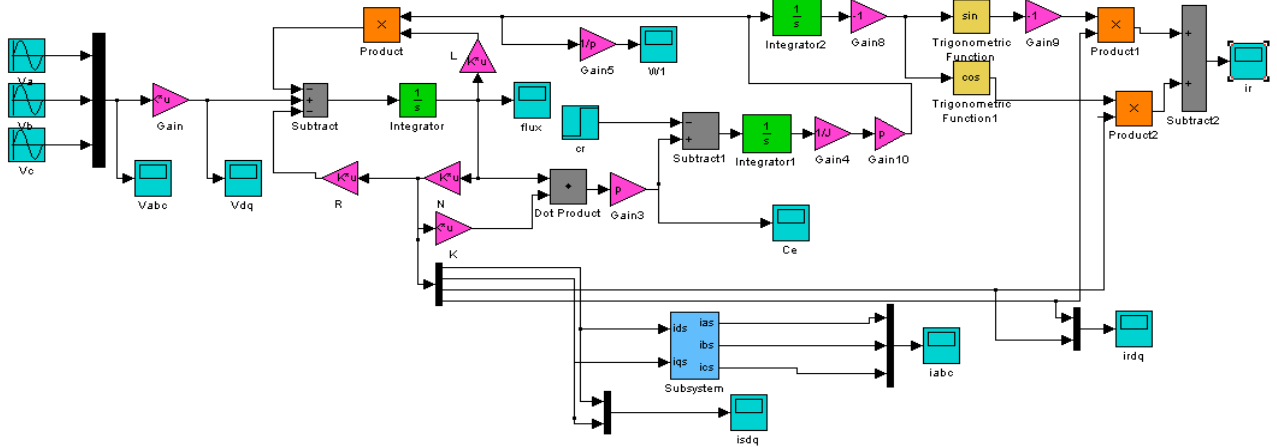


Figure II.13.Module de la MADA sous Matlab/simulink

Après avoir les différentes équations de l'onduleur contrôlé avec la modulation de largeur d'impulsion (MLI), on implémente les fig (II.14, II.15) sous Matlab/simulink

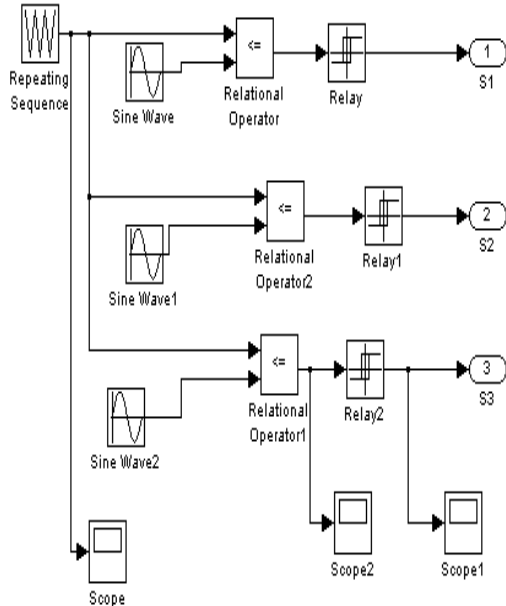


Figure II.14 L'onduleur MLI

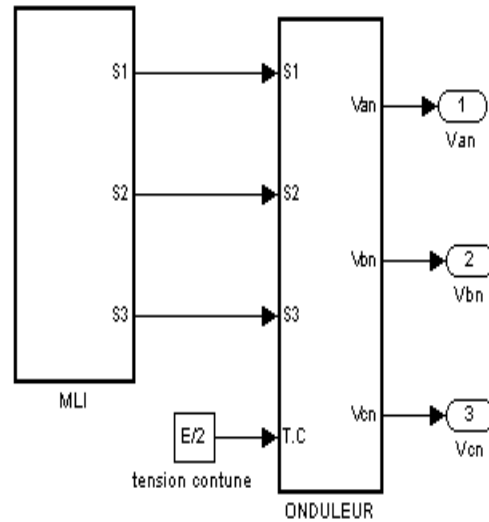


Figure II.15. Générateur des impulsions MLI

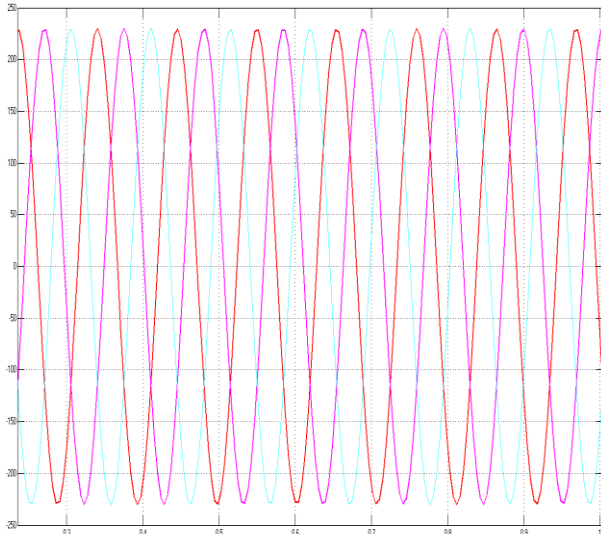


Figure II.16. Tension triphasée en repère (abc)

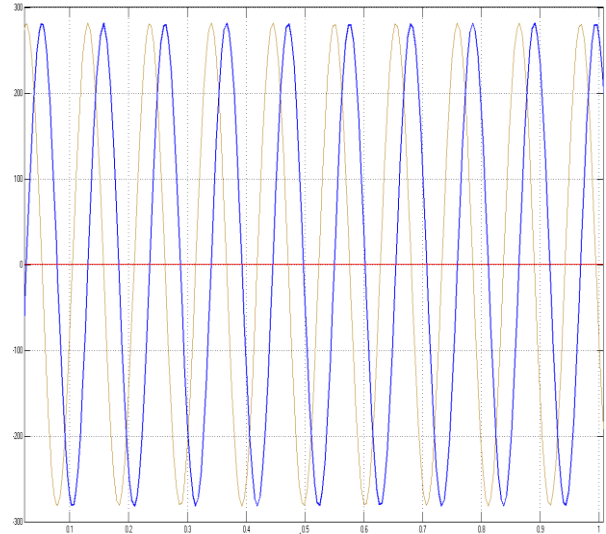


Figure II.17. Tension biphasée en repère dq

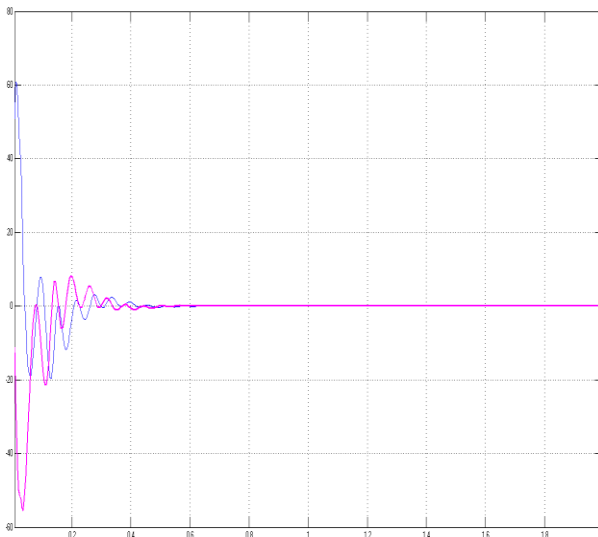


Figure II.18. Courants rotoriques dq à vide

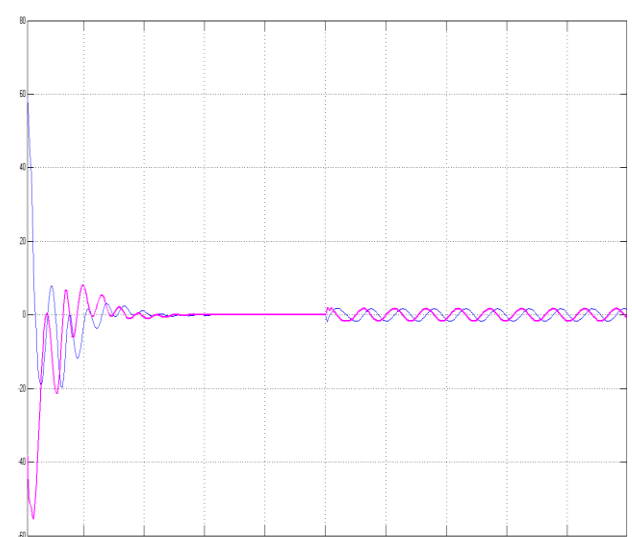


Figure II.19. Courants rotoriques en charge

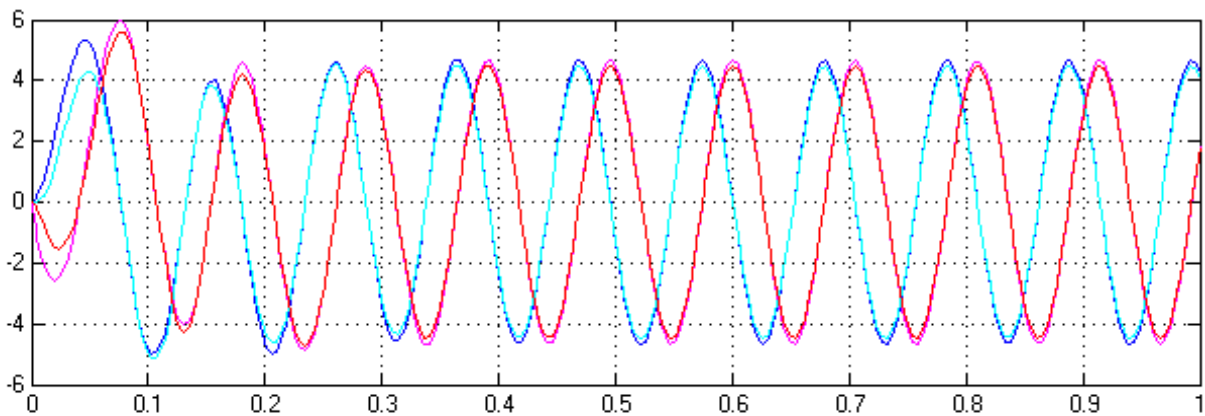


Figure II.20. Flux statorique et rotorique (dq)

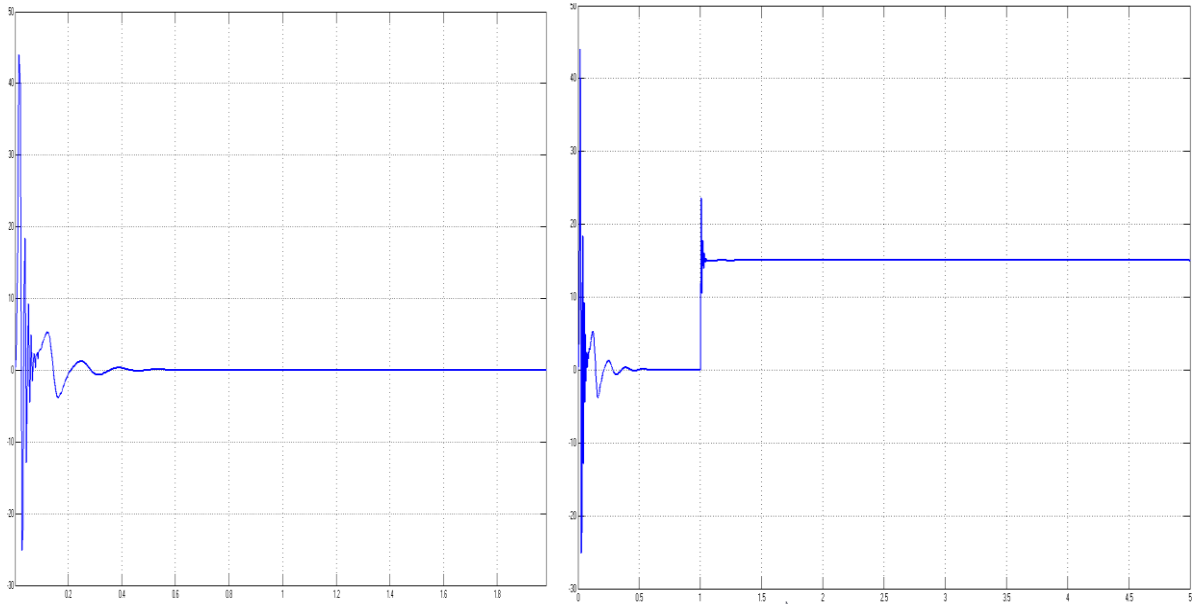


Figure II.21 Couple électromagnétique pour $Cr=0$ et $Cr=15$

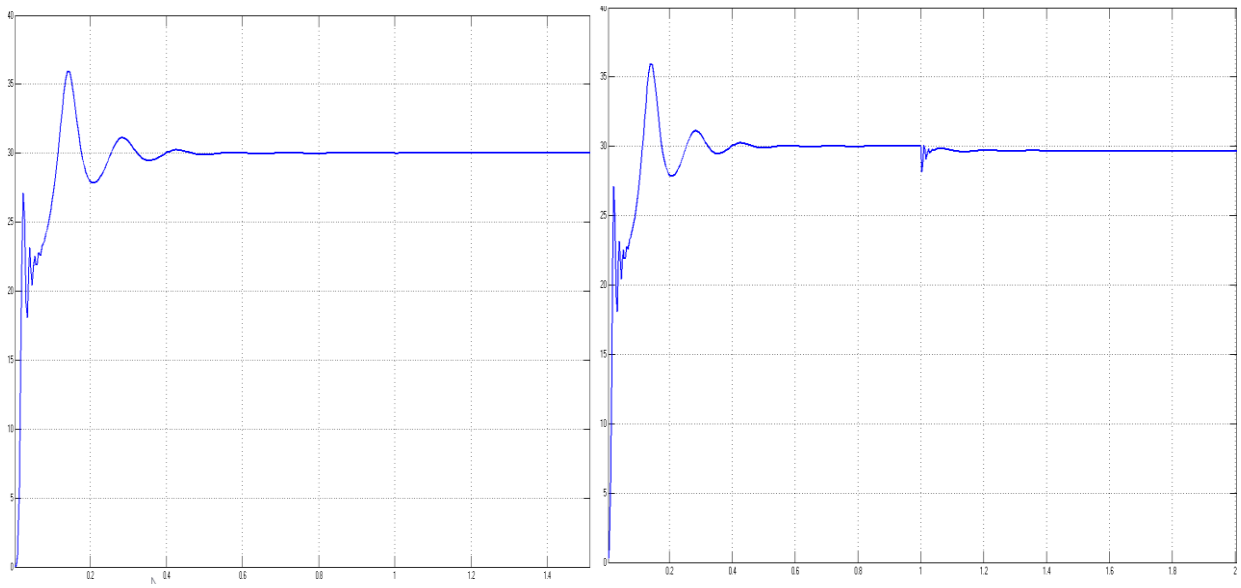


Figure II.22. Vitesse angulaire pour $Cr=0$ et $Cr=15$

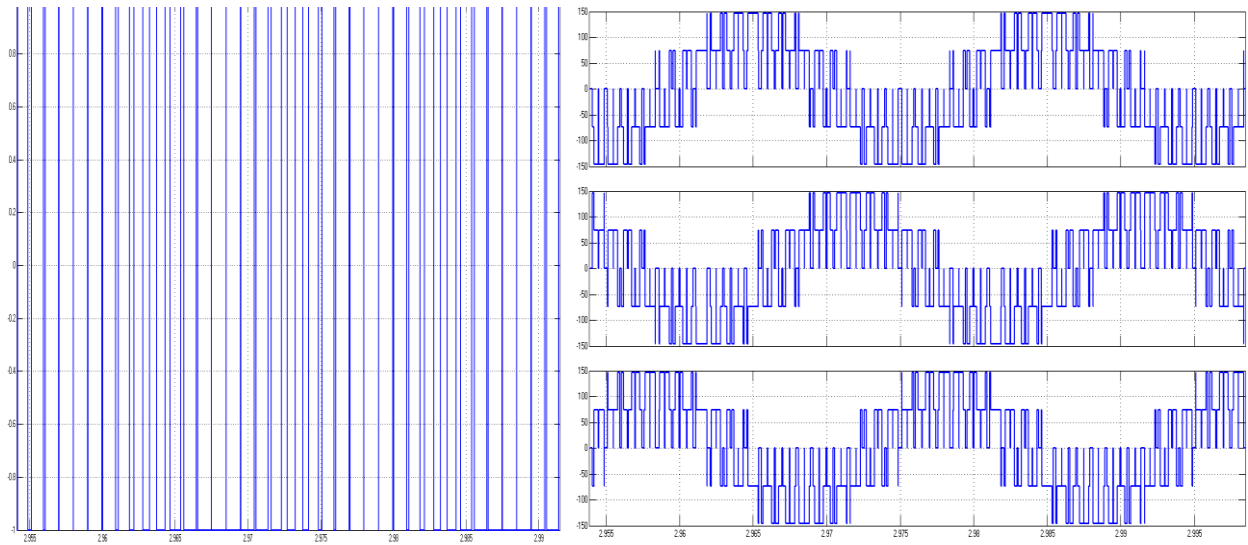


Figure II.23 Les impulsions MLI **Figure 24** : Les tensions à la sortie de l'onduleur

Interprétations

- Les simulations présentées dans les figures (**II.15 et II.16**) montrent les formes d'onde avant et après l'application de la transformation de Park, il est tout clair que la tension triphasé (abc) est transformé en biphasé (dq)
- A vide les courants rotoriques (**Fig II.18**) à atteignent des amplitudes importantes durant le régime transitoire puis se stabilisent autour d'une valeur proche de zéro
- Les courants rotoriques (**Fig II.19**) passent par trois phases lorsqu'ils sont en charge :
 - Au démarrage l'amplitude s'augmente, puis il connu des petites variations autour de 0.
 - Après un certain temps les courants rotoriques s'annulent
 - A $t=1$ c'est le temps qu'on applique une charge, les courants rotorique varient à nouveau
 - autour de 0

Alors il y a un fort appel du courant, certes bref, mais important, ce qu'illustre la phénomène de démarrage du moteur asynchrone à double alimentation.

Le couple électromagnétique (**fig II.21**), lui aussi connaît des ondulations élevés lors du démarrage puis il s'annule si le couple résistant est nul. Cependant lorsque on applique une charge le couple électromagnétique augmente et stabilise à une valeur constante.

Après le moment de démarrage, la vitesse rotorique (**figure II.22**) reste stable à vide, et lorsqu'on applique une charge celui-ci se diminue.

La figure (**II.24**), représente la tension à la sortie de l'onduleur, C'est une tension alternative variant entre ± 60 V, avec une période de 20 ms (50 Hz).

On déduit que Pour le fonctionnement en charge de la génératrice, les résultats de la simulation enregistrés montrent la délicatesse de la modélisation de la MADA, en outre, les différentes figures, certifient la présence de plusieurs modulations (oscillations) en régime permanent due à la mauvaise estimation de la position de l'angle de charge.

II.6. Synthèse

Dans ce chapitre, on a rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (abc). Ce modèle est non linéaire et fortement couplé.

Pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park. Le module dynamique de la machine écrit dans le repère de Park sous forme d'équations mathématique, a été simulé. Les résultats de simulation sont satisfaisants.

Aussi on a fait la modélisation de l'onduleur de structure Scherbius avec la commande MLI, afin d'ajuster la fréquence du courants produits de l'éolienne à celle de réseau électrique auquel elle raccordée (50 Hz) pour notre cas.

Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité.

On remarque également que le modèle de la machine met évidence le couplage indésirable existant entre les axes d et q . L'élimination de ce couplage passe par la commande vectorielle à flux orienté; cela sera étudié dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Commande vectorielle indirecte de la MADA

III.1 Intruduction

Les qualités de la machine à courant continu, résumées essentiellement dans le découplage naturel entre le flux et le couple, en fait de cette machine et pendant long temps, le meilleur moyen utilisé dans les entrainements électrique à vitesse variable.

Cependant, la présence du collecteur mécanique dont est dotée la machine à courant continu limite son emploi à des domaines où la vitesse et la puissance sont relativement réduites. Cette limitation a contraint les chercheurs à la remplacer par la machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné. En effet, la machine à induction est de construction simple, robuste, supporte les surcharges et nécessite peu d'entretien, qualités que ne possède pas la machine à courant continu. En revanche, la commande de la machine à induction est difficile. Cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants imposés dans les enroulements du stator et les courants induits dans le rotor. Par conséquent, toute variation du couple induite par augmentation ou diminution du courant statorique se traduit aussi par une évolution du flux induit dans le rotor. Donc pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux [18]

Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle. Cette dernière à été proposés en 1971 par Blashke [18], Elle consiste à séparer la commande du flux de celle de la coule en orientant le flux selon l'axe directe du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

III.2.Principe du contrôle vectoriel à flux orienté

Le principe du contrôle vectoriel permet donc de modéliser la machine asynchrone comme une machine à courant continu, c'est -à-dire réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée. A cet effet ,il est nécessaire d'orienter le flux en quadrature avec le couple, On décompose donc le courant statorique en deux composante i_{ds} , et i_{qs} de telle sorte que i_{ds} , soit orienté suivant l'axe du flux rotorique à flux rotorique constate, le couple dépend uniquement du courants i_{qs} .

Il utile de rappeler que le découplage peut être réalisé par orientation du flux statorique ou du flux d'entrefier ou du flux rotorique

III.2.1 Modalisation du control vectoriel

Dans le cas d'une éolienne la **Mada** sera utilisée en mode génératrice donc nous allons intéresser au contrôle des puissances actives et réactives de la machine avec l'orientation du flux statorique suivant (d,q)[8].

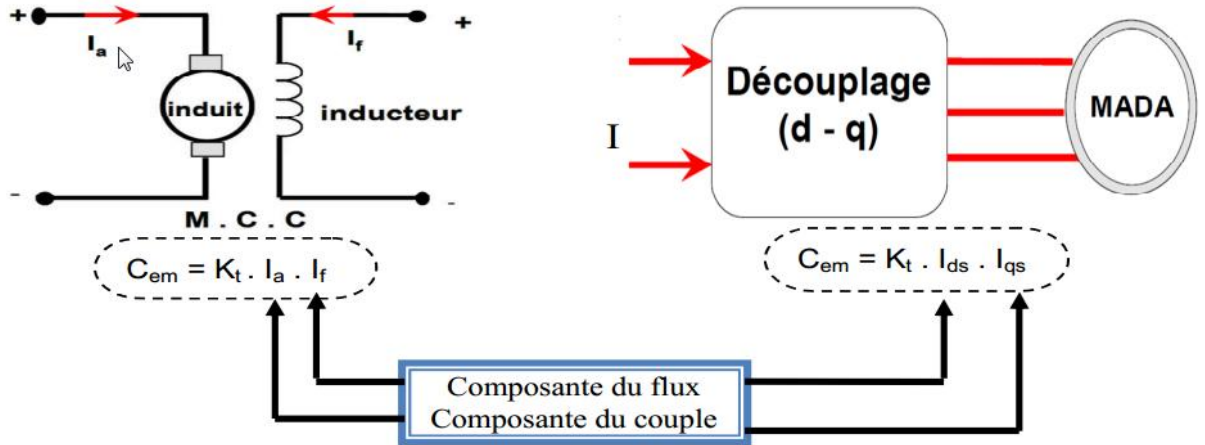


Figure III.1 Principe de la commande vectorielle

$$\varphi_{qs} = 0 \tag{III.1}$$

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \tag{III.2}$$

$$\varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \tag{III.3}$$

$$0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \tag{III.4}$$

L'équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} i_{qr} \tag{III.5}$$

Dans l'hypothèse où le réseau connecté au stator est stable, ceci conduit à un flux statorique constant ; en appliquant cette hypothèse à l'équation (III.7,6) on remarque que le couple électromagnétique produit par la machine dépend uniquement du courant rotorique de l'axe q. De plus si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statorique se réduisent à [8] :

$$V_{ds} = 0 \tag{III.6}$$

$$V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \tag{III.7}$$

A l'aide de l'équation (III.6) on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{III.8})$$

$$i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (\text{III.9})$$

Les puissances actives et réactive statorique d'une machine asynchrone s'écrivent comme suit :

$$P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \quad (\text{III.10})$$

$$Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \quad (\text{III.11})$$

En appliquant les hypothèses simplificatrices à l'équation (III.10 et III.11) ;on obtient :

$$P_s = V_s i_{qs} \quad (\text{III.12})$$

$$Q_s = V_s i_{ds} \quad (\text{III.13})$$

En remplaçant i_{qs} et i_{ds} par leurs expressions(III.8) dans l'équation (III.7) on obtient :

$$P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (\text{III.14})$$

$$Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{III.15})$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$ l'expression de la puissance réactive Qs devient alors :

$$Q_s = V_s^2 \frac{1}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{III.16})$$

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotorique qui seront appliqués à la machine.

$$\varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \quad (\text{III.17})$$

$$\varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \quad (\text{III.18})$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (III.16) par leurs expressions dans l'équation (III.7,III.6),on obtient régime permanent :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ V_{qr} &= R_r i_{qr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machines pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes

en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Le but premier d'un système éolien est de produire de l'énergie électrique pour la fournir au réseau de manière la plus constante possible. Ainsi, le générateur doit produire toute la puissance maximale qu'il est possible d'extraire du vent, puissance qui est déterminée en permanence en fonction de la vitesse du vent

III.2.2 Synthèse du régulateur classique utilisé

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de générateur éolien.

la fonction de transfert de la régulateur PI est de la forme $K_p + \frac{K_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs P et I.

Nous avons donc un système bouclé et corrigé par le régulateur PI :

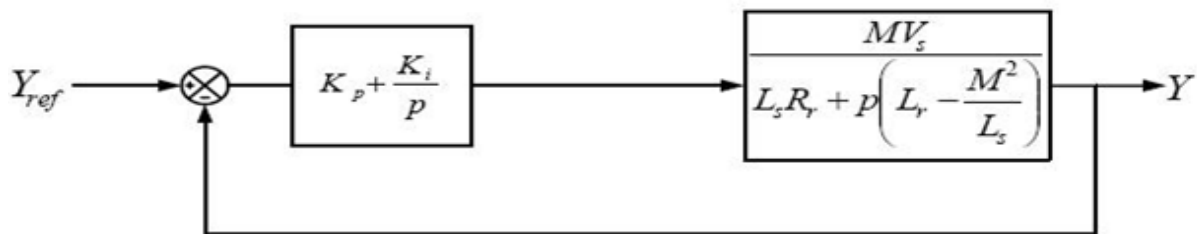


Figure III.2 Système réglé par un régulateur PI

La Fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI s'écrit alors :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III.21})$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse du régulateur

Ainsi nous aurons l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III.22})$$

Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défailante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte celle-ci devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{MV_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (III.23)$$

En boucle fermée nous aurons :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad (III.24)$$

avec

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (III.25)$$

Les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine comme suit :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad (III.26)$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r L_s}{MV_s}$$

Les équation (III.14),(III.15) et (III.20) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler :

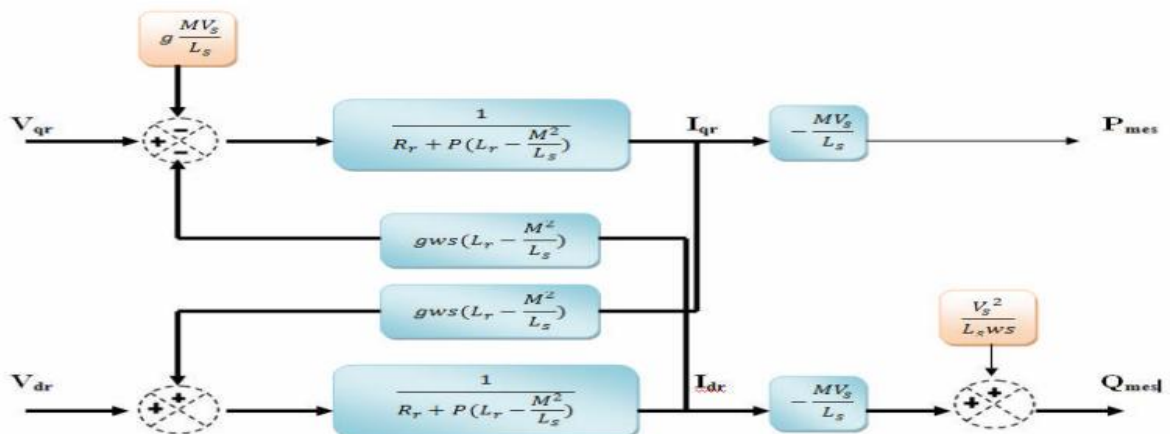


Figure III.3 Schéma bloc de la MADA

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

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine :

III.2.3 Commande vectorielle directe

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances Actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. Le schéma bloc de cette commande est présenté à la (figure.III.4)

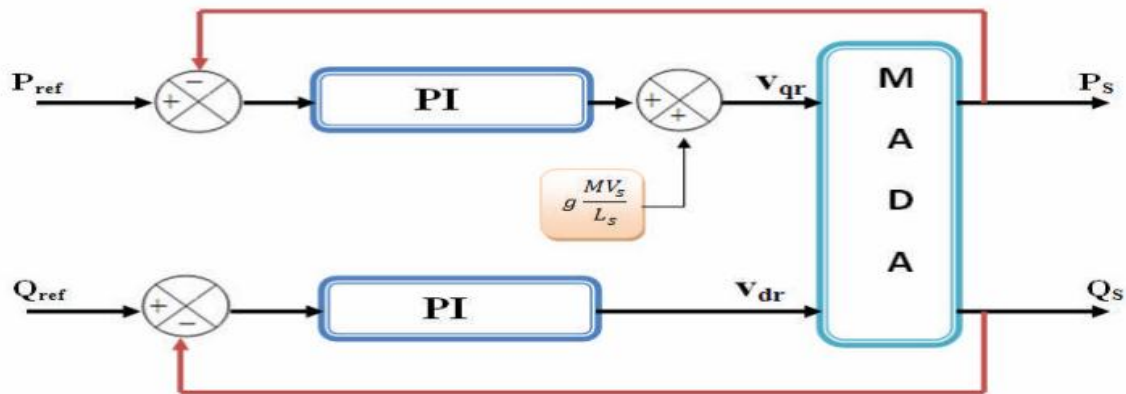


Figure III.4 Schéma bloc de la commande vectorielle directe

III.2.4 Commande vectorielle indirecte

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

Pour obtenir une bonne stabilité du système, on introduit une boucle de régulation des courants rotorique suivant la figure(III.5) dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine et une boucle de régulation en puissance indépendante, tout en compensant les termes des perturbations.

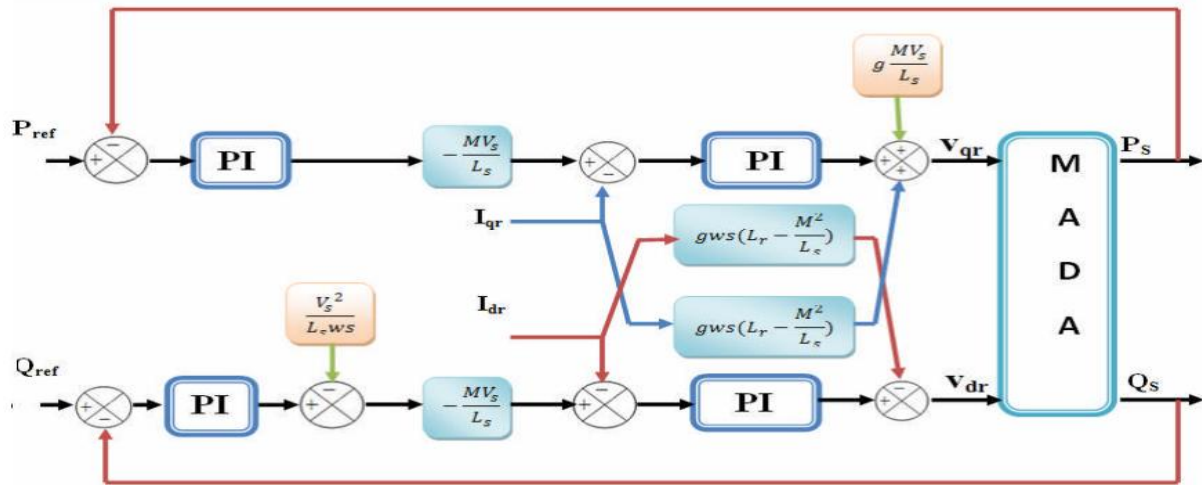


Figure III.5 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte

L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance rotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Le régulateur utilisé pour commander la MADA en génératrice est un régulateur de type proportionnel-intégral (PI) qui permet d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système.

III.2.5 Régulation par la logique floue.

Un contrôleur flou ne demande pas de modèle du système à régler. Les algorithmes de réglage se basent sur des règles linguistiques de la forme : SI... Alors... .

En fait, ces règles peuvent être exprimées en utilisant le langage de tous les jours et la connaissance intuitive d'un opérateur humain. Ce qui conduit à deux avantages :

- Les opérateurs peuvent aisément interpréter les effets ou conséquence de chaque règle.
- Les contrôleurs flou restent clairs pour tous les opérateurs et utilisateurs de la machine.

III.2.6 Commande vectorielle de la machine asynchrone par logique floue

D'après la commande vectorielle étudiée dans le paragraphe précédent par régulateur PI, on veut remplacer les quatre régulatrices par PI par deux régulateurs Flous. Afin de déterminer les performances du régulateur flou, voir figure (III.6)

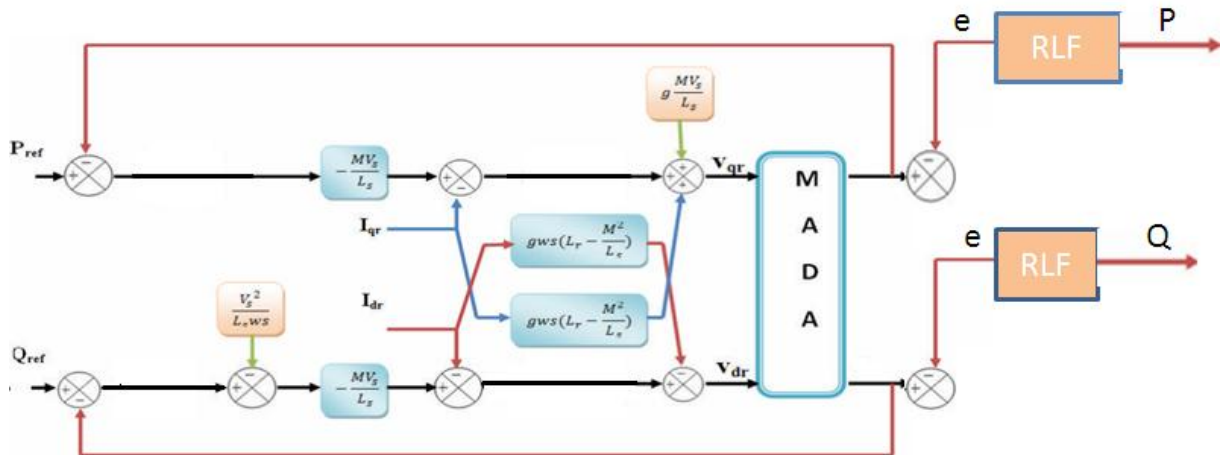


Figure.III.6 : Régulation par le contrôleur Flou

La commande par logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles, il est possible de tenir compte des expériences acquises par les opérateurs d'un processus technique [19].

Généralement le traitement d'un problème par la logique floue se fait en trois étapes :

- **Fuzzification** : L'opération de fuzzification permet de passer du domaine réel au domaine flou . Elle consiste à déterminer le degré d'appartenance d'une valeur à un ensemble flou.
- **Inférence** : Donne la relation qu'il existe entre les variables d'entrée (exprimée comme variables linguistiques) et la variable de sortie (également exprimé comme variable linguistique).

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit «Madmani».

- **Défuzzification** : A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer de «monde flou »au « monde réel », c'est Défuzzification.

La figure ci-dessous montre les étapes d'un régulateur par logique floue.

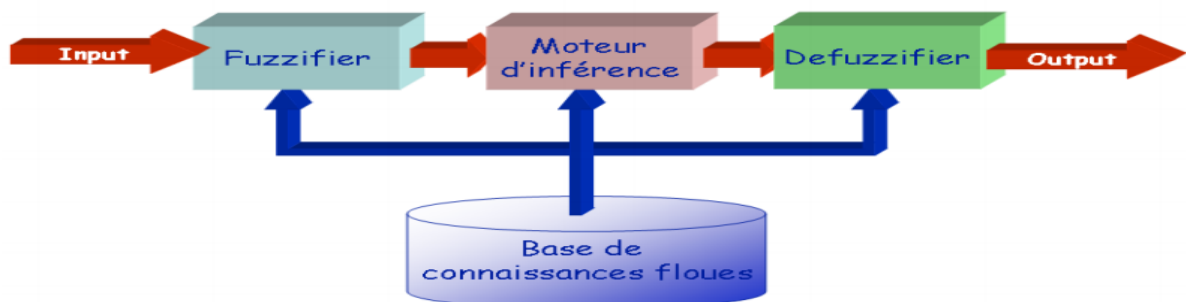


Figure.III.7 Illustration des étapes internes de la régulation floue

(Voir ANNEXE III)

III.3. Simulation et interprétation

➤ Les résultats pour le Régulateur PI

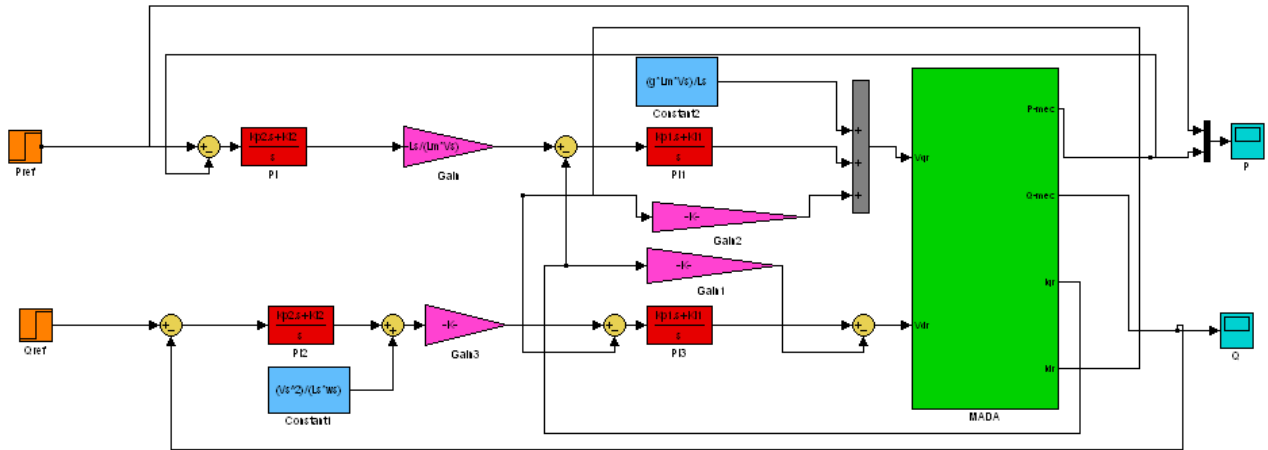


Figure III.8 Schéma de la commande de la MADA avec régulateur PI dans un Environnement MATLAB/SIMULINK

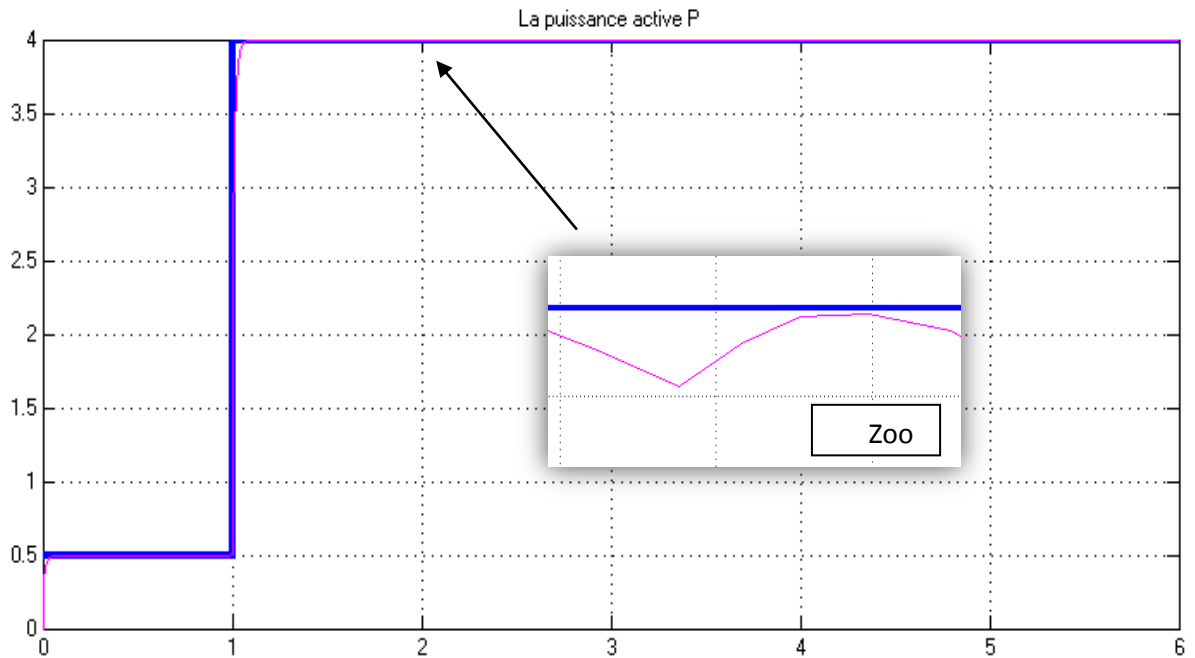


Figure. III.9 La Puissance Active de la MADA

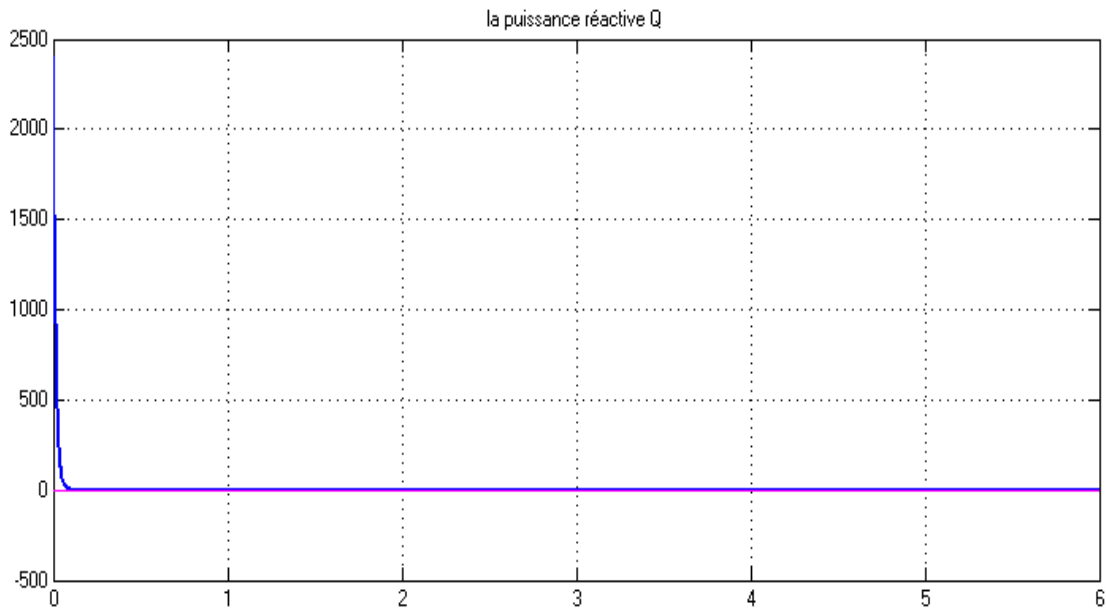


Figure III.10 La Puissance réactive de la MADA

On remarque que la puissance active (**fig III.9**) du système suit les échelons de référence, mais le signal présente des oscillations se qui montre l'apparition des perturbations au niveau du système.

La puissance réactive connaît un dépassement au démarrage puis se stabilise à zéro.

Alors on déduit que le régulateur PI n'est pas performant pour contrôler les puissances actives et réactives, et aussi demande des calculs profonds et complexe ce que nous a conduit à chercher d'outre outil plus efficace et facile à mettre en place, alors notre choix il a fait pour les contrôleurs de la logique floue.

➤ Les résultats pour le contrôleur Flou.

Les règles utilisés dans notre cas c'est :

1. IF error is Negative THEN control is positive
2. IF error is Zero THEN control is Zero
3. IF error is Positive THEN control is Positive

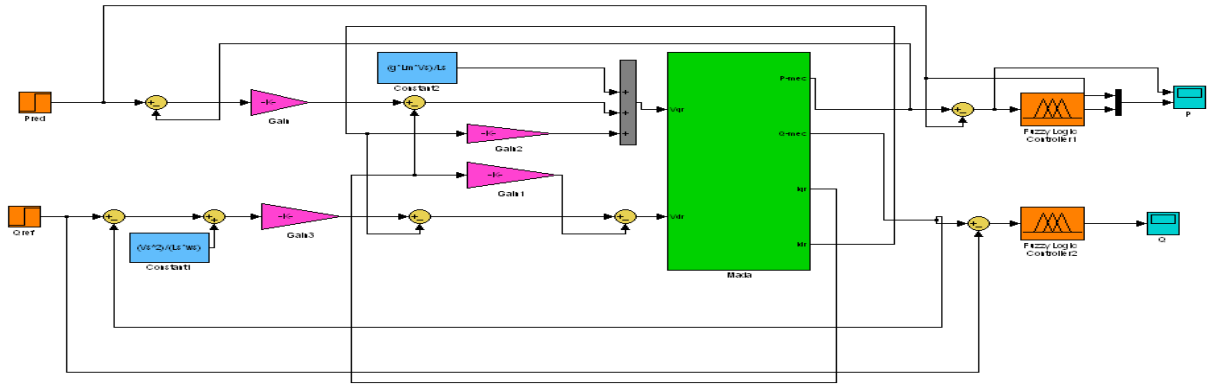


Figure III.11 Schéma de la commande de la MADA avec contrôleurs flous dans un Environnement MATLAB/SIMULINK

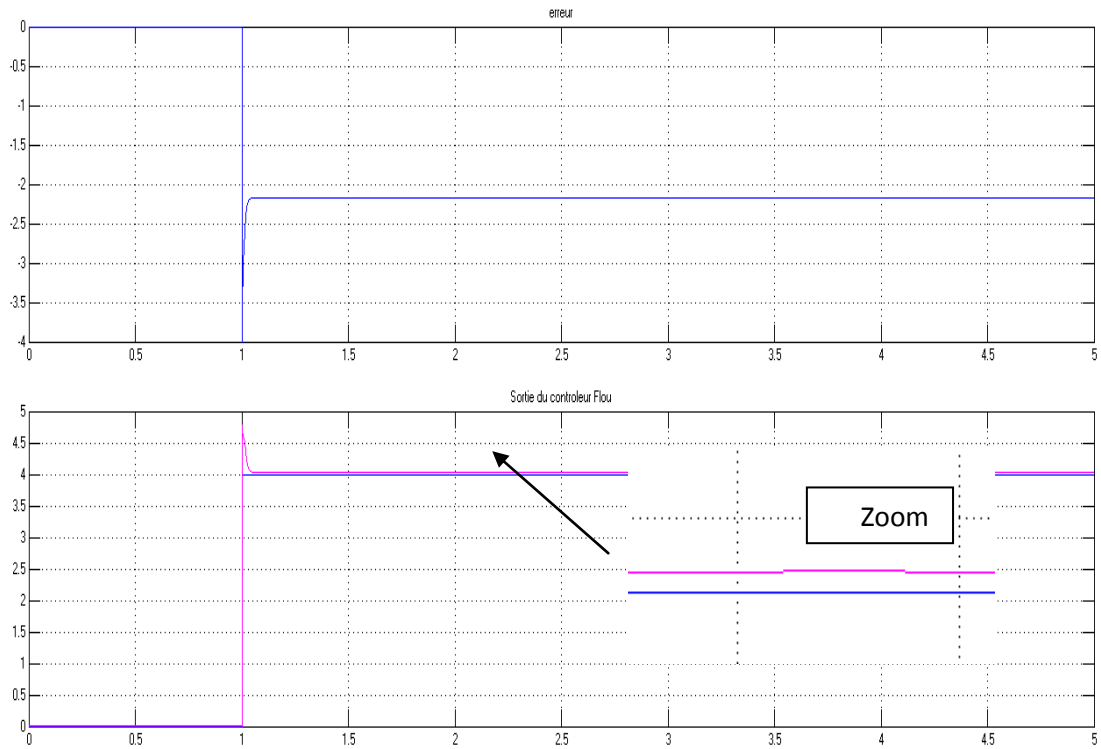


Figure III.12 La Puissance Active de la MADA

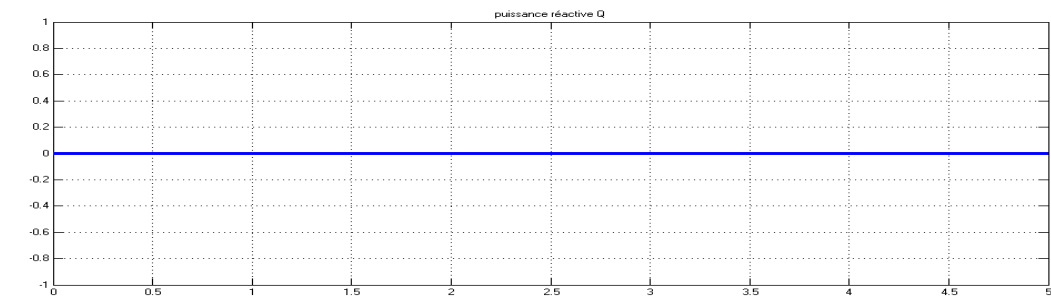


Figure III.13 La puissance réactive de la MADA

Interprétations:

On observe que les puissances active (**fig III.12**) et réactives (**fig III.13**) suivent parfaitement les consignes, ce qui nous indique un bon contrôle de la machine.

Alors Les résultats montrent que le régulateur Floue est tout à fait efficace (**fig III.13**).et il reste le plus économique (**fig III.11**) puisque on a utilisé seulement deux régulateurs Floues au lieu de quatre régulateurs PI (**figIII.8**), et plus simple à mettre en place.

En déduit qu'en termes de robustesse, la commande indirecte (**fig III.11**) avec boucle de puissance est nettement plus performante que la commande directe

Le système de contrôle pilote non seulement la fréquence mais règle aussi l'angle de phase du courant rotor, ce qui permet de faire fonctionner la machine à rendement optimale. Coté réseau, le découplage de la fréquence de l'onduleur coté (coté rotor) et de la fréquence du réseau permet de choisir, indépendamment de la phase des courants rotoriques, la phase des courants prélevés ou renvoyés au réseau c'est-à-dire la puissance réactive(Q). On peut ainsi notamment compenser la consommation de puissance réactive de la machine asynchrone, et avec ce principe de commande on peut aussi obtenir :

- une onde statorique parfaitement synchronisée sur le réseau, assurant une bonne stabilité même en présence de variations brutales de vent ;
- un dimensionnement minimal des composants électroniques permettant la variation de vitesse ;
- une augmentation de la durée de vie par rapport à un système identique à vitesse fixe.
- une compensation automatique de la puissance réactive.

III.4.Synthèse

Dans ce chapitre nous avons appliqué la loi de commande par orientation du flux rotorique pour découpler entre le flux et le couple pour le but de contrôler séparément les puissances actives et réactives fournies au réseau.

Puis, nous avons développé deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la MADA : la commande directe et la commande indirecte. Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus facile à mettre en œuvre, mais pas la plus performante et robuste.

Cependant la deuxième méthode donne des résultats satisfaisants, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant et robuste. Malgré sa complexité à mettre en œuvre, permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

La synthèse du régulateur PI, utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité, nous a permis de déterminer les constantes de temps nécessaires au choix de ces composants.

Finalement on a remplacé les quatre régulateurs PI par deux régulateurs flous, ce qui nous permet de mieux contrôler les puissances actives et réactives.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail que nous avons présenté dans ce rapport, a amené une contribution à la modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation. Pour l'utilisation éolienne, l'analyse et la synthèse des lois de commande.

Dans le premier chapitre, nous avons établi l'étude et les différents types d'éoliennes existantes, ainsi que leurs différents composants. Ensuite nous avons abordé la conception et la modélisation de la turbine éolienne qui constitue un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons entamé la mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur la transformation de PARK ;

Dans le dernier chapitre, notre objectif s'est orienté vers l'analyse et la synthèse d'une commande robuste de la MADA. Nous avons concentré notre recherche sur l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Nous avons développé ensuite le control vectoriel par orientation du flux statorique d'une machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière est réalisée avec corrélation par des puissances de références afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator et le réseau. Nous avons étudié la commande vectorielle par orientation du flux rotorique. Cette commande est utilisée avec des régulateurs PI, afin de découpler le flux et le couple pour avoir un système simple à commander. Les résultats de simulations ont permis de vérifier les performances de cette commande.

Néanmoins, les résultats de simulations obtenus ont montré que les performances dynamiques des régulateurs classiques utilisés sont insuffisantes, d'où la nécessité d'utiliser une commande plus adaptée. Il s'agit de trouver des correcteurs assurant une robustesse en stabilité ainsi que des performances acceptables. Le correcteur synthétisé doit garantir, à la grandeur régulée, une sensibilité réduite par rapport aux variations paramétriques et une bonne atténuation des bruits.

La procédure consiste à remplacer les régulateurs PI par d'autre Flou. Les résultats obtenus ont montré que ce dernier assure un meilleur rejet de perturbation, précis et facile à mettre en œuvre que celles des régulateurs classiques.

LISTES DES FIGURES

CHAPITE I

Figure I.1. Éolienne à axe verticale	9
Figure I.2. Eolienne à axe horizontale	10
Figure I.3. Les composants d'une éolienne	11
Figure I.4. La tour d'une turbine	13
Figure I.5. Schéma du système éolien	
Figure I.6. Eolien simplifié	16
Figure I.7. Puissance captée par une turbine éolienne en fonction de la vitesse	17
Figure I.8 Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse (λ) et (β)	18
Figure I.10: Caractéristiques de la puissance et du couple à la sortie de la turbine	19
Figure I.11. Schéma de la turbine éolienne	19

CHAPITRE II

Figure II.1 La connexion direct au réseau de l'éolienne avec MAS à cage	22
Figure.II.2 La connexion directe au réseau de l'éolienne avec la MS	23
Figure II.3. Génératrice hyposynchrone	24
Figure II.4. Génératrice hypersynchrone	24
Figure II.5. MADA avec contrôle du glissement par dissipation de l'énergie rotorique	25
Figure II.6. MADA structure de kramer	26
Figure II.7- Structure de Schrbius avec cycloconvertisseur	26
Figure II.8. structure de Scherbius avec convertisseurs ML	27
Figure II.9. Passage de triphasé au biphasé	30
Figure II.10 Module de la Mada	31
Figure. II.11 Comparaison du porteuse avec le modulatrice	32

Figure II.12 Principe de la commande MLI	34
Figure II.13 Générateur des impulsions MLI	36
Figure II.14 L'onduleur MLI	36
Figure II.15 Tension triphasé(abc)	37
Figure. II.16 Tension biphasé (dq)	37
Figure II.17 Courants rotoriques dq à vide	37
Figure II.18 Courants rotoriques en charge	37
Figure II.19 Flux statorique et rotorique (dq)	37
Figure II.20 Couple électromagnétique pour Cr=0 et Cr=15	38
Figure II.21 Vitesse angulaire pour Cr=0 et Cr=15	38
Figure II.22 Les impulsions MLI	339
Figure II.23 Les tensions à la sortie de l'onduleur	39

CHAPITRE III

Figure. III.1 Principe de la commande vectorielle	42
Figure III.2 Système réglé par un régulateur PI	44
Figure III.3 Schéma bloc de la MADA	45
Figure III.4 Schéma bloc de la commande vectorielle directe	46
Figure III.5 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte.....	47
Figure.III.6 : Régulation par le contrôleur Flou	48
Figure.III.7 Illustration des étapes internes de la régulation floue	48
Figure III.8 La commande de la MADA avec régulateur PI	49
Figure. III.9 La Puissance Active de la MADA.....	49
Figure III.10 La Puissance réactive de la MADA.....	50
Figure III.11 Schéma de la commande de la MADA avec contrôleurs flous d	50
Figure III.12 La Puissance Active de la MADA.....	51
Figure III.13 La puissance réactive de la MADA.....	51

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **F.Merrahi** «Alimentation et commande d'une machine asynchrone double alimentation (application à l'énergie éolienne)», Thèse de magister à l'ENP d'Alger,2007
- [2] **Http: //www.ewea.org**. Wind Energy. European Wind Energy Association
- [3] **Thomas Ackermann** «Wind Power in Power Systems, Royal Institute of Technologie Stockholm, »Sweden, 2005.
- [4] **Naouel HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Université MENTOURI de CONSTANTINE ,Faculté des Sciences de L'ingénieur, PFE magister 2008,
- [5] **Frédéric Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne »,thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003,
- [6] **J. Martin**, « Energies éoliennes », techniques de l'ingénieur, traite de génie énergétique, pp. B 8 585 1-B 8 585 21.
- [7] **MOUSSA SIDDO Abdoulaziz** « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » République Algérienne Ecole Nationale Polytechnique
- [8] **S. Elaimani** «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension», Thèse de doctorat à l'école centrale de Lille et l'université des sciences et de la technologie de Lille, 2004.
- [9] **GALI HAMZA,LOUNES KHALED** «Commande vectorielle par logique floue d'une MAS en vue d'utilisation en stockage d'énergie »Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE U.S.T.H.B, Algérie-2011
- [10] **Corinne Duboise** ,livre « guide de l'éolien,technique et pratique » Département de Génie Electrique Spécialité Electrotechnique,2007
- [11] **F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla** « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » IEEE, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 109 – 120
- [12] **TOUAL Belkacem** « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » République Algérienne Soutenu le 17/10/2010,
- [13] **Karim Belmokhtar, Mamadou Lamine Dombia** « Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique » Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie,IEEE

- [14] **H. BÜHLER**, Electronique de puissance, Traité d'électricité, d'électronique et d'électronique, vol XV, 2^{ème} édition Georgi, 1981.
- [15] **Armand BOYETTE**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » 'Thèse de doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy 2009I
- [16] **ABBAS Mourad,MECHENTEL** Mohamed, « Modélisation et commande d'une MADA Alimentée par Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne »,magister,2010 Ecole Nationale polytechnique, Algérie
- [17] **Naouel HAMDI** « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Université MENTOURI de CONSTANTINE. République Algérienne. Mémoire magister,2008
- [18] **P.Barret**, « Régime transitoire des machines électrique tournantes» Ecole supérieure d'Electricité,Eyrolles-Paris-1982.
- [19] **Rachid AZAIZIA**«Etude Et commande d'une Machine Asynchrone a Double Alimentation »,Algirie,2008
- [20] **A.Belkham et A.Daas** «Application d la logique floue à la commande en vitesse de la machine synchrone à aimant permanant», Thèse d'ingénieur à l'USTHB, 2007.
- [21] **REDJEM Radia** « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Soutenu le: 04 /07/2009, Magister ,République Algérienne,

ANNEXES