

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Commande des systèmes électriques

THÈME

**Stratégie de commande DPC appliquée à
une MADA utilisée pour la production
d'énergie éolienne**

Préparé par : HALLOUZ Mohamed
KHERCHOUCHE Abdelkader

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Y.MESSLEM	Pr	Président
T.ALLAOUI	Pr	Examineur 1
A.GOUICHICHE	MCB	Examineur 2
S.KOUADRIA	MAA	Encadreur

PROMOTION 2016 /2017

Remerciement

On tient à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonte et la patience pour réaliser ce travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements à nos parents et aux personnes qui nous ont apporté leurs aides et ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

De grands remerciements aux membres de laboratoires de génie électrique et du plasma pour leurs aides précieuses et pour le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer.

On tient à remercier nos proches et nos amis pour leurs soutiens.

Sommaire

Remerciement -----

Sommaire-----

Abréviations -----

Liste des figures -----

Liste des tableaux -----

Introduction générale

Introduction générale ----- 1

Chapitre I : généralités sur le système éolien

I.1. Introduction -----3

I.2. L'énergie éolienne Au niveau international -----4

I.3. L'énergie éolienne Au niveau national -----5

I.4. L'intérêt de l'énergie éolienne -----6

I.5. Avantage de l'éolienne -----6

I.6. Inconvénients de l'éolienne-----7

I.7. Le vent-----7

 I.7.1 Définition du vent -----7

 I.7.2 La formation du vent-----7

I.8. Présentation du système éolien-----8

I.9. Taille des aérogénérateurs :-----9

I.10. Eléments constituant l'éolienne : -----9

I.11. Principe de fonctionnement du système ----- 10

I.12. Types des éoliennes----- 10

 I.12.1 Selon la conception mécanique----- 11

 I.12.1.a Eolienne vortex----- 11

 I.12.1.b Eolienne à axe vertical ----- 11

Sommaire

I.12.1.c	Eolienne à axe horizontal -----	13
I.12.2	Selon la technologie : -----	14
I.12.2.a	Fonctionnement à vitesse fixe : -----	14
I.12.2.b	Fonctionnement à vitesse variable-----	15
I.13.	Les différentes zones de fonctionnement à vitesse variable -----	17
I.14.	Conclusion :-----	19

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1	Introduction -----	20
II.2	Modélisation de la turbine :-----	20
II.2.1.	Loi de BETZ-----	20
II.2.2.	Modèle des pales [8], [10], [11], [17], [22] :-----	21
II.2.3.	Modèle du multiplicateur de vitesse-----	22
II.2.4.	Modèle de l'arbre mécanique -----	22
II.2.5.	Modèle du vent -----	23
II.3	Stratégies de maximisation de puissance MPPT :-----	24
II.3.1.	Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse. -----	24
II.3.1.a.	Résultats de simulation : -----	25
II.3.2.	Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :-----	26
II.3.2.a.	Résultats de simulation -----	27
II.4	Machine Asynchrone à double alimentation : -----	28
II.4.1.	Principe de fonctionnement :-----	28
II.4.2.	Modes de fonctionnement :-----	29
II.4.3.	Modèle de la machine asynchrone à double alimentation : -----	30
II.4.4.	Résultant de Simulation : -----	32
II.5	Modélisation du convertisseur coté machine : -----	33
II.5.1.	Commande par modulation de largeur d'impulsions sinus triangulaire(MLI) ----	34
II.6	Application de la commande vectorielle avec onduleur : -----	35

Sommaire

II.6.1.	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique : -----	35
II.6.2.	Commande vectorielle Directe-----	39
II.6.3.	Commande vectorielle indirecte -----	39
II.6.3.a.	Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance -----	39
II.6.3.b.	Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance : -----	40
II.6.3.c.	Résultats de simulation : -----	40
II.7	Modélisation du convertisseur coté réseau (CCR) :-----	42
II.7.1.	Modèle du redresseur MLI : -----	43
II.7.2.	Modélisation du bus continu :-----	43
II.7.3.	La régulation du bus continu :-----	44
II.7.4.	Contrôle des courants-----	45
II.7.5.	Résultats de simulation : -----	45
II.8	Résultats de simulation de la chaine complète et interprétation : -----	46
II.9	Conclusion :-----	48

Chapitre III : Commande directe des puissances

III.1	Introduction -----	49
III.2	Principe général de la commande DPC : -----	49
III.3	DPC appliquée au convertisseur côté réseau : -----	50
III.3.1	Principe -----	50
III.3.2	Les régulateurs à hystérésis :-----	51
III.3.3	L'estimation des puissances : -----	52
III.3.3.a	Calcul des puissances par mesure des tensions et des courants :-----	52
III.3.3.b	Calcul des puissances par estimation de tension :-----	52
III.3.3.c	Calcul des puissances par estimation du flux virtuel :-----	53
III.3.4	L'analyse de la variation de la puissance : -----	54
III.3.5	Elaboration de la table de commutation :-----	56
III.3.6	Résultat de simulation : -----	57

Sommaire

III.4	DPC appliquée au convertisseur côté machine :-----	58
III.4.1	Avantage de la DPC côté machine :-----	59
III.4.2	L'estimation de la puissance :-----	59
III.4.3	Choix du comparateur à hystérésis -----	61
III.4.4	Effet des vecteurs de tension du rotor sur les puissances :-----	61
III.4.5	Elaboration de la table de commutation :-----	62
III.4.6	Résultat de simulation : -----	63
III.5	Résultats de la chaine complète avec la commande DPC : -----	65
III.6	Conclusion :-----	67
	Conclusion générale:-----	69
	Bibliographie:-----	70
	Annexe A :-----	73
	Annexe B :-----	74
	Annexe C :-----	76

Abréviations

- V : La vitesse du vent nominale de l'aérogénérateur.
- β : L'angle d'orientation de pale.
- ρ : Masse volumique de l'air.
- R : Rayon de la surface balayée par la turbine.
- S : La surface balayée par la turbine.
- P_{aero} : La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
- P_v : La puissance de la masse d'air.
- C_p : Le coefficient de puissance.
- λ : La vitesse relative de l'éolienne.
- λ_{opt} : La vitesse relative optimale de l'éolienne.
- Ω_{tur} : Vitesse de rotation de la turbine.
- Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
- G : Gain du multiplicateur.
- C_g : Couple résistant issue du multiplicateur.
- P_s : Puissance active statorique.
- P_r : Puissance active rotorique.
- C_{aer} : Couple aérodynamique de l'éolienne.
- C_{vis} : Couple des frottements visqueux.
- C_{em} : Couple électromagnétique.
- $C_{em,r}$: Couple électromagnétique de référence.
- C_{mec} : couple mécanique.
- $C_{t,est}$: Couple de la turbine estimé.
- f : Coefficient de frottement visqueux de l'arbre
- J_t : Inertie de la turbine.
- g : Glissement.
- $[V_{dqs}]$: Tensions biphasées au stator de la machine.
- $[V_{dqr}]$: Tensions biphasées au rotor de la machine.
- $[i_{dqs}]$: Courants statoriques.

Abréviations

- $[i_{dqr}]$: Courants rotoriques.
- $[\phi_{dqs}]$: Flux statoriques.
- $[\phi_{dqr}]$: Flux rotoriques.
- Ψ_s : module du flux statorique
- Ψ_r : module du flux rotorique
- $[e_{abc}]$: les tensions du réseau
- $[i_{abc}]$: les courants du réseau
- R_s : Résistance des enroulements statoriques.
- R_r : Résistance des enroulements rotoriques.
- L_s : inductance cyclique du stator.
- L_r : inductance cyclique du rotor.
- M_{sr} : Matrice inductance mutuelle stator-rotor
- P : nombre de paires de pôles de la machine.
- F : le coefficient de frottement visqueux de la machine en $(N.m.s/rad)$.
- C_{em} : le couple électromagnétique en $(N.m)$.
- C_r : le couple résistant en $(N.m)$.
- $[P]$: Matrice de Park.
- θ : est l'angle entre l'axe statorique a_s et l'axe rotorique.
- θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique a_r , et l'axe de Park directe.
- θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a_s , et l'axe de Park directe.
- ω : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q).
- ω_r : est la vitesse angulaire électrique du rotor.
- ω_s : est la vitesse angulaire électrique du stator.
- d : indice de l'axe direct de Park.
- q : indice de l'axe en quadrature de Park.
- P_s : Puissance active.
- Q_s : Puissance réactive.
- V_p, f_p : Sont respectivement la tension et la fréquence de la porteuse de l'onduleur.

Abréviations

- i_{ond}, i_{red} : Courants modulés par le CCM et le CCR.
- i_{cond} : Courant traverse condensateur.
- U_{dc} : Tension de bus continu.
- R_f, L_f : Résistance et l'inductance de filtre RL.
- S_a, S_b, S_c : Séquence de commande du convertisseur à MLI.
- T_s : Période de commutation.
- δ : l'angle entre le flux statorique-rotorique
- S_n : Les secteurs.
- *MADA* : Machine Asynchrone à Double Alimentation.
- *Pi* : Proportionnel- Intégrateur.
- *CCM* : Convertisseur Cote rotor.
- *CCR* : Convertisseur Cote Réseau.
- *MLI* : Modulation à Large Impulsion.
- *MPPT*: maximum Power Point Tracking.
- *DPC* : commande directe de puissance.

Listes des figures

Figure I- 1 : L'énergie éolienne Au niveau international-----	4
Figure I- 2 : évolution des puissances éoliennes terrestres -----	4
Figure I- 3: L'énergie éolienne Au niveau national -----	5
Figure I- 4: La formation du vent -----	8
Figure I- 5: Conversion de l'énergie cinétique du vent.-----	8
Figure I- 6: Eoliennes passées et présentes -----	9
Figure I- 7: Composantes du l'éolienne -----	10
Figure I- 8: Eolienne vortex -----	11
Figure I- 9: Eolienne à axe vertical -----	12
Figure I- 10 : Turbine type Savonius -----	12
Figure I- 11: Turbine type Darrieus -----	13
Figure I- 12: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes-----	14
Figure I- 13: fonctionnement à vitesse fixe-----	15
Figure I- 14 : La configuration avec l'utilisation de machine pilotée par le stator -----	15
Figure I- 15: La configuration avec l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation.	16
Figure I- 16: fonctionnement à vitesse variable -----	17
Figure I- 17: les zones de fonctionnement à vitesse variable -----	18
Figure II- 1 : Système de conversion éolienne à base de la MADA.	20
Figure II- 2 : Turbine éolienne.....	20
Figure II- 3 : Principe de théorie de loi BETZ.	21
Figure II- 4 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse et l'angle d'orientation des pales	22
Figure II- 5 : Modèle de l'arbre mécanique.	23
Figure II- 6 : Schéma bloc du modèle du convertisseur éolienne	23
Figure II- 7 : Stratégies de commande de la turbine.	24
Figure II- 8 : Stratégie MPPT sans Asservissement de la vitesse	25
Figure II- 9 : Résultats du MPPT sans asservissement de vitesse.	26
Figure II- 10 : Stratégie MPPT avec Asservissement de la vitesse.	27
Figure II- 11 : Résultats du MPPT avec asservissement de vitesse.	28
Figure II- 12 : Modes de fonctionnement de la MADA	29
Figure II- 13 : Passage de triphasé au biphasé	30
Figure II- 14 : Comportement de la MADA en boucle ouverte.....	33

Liste des figures

Figure II- 15 : onduleur triphasée associé à la machine.....	33
Figure II- 16 : Modulation sinus triangulaire.....	35
Figure II- 17 : Commande vectorielle de la MADA.....	35
Figure II- 18: Orientation du flux statorique.....	36
Figure II- 19 : Schéma bloc de la MADA à réguler.....	38
Figure II- 20 : Schéma bloc de la commande vectorielle directe.....	39
Figure II- 21 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.....	39
Figure II- 22 : Schéma bloc de la Commande indirecte avec boucle de puissance	40
Figure II- 23 : Commande indirecte avec boucle de puissance sous MATLAB	40
Figure II- 24 : résultats de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance	42
Figure II- 25 : représentation du convertisseur côté réseau	42
Figure II- 26 : Schéma bloc du bus continu	44
Figure II- 27 : Schéma de régulation du bus continu.....	44
Figure II- 28 : Schéma bloc du redresseur sous MATLAB	44
Figure II- 29 : résultats de simulation du convertisseur coté réseau.....	46
Figure II- 30 : résultats de la chaine complète	48
Figure III- 1: Schéma global du système éolien avec commande DPC.....	50
Figure III- 2: Schéma de la Commande DPC côté réseau	50
Figure III- 3: Représentation des secteurs.....	51
Figure III- 4: Comparateurs à hystérésis.....	51
Figure III- 5: Comportement du convertisseur MLI (CCR)	58
Figure III- 6: Schéma de la commande DPC côté machine.....	59
Figure III- 7 : La décomposition du flux rotorique dans le plans α, β	60
Figure III- 8 : Régulateurs à hystérésis utilisés pour la DPC côté machine.....	61
Figure III- 9 : Vecteurs de commande du CCM	62
Figure III- 10 : résultats de de commande directe des puissances appliquée au CCM.....	65
Figure III- 11 : Résultats de simulation de la chaine complète.....	67

Liste des Tableaux

Tableau I- 1: taille des éolienne-----	9
Tableau I- 2 : Différentes éoliennes utilisées-----	19
Tableau III- 1 : Valeurs de tension du convertisseur coté réseau -----	56
Tableau III- 2 : Vecteur de commande appliqué au convertisseur pour un secteur K-----	56
Tableau III- 3 : Table de commutation de la commande DPC-----	56
Tableau III- 4 : Vecteur de commande appliqué au convertisseur pour un secteur K-----	62
Tableau III- 5 : table de commutation pour la DPC côté machine -----	63

Introduction générale

Depuis sa création dans les profondeurs de l'histoire humaine, l'homme n'a jamais cessé d'apporter certaines améliorations à son mode de vie, et grâce à sa faculté de chercheur, il avait escaladé l'échelle de certain mystère pour donner à la vie une forme plus naturelle que possible.

Autrefois, l'homme s'est toujours intéressé à la nature pour produire de l'énergie. Tout a commencé par l'utilisation des combustibles organiques pour l'éclairage et le chauffage, ensuite tout en observant les forces animales qu'il utilisait dans les terres agricoles et le vent qu'il faisait avancer les bateaux, l'homme commençait à chercher d'autres types d'énergies, ainsi, il découvrit le charbon qui grâce à ce dernier on produisait de la vapeur (énergie thermique) pour la transformer en énergie mécanique afin de déplacer des locomotives par exemple. Ensuite il y a eu la découverte du pétrole et le gaz, qui avec l'évolution de la technologie, on produisait du carburant pour tous types de véhicules et aussi de l'électricité qui est une énergie indispensable pour la vie quotidienne.

A travers le temps, la demande en énergie fossile augmentait de plus en plus afin d'accomplir les gestes du quotidien, ainsi l'homme découvrit que la surconsommation de ces énergies conduit à un problème, plus on consomme ces énergies plus le taux de rejet de déchets augmente, ce qui provoque la pollution de l'environnement et qui représente un danger pour la santé de l'homme. En plus ces énergies sont épuisables, alors, pour contourner ces problèmes, l'homme s'est tourné vers des sources d'énergies inépuisables, connues sous le nom d'énergies renouvelables ou énergie vertes, ces dernières sont issues des sources naturelles, c'est une énergie propre et durable parce qu'elle se renouvelle sans cesse, elles sont considérées comme des armes essentielles contre le réchauffement climatique contrairement aux énergies conventionnelles comme le charbon ou le pétrole. Cependant, l'énergie verte a changé notre façon de produire de l'énergie, on peut produire de l'électricité grâce aux panneaux photovoltaïques en captant les rayonnements du soleil, ou la force de l'eau qui fait tourner les turbines hydrauliques, et aussi le vent qui fait tourner les énormes éoliennes. L'énergie électrique c'est une énergie secondaire vis à vis des énergies naturelles considérées comme primaires, l'électricité fait partie de nos gestes quotidiens, tous nos appareils, instruments sont électriques, même les moyens de transport comme le train ou les avions, ou les voitures grâce aux batteries.

L'énergie éolienne qui est nôtre principale sujet d'étude est considérée comme une énergie renouvelable, elle s'inspire du principe du vieux moulin à vent pour faire tourner une génératrice pour produire du courant alternatif, les éoliennes envahissent peu à peu l'ensemble des territoires. L'énergie éolienne représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Son utilisation représente un moyen plus écologique pour produire l'énergie électrique[1], [2].

Nous devons savoir que le but global de ce mémoire est de commander un système de production d'énergie éolienne ? Et quelles sont les stratégies les plus idéales utilisées sur le système étudié ?

Dans ce cadre, le présent mémoire de Master a été effectué au sein du laboratoire de Génie Electrique et Des Plasmas LGEP (Université Ibn Khaldoun -Tiaret). Ayant pour thème : **Stratégies de Commande DPC (direct power control) appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne**, notre travail est structuré de la manière suivante :

➤ Le premier chapitre est consacré à la description et le principe de fonctionnement du système de conversion d'énergie éolienne et son évolution au niveau national et international, cependant, on a mentionné aussi les différents types d'aérogénérateurs et les différentes stratégies utilisées pour la production d'énergie éolienne.

➤ Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur la modélisation des différentes parties du système de conversion d'énergie éolienne, en commençant par la turbine de 10 KW et la stratégie de commande qui lui a été appliquée (MPPT), ensuite, la génératrice utilisée, qui est une machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 7.5 KW tout en mentionnant ses modes de fonctionnement. Deux convertisseurs sont utilisés pour contrôler l'énergie électrique. Par la suite, une commande vectorielle a été appliquée à la MADA pour le contrôle des puissances actives et réactives.

➤ Enfin, dans le troisième et dernier chapitre, nous allons parler du sujet principal de ce mémoire, la commande directe des puissances ou la commande (DPC), cette dernière va être appliquée sur les deux convertisseurs côté machine et côté réseau en se basant sur des tables de commutation établies.

➤ Le mémoire finira par une conclusion générale réunissant les conclusions de tous les chapitres précédents.

I.1. Introduction

On n'y fait pas trop attention mais les gestes du quotidien nous permettent de consommer beaucoup d'énergie, c'est pour cela que le monde fait appel aux énergies renouvelables dont l'éolienne qui est le cœur de notre sujet.

Tout commence par le moulin à vent, l'homme a très vite compris le profil qu'il pouvait tirer de la force du vent. Les premiers moulins apparaissent ainsi au 12^{ème} siècle en Europe, utilisés pour pomper l'eau, moudre les céréales, scier, ...etc. Ces machines existaient cependant dès la plus haute Antiquité déjà en Perse, en Egypte et en Chine notamment. C'est en 1888-1900 que le vrai prototype d'éolien à pale a été utilisé avec succès pour générer de l'électricité [3], il a été inventé par le scientifique américain Charles F. Brush, sa turbine mesurait 17m de diamètre constitué de 144 pales en cèdre juché sur un mât de 18 mètres, elle développe 12 kW de puissance. C'est modeste, mais suffisant pour alimenter en électricité la maison de Brush. La machine remplira sa mission jusqu'en 1900, date de l'arrivée de l'électricité dans sa ville natale [4].

Au Danemark, le météorologue **Paul La Cour** découvre que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre restreint de pales génèrent d'avantage d'électricité que celles plus lentes constituées de nombreuses pales. En 1891, il met au point des machines à 4 pales d'une puissance de 25 kW, qui font figure d'ancêtres des éoliennes actuelles.

Pendant la première moitié du 20^{ème} siècle, l'éolien est confronté à la concurrence du charbon, mais les pénuries des deux guerres mondiales permettent de maintenir cette énergie. Alors que le premier parc éolien offshore est créé en mer du Nord par le Danemark, en 1971, la crise pétrolière de 1973 ravive l'intérêt pour le grand éolien. L'Allemagne, la Suède, le Canada, le Royaume-Uni et les Etats-Unis financent des projets de recherche sur les énergies renouvelables. De nouveaux designs de machines voient le jour, ces derniers réduisent considérablement le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes.

S'il était courant d'installer des éoliennes de 55 kW (soit 75 chevaux, l'équivalent d'une petite voiture) dans les années 80, celles de 1500 à 3000 kW sont aujourd'hui la norme. Quelques machines de 7500 kW ont même été érigées. La puissance électrique des éoliennes a donc été multipliée par 100 en 25 ans. Une évolution qui permet de réduire le nombre de machines et de limiter ainsi l'impact paysager des éoliennes[5].

I.2. L'énergie éolienne au niveau international

Le parc mondial a enregistré une croissance de 17% pour atteindre une puissance totale de plus de 432'000 MW. A l'échelle des pays, c'est la Chine qui s'est développée le plus (elle représente la moitié de la progression mondiale), suivie des USA et de l'Allemagne.

En Europe, l'énergie du vent a satisfait 11,4% de la consommation de courant de l'Union Européenne.

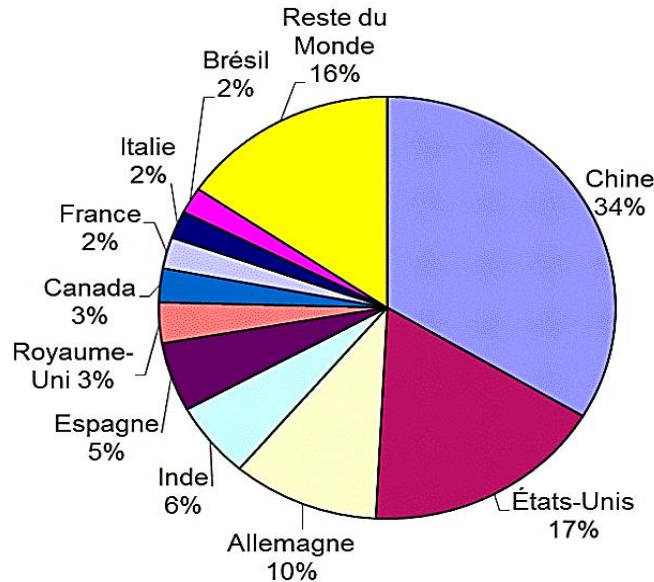


Figure I-1 : L'énergie éolienne Au niveau international

Dans le monde, le secteur éolien connaît une très forte croissance, il est ainsi l'un des plus dynamiques des énergies renouvelables.

L'énergie éolienne représente une part croissante de l'énergie fournie au réseau public d'électricité. En moyenne depuis 1997 la capacité de production éolienne installée dans le monde est de 318 GW fin 2013 et devrait augmenter de plus de 400% et atteindre 1107 GW en 2030 et 910 GW en 2025 [6].

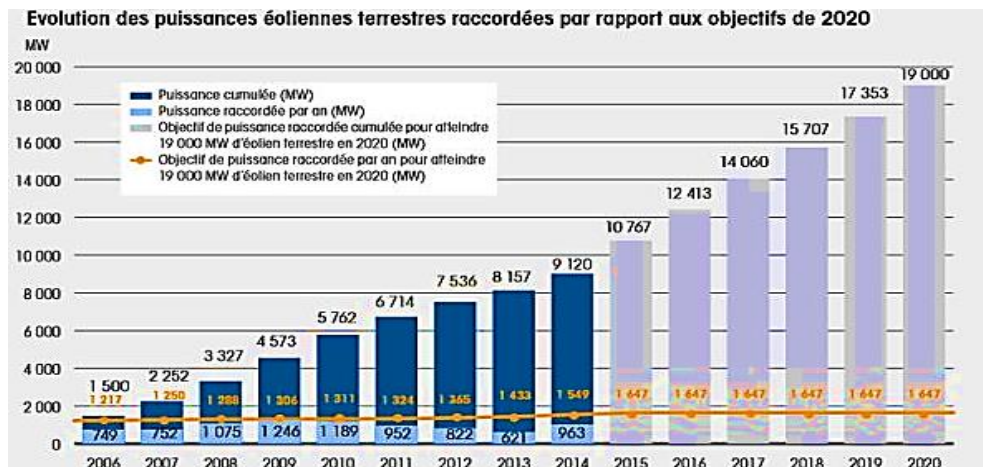


Figure I-2 : évolution des puissances éoliennes terrestres

I.3. L'énergie éolienne au niveau national

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme l'énergie solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre ceci est principalement dû à une topologie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes ; Le nord méditerranéen qui est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'Atlas tellien et saharien. Entre elles s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental, le sud quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

La carte représentée ci-dessous montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus levée que le nord particulièrement dans le sud-est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset. Concernent le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant l'existence de microclimat sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'silla et El bayadh 6 à 7 m/s et le grand sud > 8m/s.

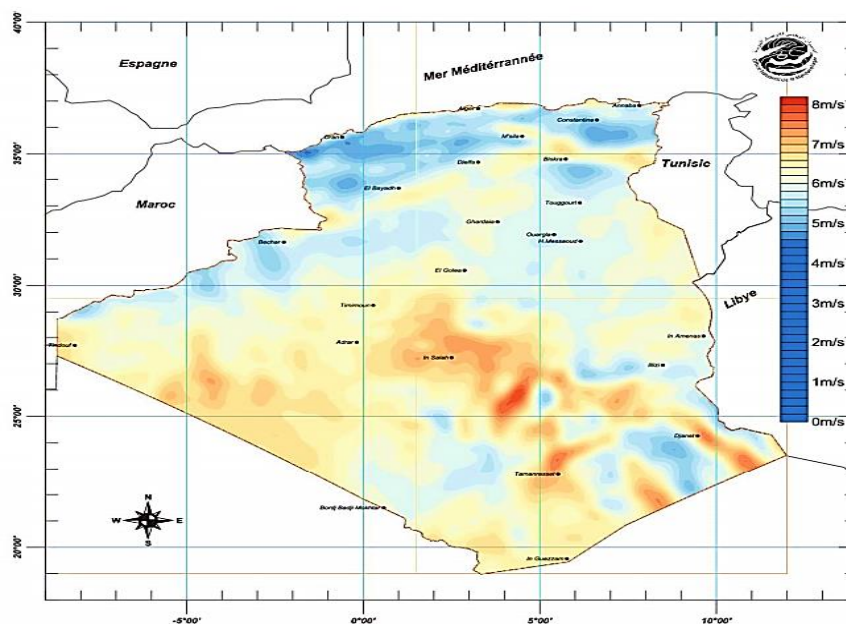


Figure I- 3: L'énergie éolienne Au niveau national

La consistance du programme en énergie renouvelable d'origine éolien à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 5010 MW [7].

I.4. L'intérêt de l'énergie éolienne

L'intérêt d'utiliser l'énergie éolienne pour la production d'énergie électrique en Algérie, a fait que le centre de développement des énergies renouvelables s'est muni des moyens importants pour la réalisation d'études poussées à l'échelle régionale afin de détecter des sites ventés dans les régions prédéfinies, en effet, en considérant les paramètres suivants [8] :

- L'accessibilité de la région, (topographie).
- L'identification des régions protégées.
- La capacité de raccordement au réseau.
- Les contraintes environnementales.
- Le risque foncier.

Deux raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie :

I.5. Avantage de l'éolienne

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées, notamment dans les régions du grand sud.
- Elles permettent un développement du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelables qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leurs terrains.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.

I.6. Inconvénients de l'éolienne

- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études démontrent que les dites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux.
- La rotation de l'hélice peut causer des problèmes particuliers, car elle crée des signaux parasites intermittents qui interfèrent avec les trajectoires des transmissions.
- Dans le cas d'installations pour votre propre consommation, il est nécessaire de recourir au stockage par des batteries pour des périodes de vent faible, ce qui augmente le coût.
- Bien qu'elles soient de plus en plus silencieuses, certains estiment que les éoliennes émettent des nuisances sonores.

I.7. Le vent

I.7.1 Définition du vent

Le vent n'est autre qu'un mouvement d'air qui constitue notre atmosphère. Le soleil est responsable de ces mouvements. Celui-ci chauffe l'atmosphère de façon non uniforme ; c'est-à-dire que le vent se forme de la différence de température entre deux masses atmosphériques, en premier lieu, parce que la Terre est sphérique, et en second lieu, parce que continents, océans et nuages sont eux-mêmes répartis irrégulièrement [4], [9].

I.7.2 La formation du vent

Très exactement, Les divers composants moléculaires qui constituent l'air, comme l'azote, l'oxygène, et l'hydrogène s'agitent. Les chocs entre les molécules sont tels, qu'elles s'éloignent les unes des autres : le mélange gazeux perd alors de sa densité. Un gaz chaud est moins dense, plus léger qu'un gaz froid. C'est ce principe qui régit l'apparition des vents sur notre planète, lorsqu'une masse d'air se réchauffe sous l'effet des rayons du soleil ou au contact d'un milieu chaud, elle devient plus légère, et monte. En altitude, la masse d'air se refroidit et descend de nouveau. Pendant ce temps, la terre en rotation a légèrement pivoté sur elle-même. La masse d'air redescend ainsi plus à l'est si elle se trouve dans l'hémisphère nord, plus à l'ouest si elle se situe dans l'hémisphère sud. Le globe terrestre en mouvement et les irrégularités géographiques contribuent ensuite à son évolution[9].

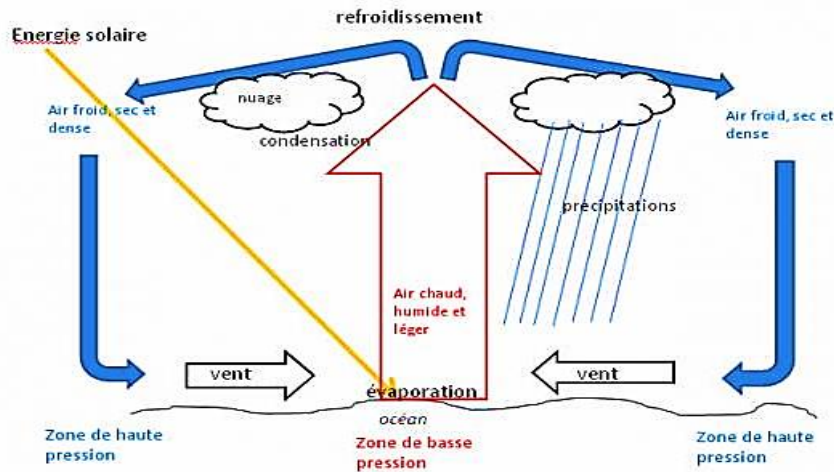


Figure I- 4: La formation du vent

I.8. Présentation du système éolien

Le système éolien a pour rôle d’extraire une partie de l’énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes.

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l’énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d’un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l’énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré dans la figure I-5. L’ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et posent des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques et automatiques[10].

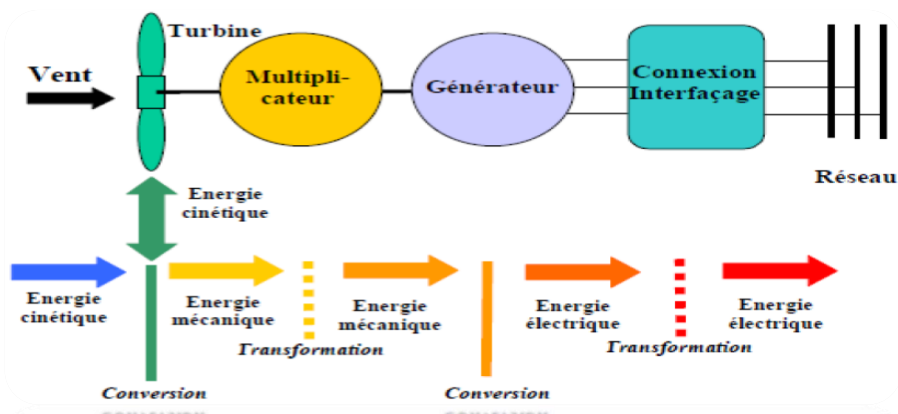


Figure I- 5: Conversion de l’énergie cinétique du vent.

I.9. Taille des aérogénérateurs :

L'aérogénérateur ou éolienne est un ensemble d'éléments permettant la production d'énergie électrique tout en captant l'énergie cinétique du vent disponible. Selon leur taille et puissance délivrée les aérogénérateurs sont classés en trois catégories présentées dans le tableau suivant[11].

Tableau I- 1: taille des éolienne

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12m à 45m	De 40 kW à 1 MW
grande	46m et plus	1 MW et plus

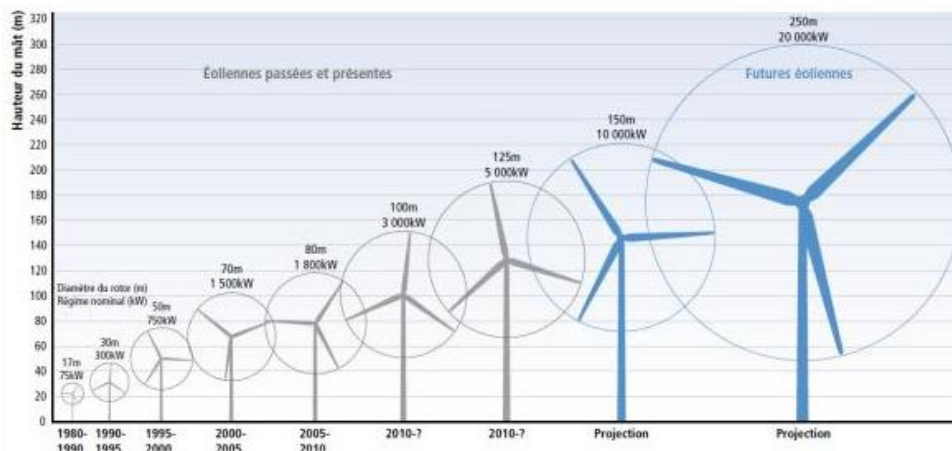


Figure I- 6: Eoliennes passées et présentes

I.10. Eléments constituant l'éolienne :

La base : Souvent circulaire et en béton armé, dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.

La tour ou le mat : permet de placer le rotor à une hauteur suffisante où le vent souffle de façon plus forte et plus régulière qu'au niveau du sol.

Le rotor : composé de plusieurs pales (3 en général) et du moyeu, le rotor est entraîné par l'énergie du vent, branché directement au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie, l'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse du vent, plus le diamètre du rotor est grand plus la surface balayée est importante.

La nacelle : montée au sommet du mat, abritant les composants mécaniques, pneumatique certains composants électriques et électroniques, nécessaire au fonctionnement de la machine, la nacelle peut tourner pour orienter la machine dans la bonne direction, la figure ci-dessous représente la nacelle en détail [4].

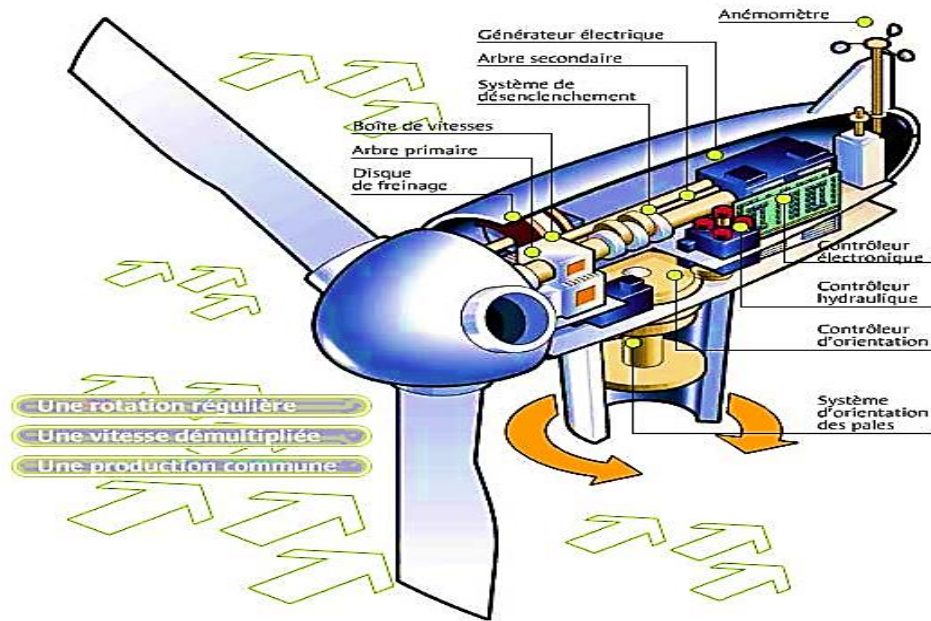


Figure I- 7: Composantes du l'éolienne

I.11. Principe de fonctionnement du système

On utilise un aérogénérateur, plus communément appelé « éolienne », son fonctionnement est simple et s'inspire de la technologie des moulins à vent.

La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent [12].

Un vent soufflant à une vitesse de seuil fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute, ce mouvement de rotation permet de capter et transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau de la turbine (arbre primaire), La vitesse de rotation des pales est en fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement. L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la génératrice (arbre secondaire), où elle est convertie en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité, donc la mise en place d'un multiplicateur de vitesse entre les deux arbres permet la transmission de l'énergie mécanique avec une vitesse plus élevée, ainsi, on distingue deux cas, soit l'éolienne est connectée directement au réseau de distribution, soit elle alimente une charge isolée [13], [14].

I.12. Types des éoliennes

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, elles sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice (capteur à axe vertical ou horizontal), soit selon leurs technologies [15].

I.12.1 Selon la conception mécanique

I.12.1.a Eolienne vortex

Créée en 2010, c'est un prototype d'éolienne à axe horizontal qui fonctionne sans pale, vu de l'extérieur, uniquement constitué d'un mat en fibre de verre et de carbone à la forme légèrement conique qui à sa base sont implantés de grands anneaux magnétiques, il produit de l'électricité à partir de ses vibrations mécaniques en captant les vortex, c'est-à-dire les courants d'air tourbillonnaires, tandis que les éoliennes traditionnelles, généralement tripales, exploitent les courants d'air laminaires (réguliers et unidirectionnels).



Figure I- 8: Eolienne vortex

Les concepteurs des éoliennes Vortex mettent en avant les avantages de leur structure épurée :

- un coût de fabrication réduit de moitié ;
- une baisse drastique des coûts de maintenance ;
- une réduction de l'impact visuel et sonore ou encore de moindres risques pour l'avifaune.

A puissance égale, ces éoliennes produiraient toutefois 30% moins d'électricité que les éoliennes traditionnelles, trois versions seront déployées, La plus petite d'entre elles, baptisée Vortex Atlantis, mesurera 3 mètres de haut, pèsera seulement 10 kg et aura une puissance limitée à 100 Watts, ainsi que deux autres modèles de 4 kW (Mini, 12,5 m de haut) et de 1 MW (Grand, 170 m de haut) auront davantage vocation à être commercialisés en Europe, auprès des particuliers dans le premier cas. Vortex espère pouvoir mettre son grand modèle sur le marché en 2018 [4].

I.12.1.b Eolienne à axe vertical

Première structure développée pour produire de l'électricité, les turbines à axe vertical sont très peu répandues aujourd'hui que celles à axe horizontal, l'avantage est que ses composants sont placés au niveau du sol qui représente un accès facile pour les opérations de maintenances par contre, son faible rendement l'a écarté du marché [11], [15], [16].

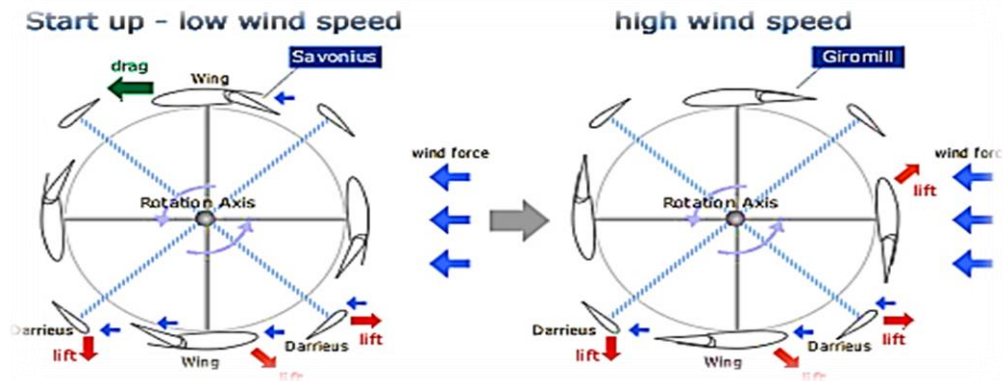


Figure I- 9: Eolienne à axe vertical

Dans ce genre de turbine on distingue deux types :

1. Type Savonius

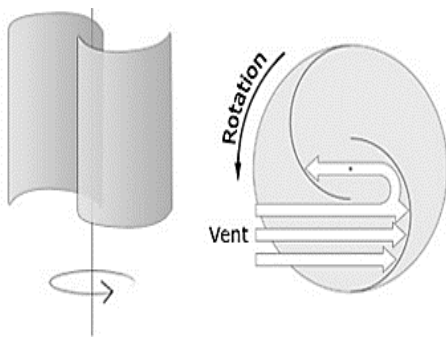


Figure I- 10 : Turbine type Savonius

Cette machine a été inventée par l'ingénieur finlandais **Sigurd Savonius** en 1924 et a été brevetée en 1929. Elle est constituée schématiquement d'un minimum de deux demi-cylindres légèrement désaxés, Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pôle, l'éolienne Savonius, a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions de vent, ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

2. Type Darrieus

Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et quelle que soit leur direction, Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile, en effet, le poids du rotor pèse sur son socle, générant des frottements.

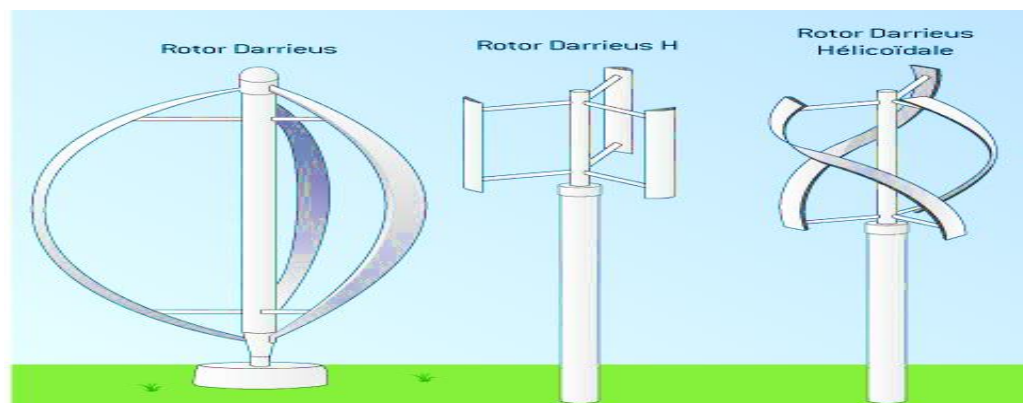


Figure I- 11: Turbine type Darrieus

I.12.1.c Eolienne à axe horizontal

Les plus utilisées, le principe de l'éolienne à axe horizontal ou « éolienne à hélices » est simple et rappelle celui du moulin à vent. Les pales sont fixées au sommet d'un pylône et sont orientées face ou dos au vent, ce qui permet des rendements élevés. Il existe un grand nombre de modèles à axe horizontal, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine. [17]

Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes "amont" et les éoliennes "aval" :

1. Amont :

Le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pales rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000kW fonctionnent avec ce principe.

➤ **Les éoliennes rapides :** Actuellement les plus utilisées pour la production d'énergie électrique en raison de leur efficacité, leur poids et leur rendement (voisin de 85% de la limite de Betz), composées d'un nombre de pales qui varie entre 2 et 4, aussi, le diamètre du rotor est de 1 à 100 m [8].

➤ **Les éoliennes lentes :** Construits aux Etats-Unis dès 1870, les éoliennes multiples peuvent comporter de 12 à 30 pales. Le coefficient de puissance approche 0.3 pour des vitesses spécifiques proches de 1 ($\lambda \sim 1$) ; le coefficient de couple est élevé au démarrage. Le plus souvent, ces éoliennes sont de petites tailles ; la roue à couramment un diamètre de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s ; au-delà, il faut prévoir un dispositif d'arrêt qui doit mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent.

2. Aval :

Dans le fonctionnement des éoliennes à axe horizontal "aval", le vent souffle sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles.

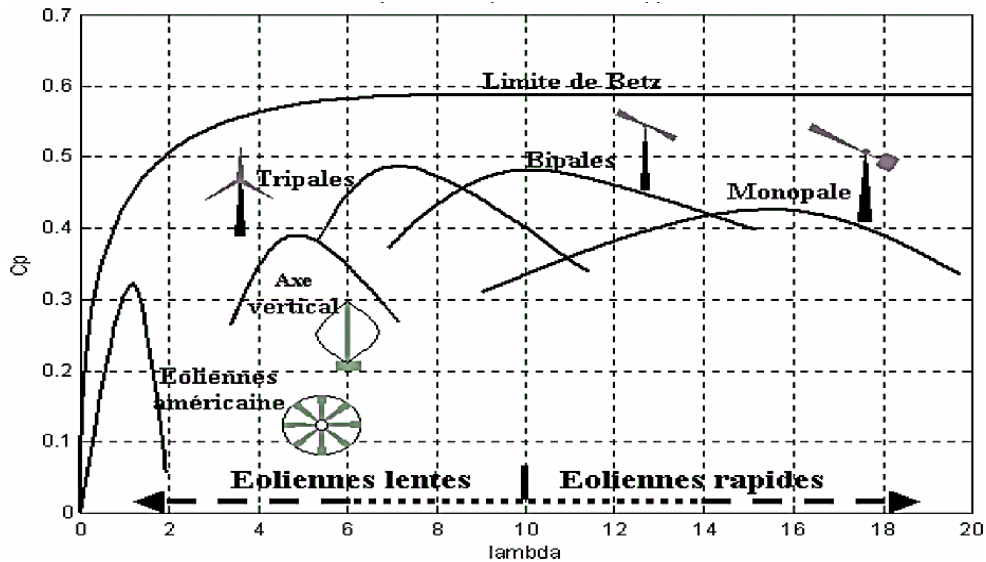


Figure I- 12: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

I.12.2 Selon la technologie :

Deux différents modes de fonctionnement d'éolienne peuvent être utilisés pour la production d'énergie éolienne. On les classera ainsi :

- fonctionnement à vitesse fixe.
- fonctionnement à vitesse variable.

I.12.2.a Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement reliées au réseau électrique, ainsi, la vitesse est alors imposées par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles de la génératrice, la mise en place d'un multiplicateur de vitesse qui entraine la machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales (Pitch control). Une batterie de condensateur est souvent reliée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût[18], [19].

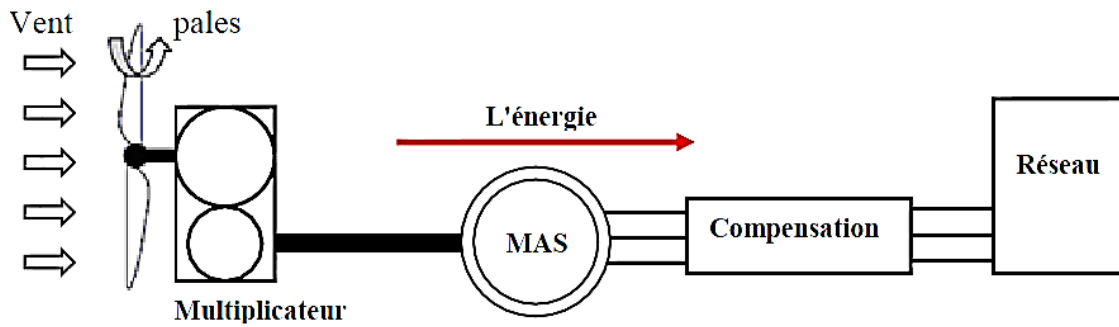


Figure I- 13: fonctionnement à vitesse fixe

I.12.2.b Fonctionnement à vitesse variable

Dans les systèmes à vitesse fixe, la puissance maximale ne peut être exploitée, c’est pour cette raison là que la génératrice doit être ajustée en fonction du vent afin d’optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite.

L’éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d’une turbine, un multiplicateur, un générateur, et un convertisseur de puissance. La partie électrique de l’éolienne, en général, est composée d’un générateur électrique synchrone ou asynchrone.

Avec la meilleure qualité et la baisse des couts de l’électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées, ainsi deux convertisseurs statiques interfacés par un bus continu sont utilisés. La connexion de ces convertisseurs est réalisée au moyen de trois inductances de lissage permettant de réduire significativement les harmoniques de courant[15], [18], [20].

b.1. La configuration avec l’utilisation de machine pilotée par le stator :

Les machines couramment utilisées pour ce type de configuration sont les machines asynchrones à cage ou les machines synchrones, et souvent on utilise les machines synchrone car la mise en place d’une machine multipolaire permet de supprimer le multiplicateur de vitesse [13], [18].

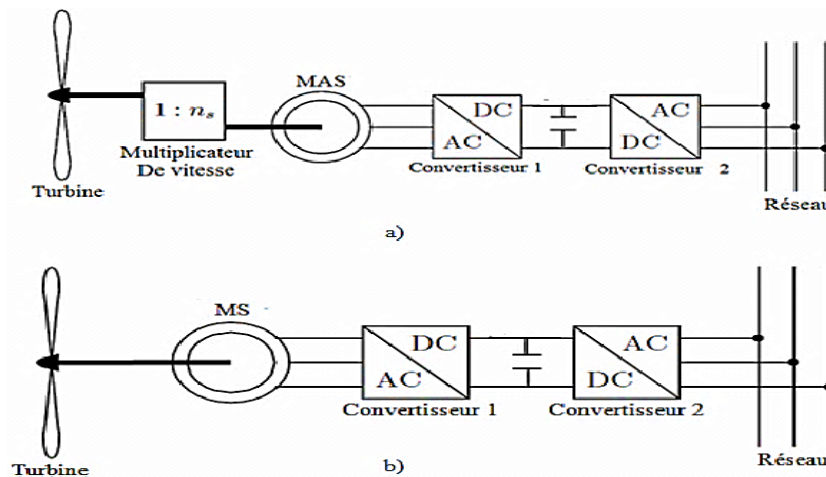


Figure I- 14 : La configuration avec l’utilisation de machine pilotée par le stator

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne, ceci permet de limiter le système d'orientation des pales à une fonction de sécurité par grand vent. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu (représenté par une capacité) et de délivrer des courant avec une fréquence correspondante à la fréquence du réseau avec la possibilité de régler le facteur [18].

b.2. La configuration avec l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation.

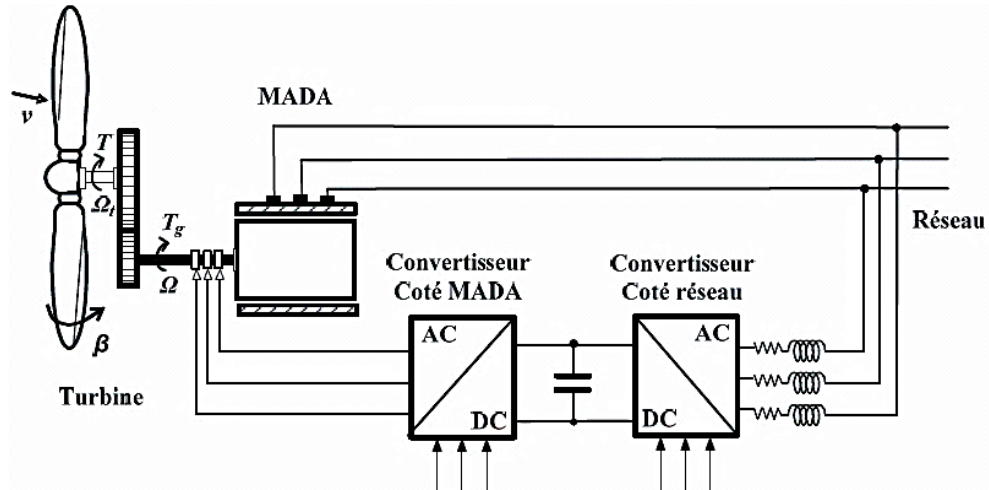


Figure I- 15: La configuration avec l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation.

La machine asynchrone à double alimentation a suscité un intérêt particulier surtout entant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Les éoliennes qui utilisent la MADA, le stator est relié directement au réseau par contre le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques (le convertisseur coté machine CCM et le convertisseur coté réseau CCR). Contrairement aux machines asynchrones à cage ou machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation [18].

L'onduleur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance, Cette machine sera adoptée pour le reste du travail de thèse [15].

Actuellement la production d'énergie éolienne est effectuée en utilisant des éoliennes à vitesse variable et cela pour de nombreuses raisons qui sont présentées ci-dessous.

➤ Intérêt de vitesse variable

Pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique Ω_1 on a une puissance nominale P_1 (point A). Alors si on aura une vitesse V_2 supérieur à V_1 pour la même vitesse Ω_1 , on ne peut avoir une puissance maximale (point B) c'est-à-dire qu'il faut augmenter la vitesse de la turbine à Ω_2 pour

avoir une puissance maximale (point C), donc il est nécessaire de synchroniser la vitesse de la turbine avec la vitesse vent pour extraire la puissance maximale.

La technique d'extraction maximale de puissance consiste à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence calculée pour maximiser la puissance extraite [8], [19].

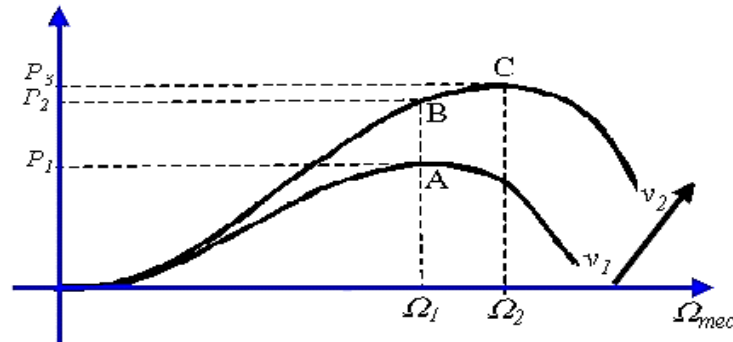


Figure I- 16: fonctionnement à vitesse variable

➤ **Avantages.**

- Vitesse variable sur toute la plage de vitesse ;
- Puissance extraite optimisée ;
- Connexion au réseau plus facile à gérer ;
- Absence du multiplicateur de vitesse (pour les machines synchrones a grand nombre de pôles).

➤ **Inconvénients.**

- Machine spécifique à plusieurs paires de pôles donc très encombrée et de grand diamètre ;
- Électronique de puissance dimensionnée à au moins 100% puissance nominale donc plus chère ;
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés ;
- Coût de la machine élevé surtout dans le cas d'une machine synchrone à aimant.

Deux configurations sont proposées pour ce mode de fonctionnement :

I.13. Les différentes zones de fonctionnement à vitesse variable

La mise en place d'un système de régulation nous permet de sécuriser notre éolienne à vent fort et aussi pour limiter la puissance, c'est-à-dire que l'éolienne a été développée afin de produire une puissance dite puissance nominale dans le cas où le vent souffle à une vitesse dite vitesse nominale, car si la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale, l'éolienne peut subir une charge qui peut l'endommager. Ainsi, par mesure de sécurité, l'éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques pour avoir toujours une puissance équivalente à la puissance nominale.

On a quatre zones de fonctionnement, et chaque zone est définie par sa vitesse de vent et la puissance produite.

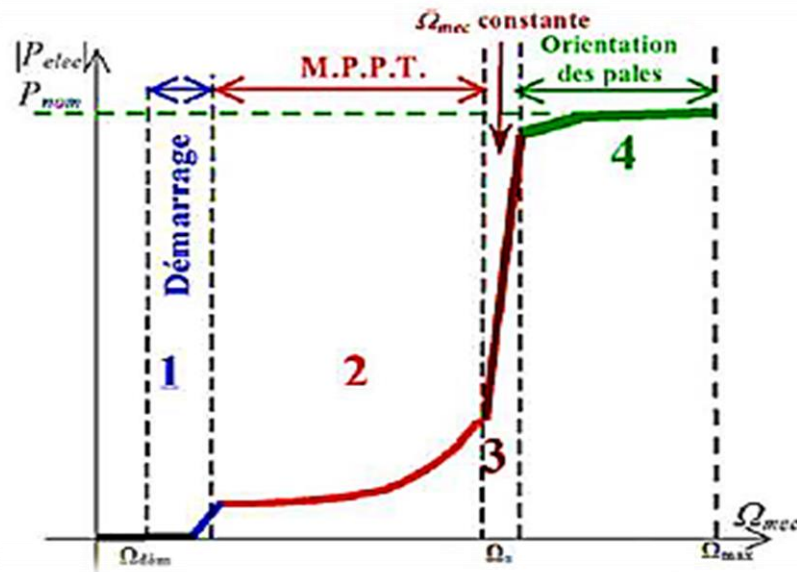


Figure I- 17: les zones de fonctionnement à vitesse variable

Zone1 : zone de démarrage, la vitesse du vent est trop faible, on aura un mouvement des pales mais la puissance produite est quasi nulle.

Zone2 : la vitesse du vent est suffisante pour faire tourner les pales, l'éolienne extrait le maximum de la puissance captée (MPPT) pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne une vitesse nominale, ce fonctionnement est réalisé avec un angle de calage constant et minimal afin d'obtenir un C_p maximal, dans cette zone la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la valeur nominale.

Zone3 : la mise en place d'un système d'orientation des pales (PITCH) est nécessaire ce qui maintient la vitesse mécanique constante à sa valeur nominale pour ne pas détériorer l'éolienne, la puissance électrique augmente rapidement elle peut atteindre 90% de sa valeur nominale.

Zone4 : la vitesse du vent est trop forte, par mesure de sécurité et éviter une rupture mécanique un dispositif d'urgence se déclenche et oriente les pales à 90° (en drapeau) ce qui met fin au fonctionnement de l'éolienne.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2 ou phase MPPT [8], [15], [21].

Différentes éoliennes ont été utilisées, chacune d'elles contient des avantages et inconvénients représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I- 2 : Différentes éoliennes utilisées

Type d'éolienne	Avantage	Inconvénient
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Machine standard - Robuste - Faible coût - Pas d'EP pour l'interfaçage 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée - Maintenance boîte de vitesse - Pas de gestion de l'énergie réactive par générateur - Magnétisation de la machine non gérée.
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable - Puissance extraite optimisée - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale - Machine standard - Connexion de la machine plus facile à gérer - Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance boîte de vitesse - Prix de l'électronique de puissance. - Contrôle – commande complexe - Contact glissant bagues – Balais
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. - Connexion de la machine facile à gérer - Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'électronique de puissance - Machine spécifique - Grand diamètre de machine - Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

I.14. Conclusion :

Ce chapitre traite un aspect général sur l'énergie éolienne, tout en commençant par un bref historique et son utilité dans la vie quotidienne, tout en passant par sa progression au niveau international, comme en territoire national.

Enfin, avec les différentes technologies appliquées aux éoliennes pour la production d'énergie électrique d'origine éolienne, ce chapitre nous donne une petite introduction sur la zone de fonctionnement (zone de l'extraction maximale de la puissance MPPT) dont nous allons nous concentrer pour la suite de notre travail.

II.1 Introduction

Aujourd'hui, la machine asynchrone à double alimentation est la plus utilisée dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne, comme on a mentionné dans le premier chapitre.

Le système de conversion éolienne à base de la MADA est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre triphasé de courant. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu [11].

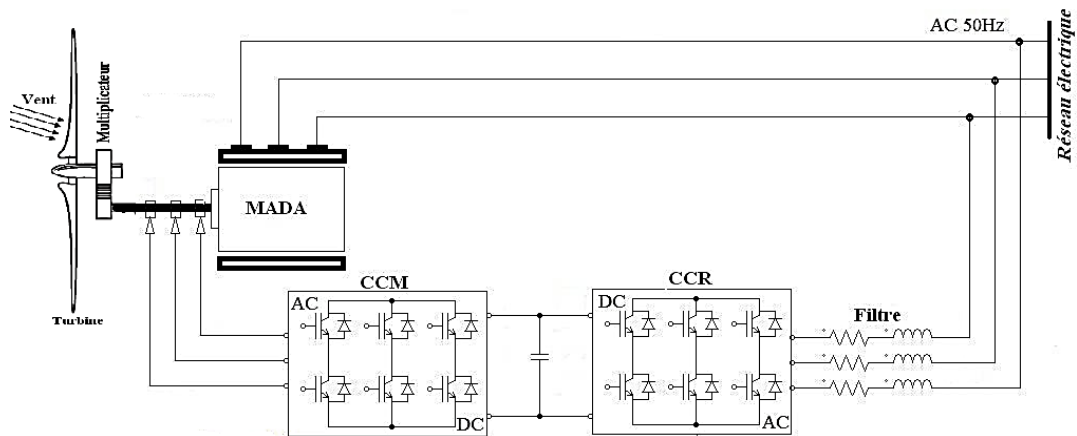


Figure II- 1 : Système de conversion éolienne à base de la MADA.

II.2 Modélisation de la turbine :

Considérons une turbine éolienne munie des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain $G=5.4$, dont les paramètres de la turbine sont mentionnés dans l'annexe A

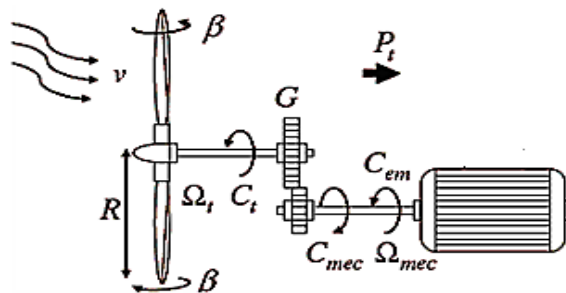


Figure II- 2 : Turbine éolienne

II.2.1. Loi de BETZ

$$m = \frac{\rho \cdot s (V_1 V_2)}{2}$$

II.1

Donc le coefficient de puissance maximal théorique est :

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_v} = 0.59 \quad \text{II.2}$$

La formule de BETZ montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur, ne peut dépasser en aucun cas les 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde [17].

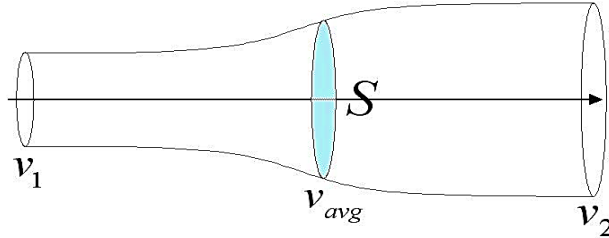


Figure II- 3 : Principe de théorie de loi BETZ.

II.2.2. Modèle des pales [8], [10], [11], [17], [22] :

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{\rho.S.V^3}{2} \quad \text{II.3}$$

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

$$C_{aero} = \frac{1}{2\Omega t} . C_p(\lambda, \beta) . \rho . S . V^3 \quad \text{II.4}$$

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

$$\lambda = \frac{R.\Omega t}{V} \quad \text{II.5}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) P_v = \frac{\rho.S.V^3}{2} C_p(\lambda, \beta) \quad \text{II.6}$$

L'expression du coefficient de puissance est donnée par :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C1 \left(\frac{C2}{\lambda_i} - C3.\beta - C4 \right) . \exp\left(\frac{-C5}{\lambda_i} \right) + C6.\lambda \quad \text{II.7}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08.\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{II.8}$$

$$C1 = 0.5176 ; \quad C2 = 116 \quad ; \quad C3 = 0.4 \quad ; \quad C4 = 5 \quad ; \quad C5 = 21 \quad ; \quad C6 = 0.0068$$

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

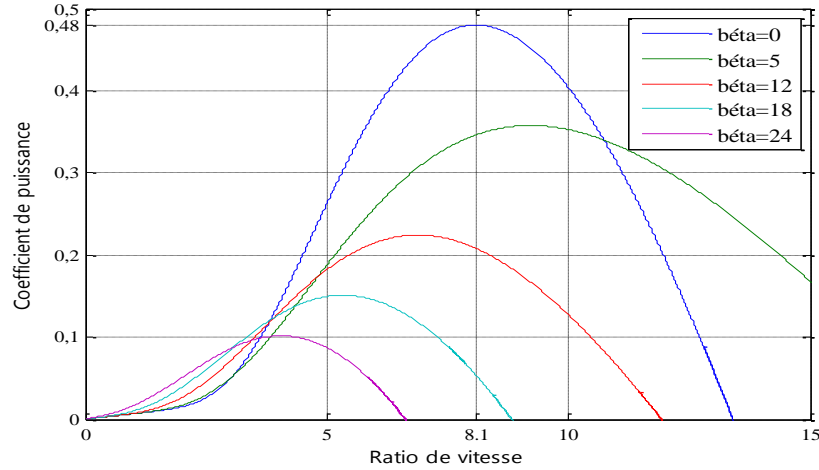


Figure II- 4 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse et l'angle d'orientation des pales

$\beta=0$; $C_p=0.48$; $\lambda=8.1$, c'est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

II.2.3. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible, utilisée par la génératrice. Le multiplicateur utilisé est constitué de deux arbres tournants, un arbre lent tournant à une vitesse Ωt et un arbre rapide tourné avec une vitesse Ωmec .

Sa modélisation mathématique est définie par les deux équations suivantes :

$$\Omega mec = G.\Omega t \tag{II.9}$$

$$Cg = \frac{1}{G} Caero \tag{II.10}$$

II.2.4. Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre primaire sous forme d'une inertie et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de cette dernière.

$$J = Jg + \frac{Jt}{G^2} \tag{II.11}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.12}$$

Où J est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.13}$$

Le couple résistant est modélisé par un coefficient de frottements visqueux :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.14}$$

C_t, C_g : Le couple éolien et le couple de générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

La figure ci-dessous représente le modèle de la turbine :

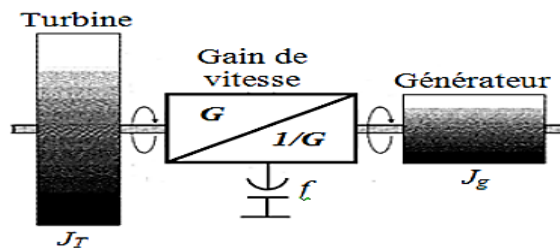


Figure II- 5 : Modèle de l'arbre mécanique.

Le modèle de l'ensemble de la chaîne cinétique de la turbine est obtenu en regroupant les composantes développées précédemment.

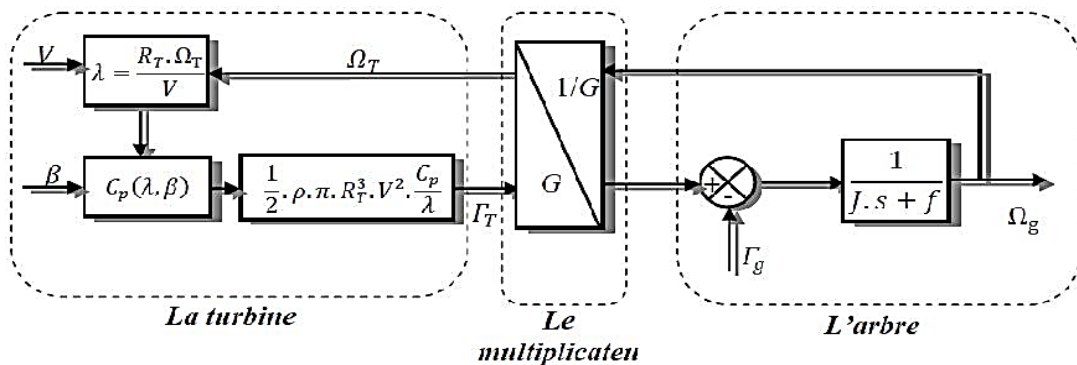


Figure II- 6 : Schéma bloc du modèle du convertisseur éolienne

II.2.5. Modèle du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. C'est l'entrée du système qu'on étudie. L'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine, puis en énergie électrique grâce au générateur [23].

Dans cette étude on a modélisé le vent par une somme de plusieurs harmoniques comme suite :

$$V_{vent}(t) = 6 + 0.2 \sin(0.1047.t) + 2 \sin(0.2665.t) + \sin(1.293.t) + 0.2 \sin(3.6645.t) \quad \text{II.15}$$

II.3 Stratégies de maximisation de puissance MPPT :

Cette technique consiste à ajuster la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice afin d'obtenir le maximum de puissance générée, donc le maximum du couple électromagnétique, qui correspond à la zone II de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne[11].

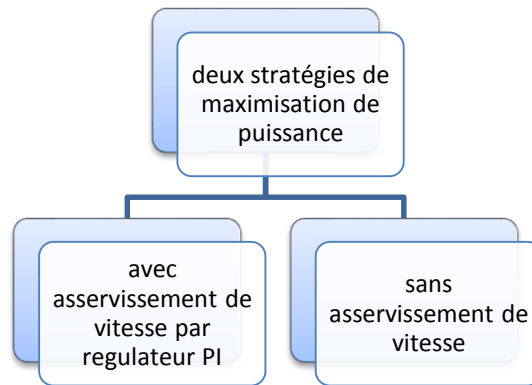


Figure II- 7 : Stratégies de commande de la turbine.

II.3.1. Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse.

Dans cette stratégie, la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Ce qui revient à négliger l'effet du couple des frottements visqueux $C_{vis} = 0$. Donc :

$$C_{em} = C_t \quad \text{II.16}$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir du couple éolien estimé, tel que :

$$C_{em_r} = \frac{C_{t_est}}{G} \quad \text{II.17}$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique :

$$C_{t_est} = \frac{1}{2\Omega_{t_est}} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{II.18}$$

La vitesse estimée de la turbine est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{t_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.19}$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine est délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue :

$$V_{est} = R \frac{\Omega_{t-est}}{\lambda} \tag{II.20}$$

En regroupant ces quatre équations, on obtient une relation de contrôle :

$$C_{em_r} = 0.5 \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_p}{\lambda^2 \cdot G^2} (\Omega_{mec})^2 \tag{II.21}$$

Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur du couple de référence suivante :

$$C_{em_r} = 0.5 \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{pmax}}{\lambda_{opt}^2 \cdot G^2} (\Omega_{mec})^2 \tag{II.22}$$

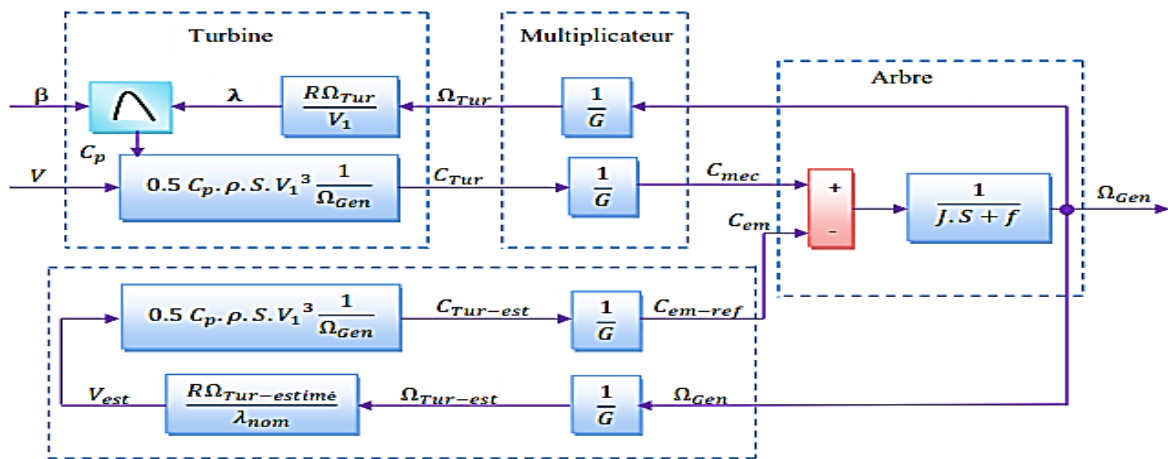
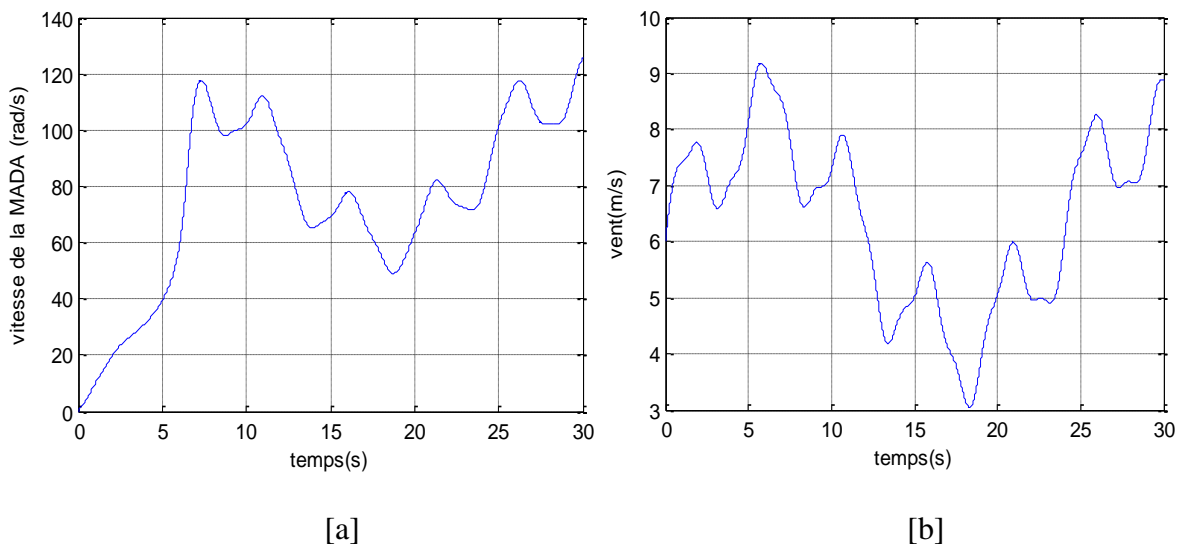


Figure II- 8 : Stratégie MPPT sans Asservissement de la vitesse

II.6.3.a. Résultats de simulation :

Les figures ci-dessus représentent des résultats de la turbine de 10 KW après lui avoir appliqué un modèle de vent (eqt II.15) pendant 30s, ainsi la simulation a été effectuée sous environnement MATLAB/SIMULINK.



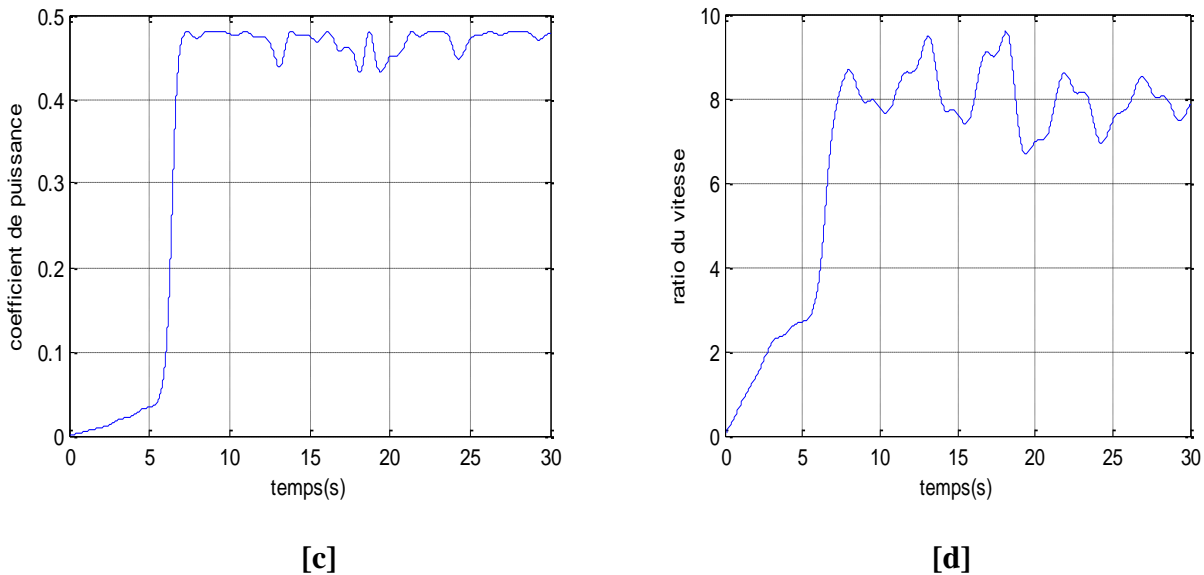


Figure II- 9 : Résultats du MPPT sans asservissement de vitesse.

D'après la figure (II-9.a), On remarque que l'allure de la vitesse mécanique prend approximativement la même allure que celle du vent dans la figure (II-9.b), mais elle est lente à suivre, et le coefficient de puissance et le ratio de vitesse ne sont pas stables (figure II-9.c et d), donc, une stratégie de commande doit être établie, afin, non seulement d'optimiser le coefficient de puissance et le ratio de vitesse, et aussi adapter la vitesse de mécanique avec la vitesse de référence.

II.3.2. Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

Cette stratégie de commande consiste à régler le couple de l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, on va utiliser un asservissement de vitesse.

Le correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice [15].

Un régulateur PI suffit pour répondre à ce cahier de charge. Dont un dimensionnement et mentionné dans l'annexe B

La puissance mécanique de la génératrice est donnée par :

$$P_m = C_p \Omega_m v^3 \quad \text{II.23}$$

On suppose que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout moment égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em_r} \quad \text{II.24}$$

Le couple électromagnétique de référence C_{em_r} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est donné par la relation suivante :

$$Cem_r = Reg(\Omega_ref - \Omega_{mec}) \tag{II.25}$$

Avec :

$$\Omega_ref = G.\Omega_{tur_ref} \tag{II.26}$$

La référence de la vitesse de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximale du couple.

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{opt}V}{R} \tag{II.27}$$

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure suivante

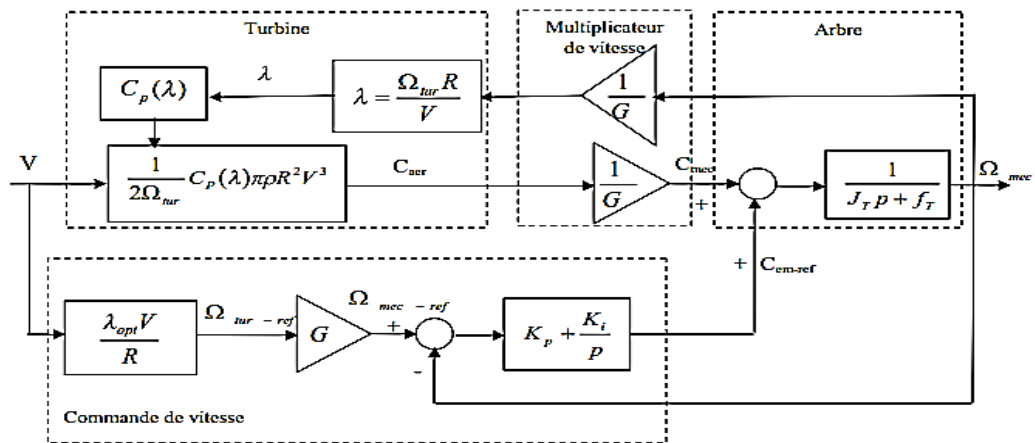
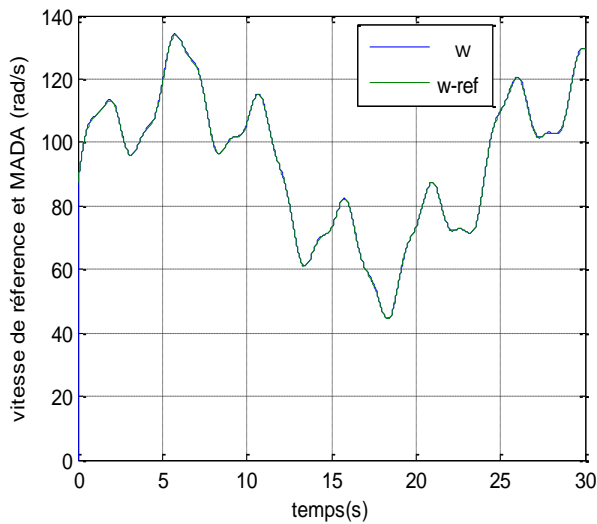
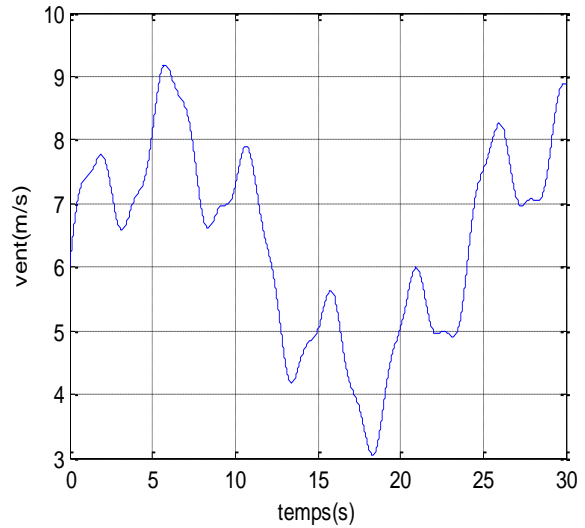


Figure II- 10 : Stratégie MPPT avec Asservissement de la vitesse.

II.3.2.a. Résultats de simulation



[a]



[b]

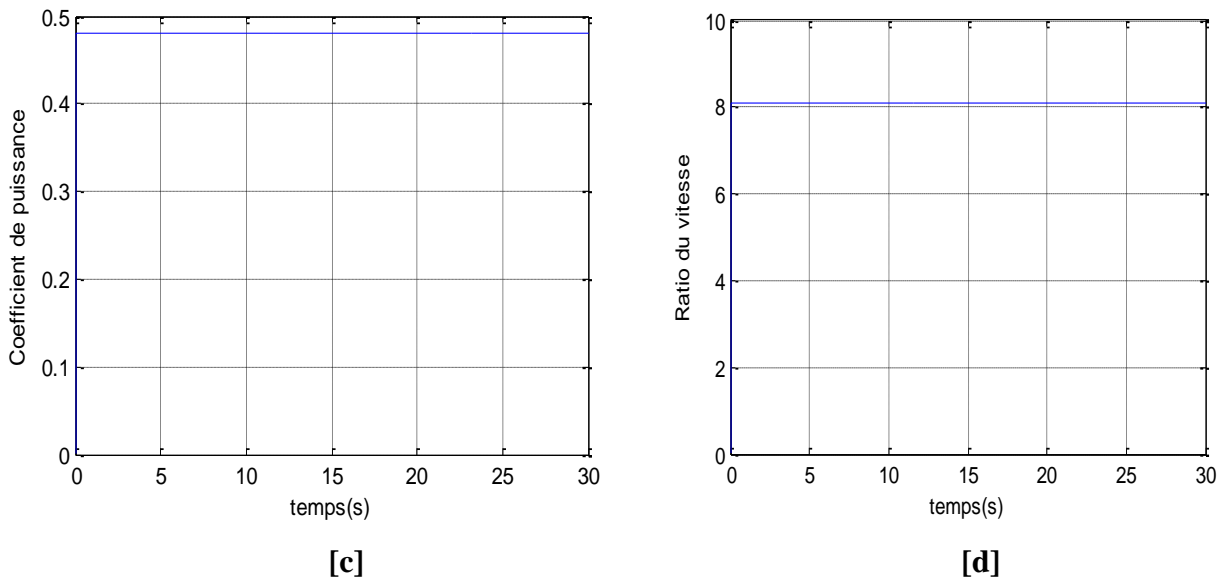


Figure II- 11 : Résultats du MPPT avec asservissement de vitesse.

Après avoir appliqué la commande MPPT avec réglage de la vitesse, on peut observer que la vitesse mécanique est synchronisée avec celle d'une référence qui est l'image du vent, ainsi, en fixant l'angle de calage $\beta=0$, on a un coefficient de puissance et le ratio de vitesse qui prennent des valeurs constantes 0.48 et 8.1 respectivement, cependant, pour toute variation de vitesse du vent, on a une maximisation de la puissance.

II.4 Machine Asynchrone à double alimentation :

II.4.1. Principe de fonctionnement :

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné est de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant lors du démarrage, augmenter le couple durant cette phase, ainsi que de pouvoir élargir la plage de variation de la vitesse.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée « machine généralisée », car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être, éventuellement, résumé par le terme de : machine synchrone à excitation alternative[23].

II.4.2. Modes de fonctionnement :

On base sur le mode de fonctionnement où le stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur de puissance. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou en générateur [23].

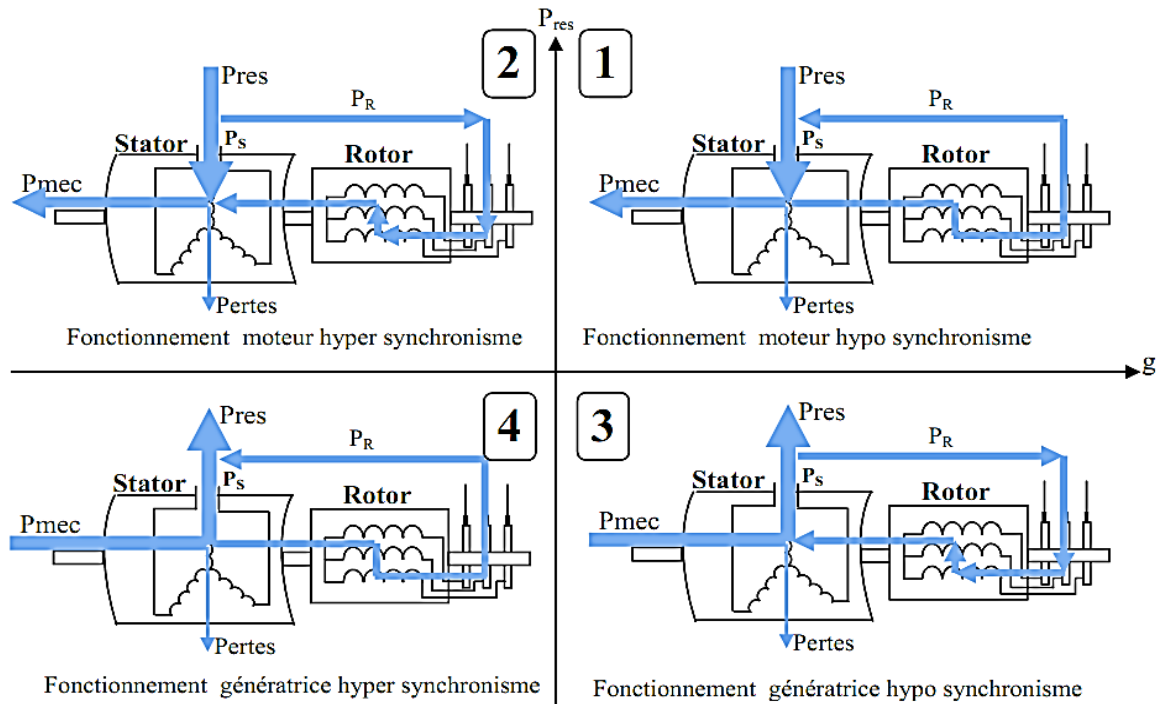


Figure II- 12 : Modes de fonctionnement de la MADA

Fonctionnement moteur hyposynchrone ($g > 0$) : Pour ce cas la machine en mode de fonctionnement moteur, qui tourne à une vitesse faible inférieure à la vitesse de synchronisme.

La puissance P fournie par le réseau au stator, la puissance P_r « la puissance de glissement » transite par le rotor et est réinjectée au réseau [23].

Fonctionnement moteur hypersynchrone ($g < 0$) : La figure suivante montre que la puissance est fournie par les réseaux au stator et rotor, on a donc un fonctionnement d'une vitesse supérieur à la vitesse de synchronisme.

Fonctionnement générateur hyposynchrone ($g > 0$) : En mode de fonctionnement hyposynchrone, la vitesse mécanique est faible, alors le réseau reçoit une puissance statorique P et envoie une puissance rotorique vers la machine.

Fonctionnement générateur hypersynchrone ($g < 0$) : En mode de fonctionnement hyper synchrone, la vitesse mécanique augmente jusqu'à une supérieure à celle du synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de la machine vers le réseau.

II.4.3. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation :

a. Modèle de la MADA dans le repère de Park :

La MADA est un système électromécanique complexe contenant de nombreuses variables d'état, telles que les flux de rotor ϕ_{dr} , ϕ_{qr} , les courants de rotor i_{dr} , i_{qr} , les ID de courants de stator, les i_q et les électromagnétiques Couple 'Cem' [24].

Dans le but d'établir une commande vectorielle de la MADA, nous rappelons ici sa modélisation dans le repère de Park. Le modèle repose sur les hypothèses simplificatrices classiques suivantes :

- entrefer constant
- effet des encoches négligé
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer
- influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte
- circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante, pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté [21].

Après l'application de la transformation de Park mentionnée dans l'annexe C on trouve le système d'équations qui représente le modèle de la MADA dans le repère (d, q).

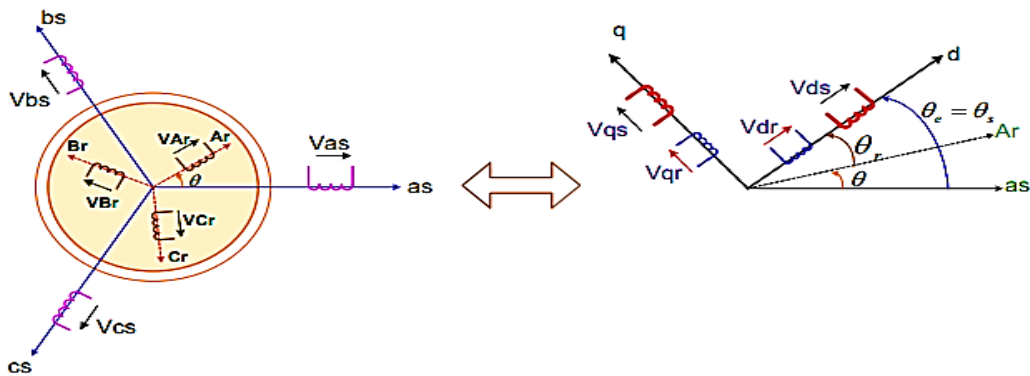


Figure II- 13 : Passage de triphasé au biphasé

b. Équations de tensions :

$$\begin{cases}
 V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\
 V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\
 V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\
 V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr}
 \end{cases}
 \tag{II.28}$$

c. Équations de flux :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad \text{II.29}$$

d. Équations du couple :

$$\begin{cases} c_{em} = p(\phi_{qr} I_{rd} - \phi_{dr} I_{qr}) \\ c_{em} = p(\phi_{ds} I_{qs} - \phi_{qs} I_{ds}) \\ c_{em} = pM(I_{dr} I_{qs} - I_{ds} I_{qr}) \\ c_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}) \end{cases} \quad \text{II.30}$$

Les puissance active et réactive statorique et rotorique de la MADA sont respectivement :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \\ P_r = V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} \cdot I_{dr} - V_{dr} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \text{II.31}$$

Choix de référentiel

Il existe différentes possibilités concernant le choix de l'orientation du repère d'axe **d**, **q** qui dépendent des objectifs de l'application.

Référentiel lié au stator

Ce référentiel est préférable lors de l'étude des grandeurs rotoriques. Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0; \quad \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad \text{II.32}$$

Référentiel lié au rotor

Il est avantageux pour l'étude des grandeurs statorique. Il se traduit par la relation :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0; \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad \text{II.33}$$

Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \quad \text{II.34}$$

Ce choix est préférable en vue d'étudier la commande ou on a besoin d'une orientation du flux, et ne résume aucune simplification.

Mise sous forme d'équation d'état

Pour une bonne représentation de la machine asynchrone double alimentation, nous considérons comme variable d'état $[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, I_{qr}, I_{dr}, \omega]^T$ et les grandeurs V_{dr}, V_{qr} comme variable de commande.

Le système d'équation présentant la machine dans le repère (d-q) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme ω_s . Après le calcul, nous aboutissons au système suivant :

$$\begin{cases} \frac{dI_{dr}}{dt} = -\left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2}\right] I_{dr} + (\omega_s - \omega) I_{qr} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{qs} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{ds} + \left(\frac{1}{\sigma L_r}\right) V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -\left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2}\right] I_{qr} - (\omega_s - \omega) I_{dr} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{qs} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{ds} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{qs} + \left(\frac{1}{\sigma L_r}\right) V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \Phi_{ds} + \omega_s \Phi_{qs} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} I_{qr} + V_{qs} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{P^2 M_{sr}}{L_s J} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) - \frac{F}{J} \omega - \frac{P}{J} Cr \end{cases} \quad \text{II.35}$$

Où σ est le coefficient de dispersion de Blondel :

$$\begin{cases} \sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_r} \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad \text{II.36}$$

II.4.4. Résultat de Simulation :

Les figures ci-dessus représentent des résultats de simulation d'une MADA en boucle ouverte pendant 5s via un logiciel technique MATLAB/SIMULINK. Les paramètres de la machine sont déclarés dans l'annexe A.

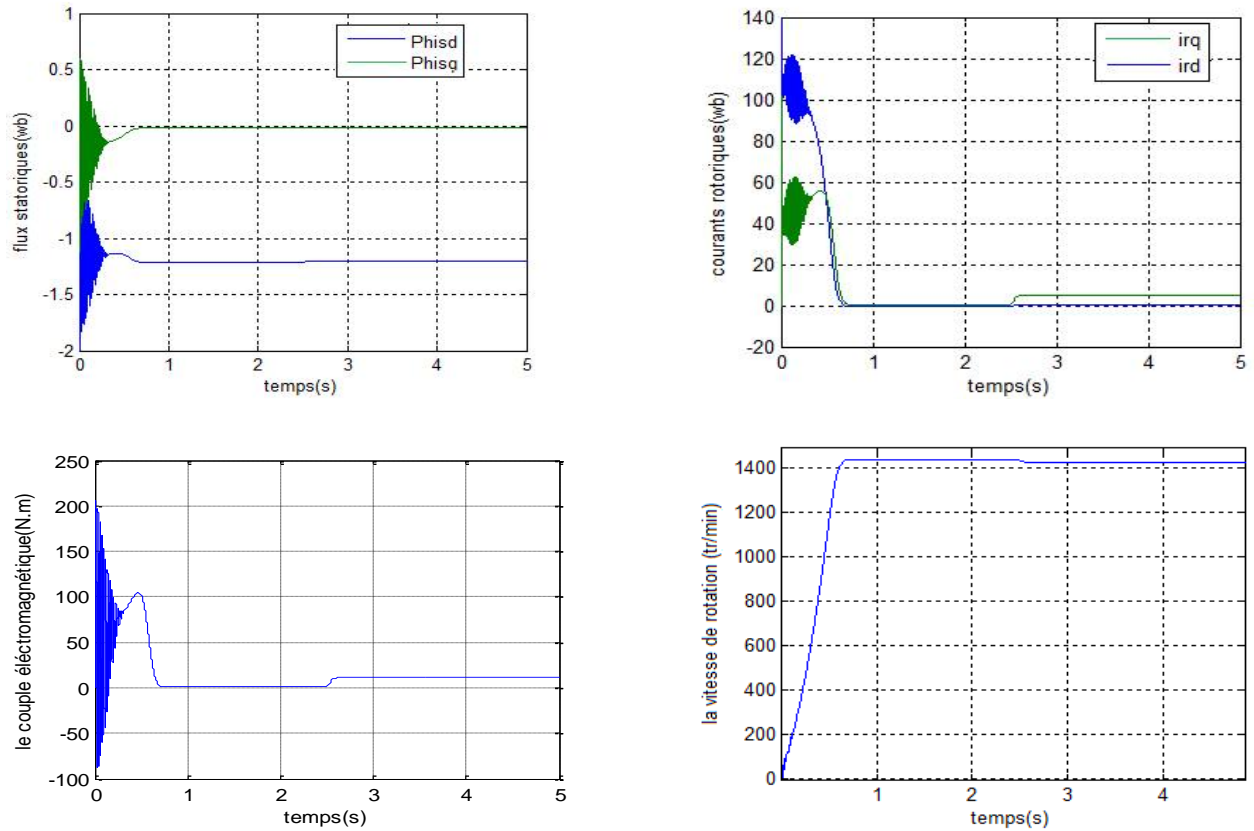


Figure II- 14 : Comportement de la MADA en boucle ouverte

Les courbes montrent les comportements des différentes grandeurs de la MADA (Couple électromagnétique, la vitesse de rotation, les flux statorique et les courants rotorique), ainsi on observe un changement de comportement à l'instant $t=2.5s$ où la valeur du couple passe de 1Nm jusqu'à une valeur de 11Nm et le courant rotorique (irq) (de 0.44A à presque 5A), et ceux en présence d'un couple de charge $Cr=10Nm$.

II.5 Modélisation du convertisseur coté machine :

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [12].

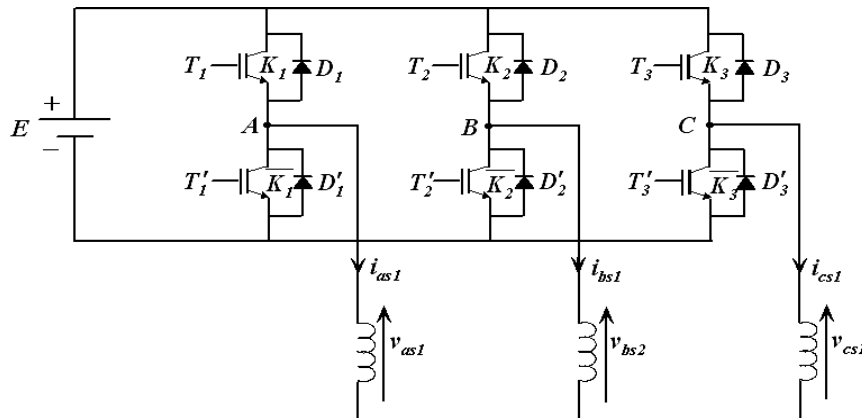


Figure II- 15 : onduleur triphasé associé à la machine

Les couples d'interrupteurs doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors [25].

- ❖ Si $S=1$ l'interrupteur du haut est fermé et celui en bas est ouvert.
- ❖ Si $S=0$ l'interrupteur du haut est ouvert et celui en bas est fermé.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)V_{dc} \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)V_{dc} \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)V_{dc} \end{cases} \quad \text{II.37}$$

D'après les cas possibles des interrupteurs on obtient

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad \text{II.38}$$

En remplaçant (II.37) dans (II.38) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.39}$$

II.5.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions sinus triangulaire (MLI)

Cette technique est très populaire dans l'industrie. Le principe de cette technique est expliqué dans la figure suivante. La comparaison d'une onde sinusoïdale de fréquence f_s , et amplitude A_r appelée onde de référence avec une autre onde triangulaire de fréquence f_p nettement supérieur à f_s et d'amplitude A_p nous donne les points d'intersections qui déterminent les instants de commutation des interrupteurs. La modulation est caractérisée essentiellement par deux facteurs [26]:

- 1- L'indice de modulation $m = \frac{f_s}{f_p}$, qui influe principalement sur le contenu d'harmonique de l'onde de sortie.
- 2- Le rapport de réglage $r = \frac{U}{V_p}$, U et V_p étant respectivement la valeur maximale de la référence et la crête de la porteuse. On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de r la plus élevée possible.

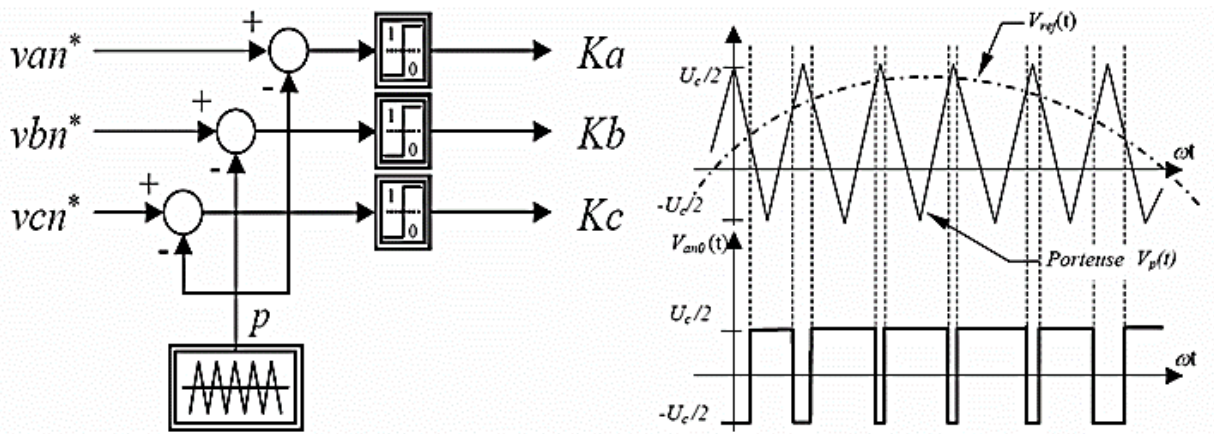


Figure II- 16 : Modulation sinus triangulaire

II.6 Application de la commande vectorielle avec onduleur :

La commande vectorielle des machines électriques à courant alternatif, est une technique qui vise à retrouver le découplage qui caractérise la machine à courant continu à excitation séparée, pour laquelle le courant inducteur contrôle le flux et celui de l'induit contrôle le couple.

De la même manière, l'application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple, et le flux de telle sorte qu'il soit régulé par la composante directe du courant statorique ou rotorique de la MADA [23] :

$$C_{em} = K_a \Phi (I_f) I_a \tag{II.40}$$

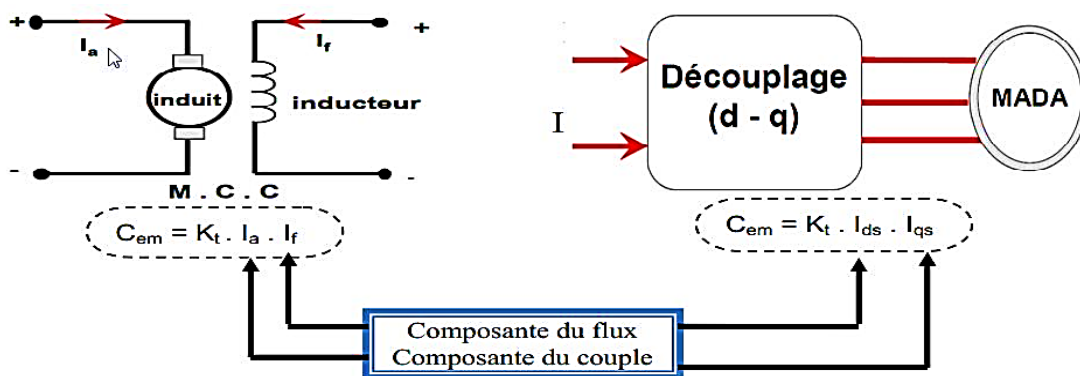


Figure II- 17 : Commande vectorielle de la MADA.

II.6.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

On a orienté notre repère suivant un vecteur flux. Décrivant la machine dans un repère lié au champ tournant qui est donné par.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad \text{II.41}$$

L'orientation de l'axe **d** suivant la direction du flux statorique nous donne :

$$\phi_s = \phi_{ds} \Rightarrow \phi_{qs} = 0 \quad \text{II.42}$$

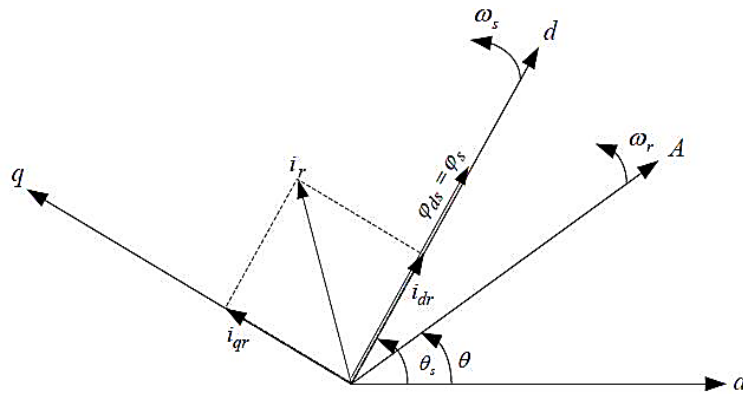


Figure II- 18: Orientation du flux statorique

Ce choix du repère permet d'écrire des équations électriques avec un flux statorique fixé et orienté qui modélisent notre système en régime permanent de la façon suivante.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad \text{II.43}$$

En éliminant les chutes de tension statoriques, les équations des tensions deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad \text{II.44}$$

Les équations de flux deviennent :

$$\begin{cases} \varnothing_{ds} = \varnothing_s = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varnothing_{qs} = 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varnothing_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varnothing_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.45}$$

L'équation du couple devient :

$$Cem = \frac{PM}{L_s} (\phi_{ds} i_{qr}) \quad \text{II.46}$$

A partir de l'équation (II.45), on peut exprimer la relation qui lie les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varnothing_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \text{II.47}$$

Les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent comme suite :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.48}$$

Avec l'orientation du flux statorique, le système d'équation devient :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \text{II.49}$$

On remplace l'équation (II.47) dans l'équation (II.49) :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\varnothing_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad \text{II.50}$$

On tire $\varnothing_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (II.44) et on le remplace dans l'équation (II.50) :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad \text{II.51}$$

En fusionnant l'équation (II.47) avec (II.45) on aura :

$$\begin{cases} \varnothing_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M.V_s}{\omega_s.L_s} \\ \varnothing_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad \text{II.52}$$

En fusionnant l'équation (II.52) avec (II.44) on aura :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r.I_{dr} + \frac{d}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \frac{d}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M.V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{II.53}$$

Après la transformation de Laplace, on aura :

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) s \right] I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M.V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{II.54}$$

L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ est minime. En revanche le terme $g \frac{M.V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation, son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage, le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

A travers les deux équations (II.50) et (II.54). On aura le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler Figure (II.19).

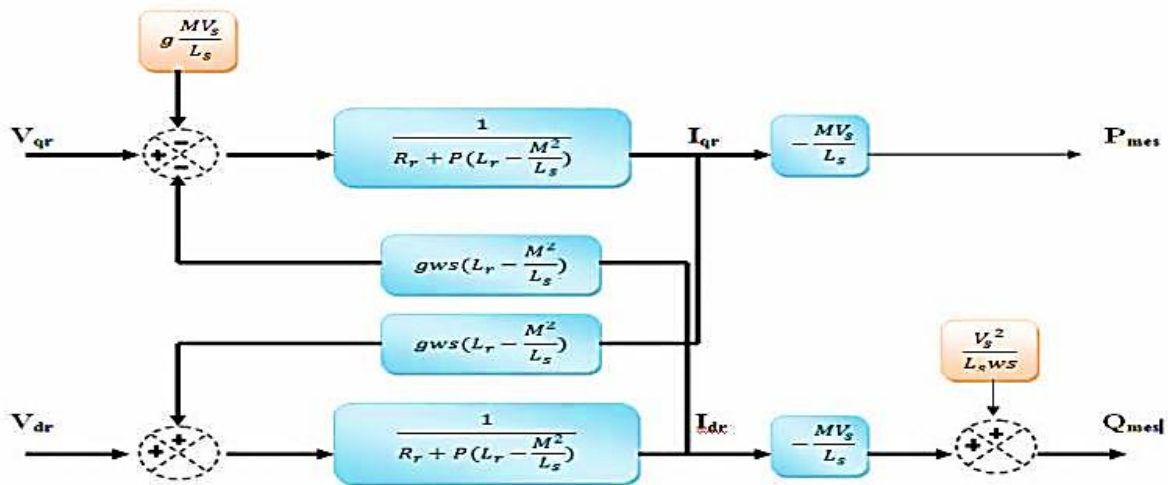


Figure II- 19 : Schéma bloc de la MADA à réguler

II.6.2. 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.

La figure suivante représente le schéma bloc de cette commande [27] :

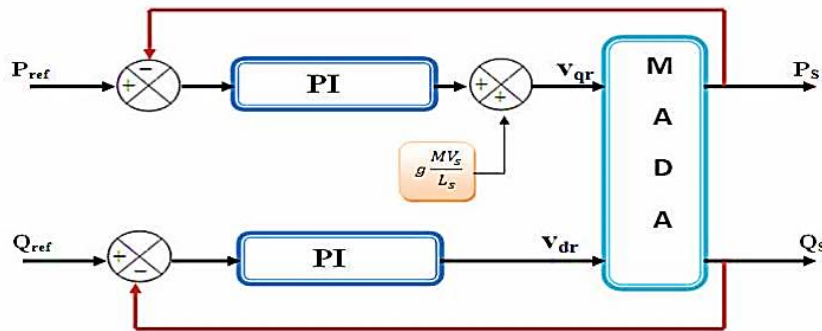


Figure II- 20 : Schéma bloc de la commande vectorielle directe

II.6.3. Commande vectorielle indirecte

Cette méthode permet la régulation indirecte des courants rotoriques qui sont déterminés à partir des puissances de références, en suite dans un deuxième sous-système on détermine les tensions rotoriques à partir des courants rotoriques. Cette technique est utilisée avec deux méthodes [28].

II.6.3.a. Commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance

Cette méthode consiste à réguler les courants rotoriques par une boucle de régulations. Les valeurs de référence sont imposées par les puissances actives et réactives fixées à des valeurs désirées. Les régulateurs dans ce cas sont déterminés de la même façon que dans le cas de la régulation directe [8].

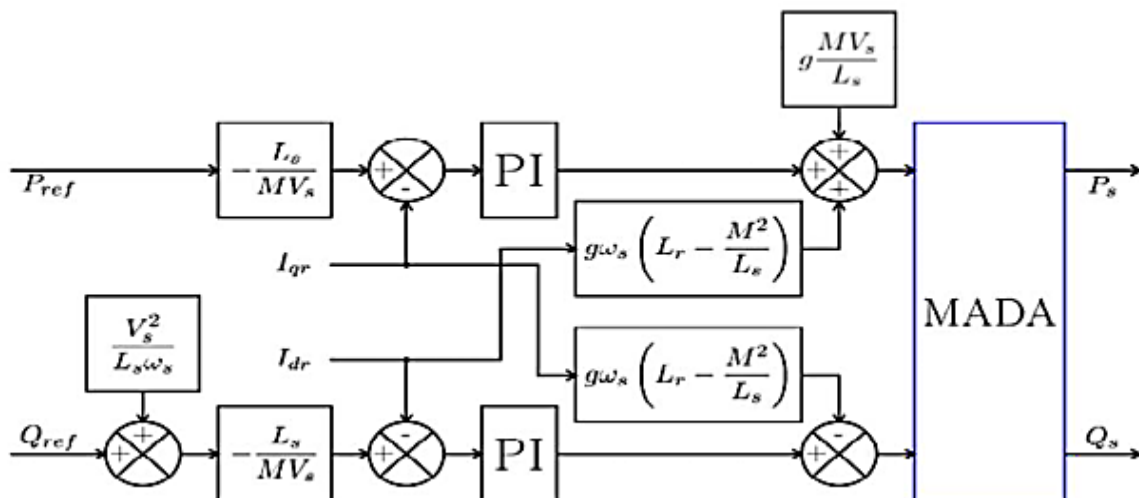


Figure II- 21 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance

II.6.3.b. Commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance :

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 rotoriques suivant la figure (II.22), 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 [8].

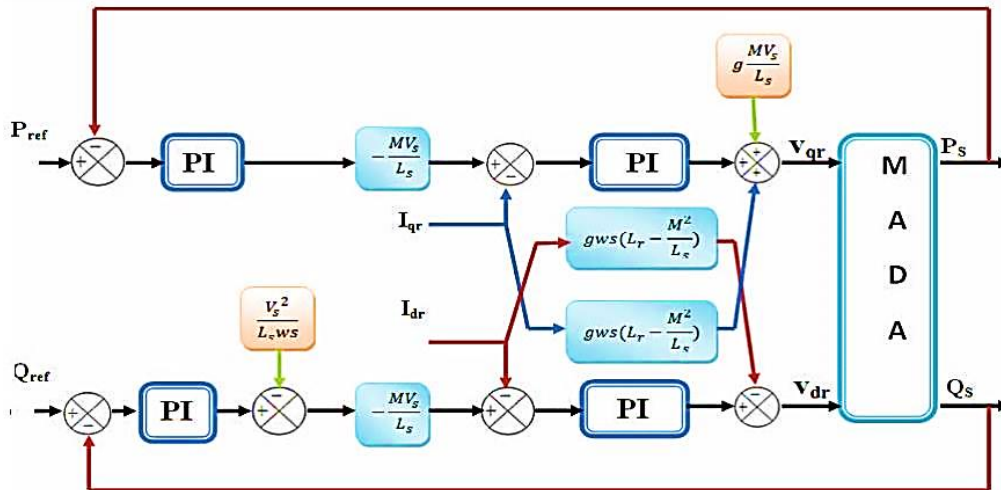


Figure II- 22 : Schéma bloc de la Commande indirecte avec boucle de puissance

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.

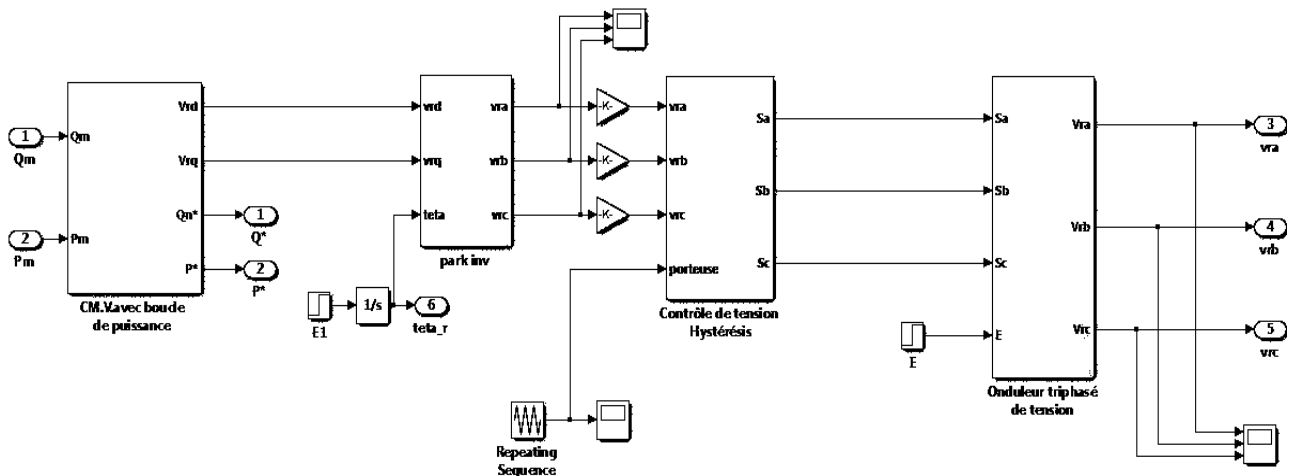
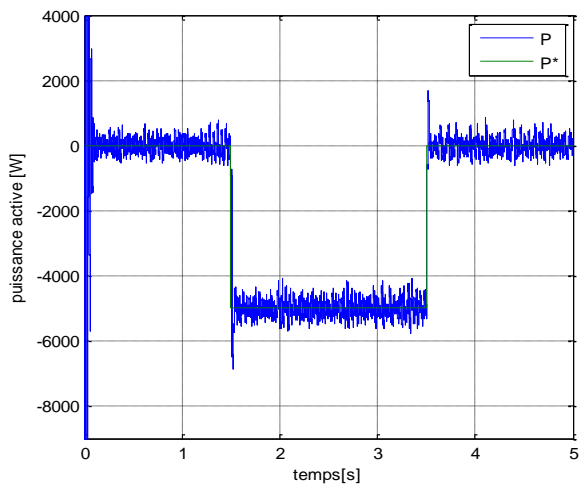


Figure II- 23 : Commande indirecte avec boucle de puissance sous MATLAB

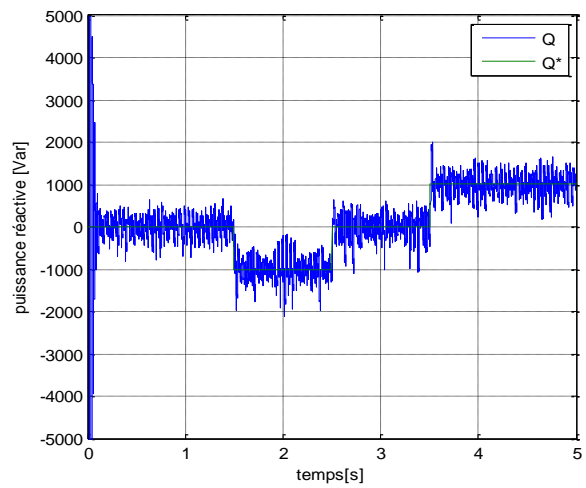
II.6.3.c. Résultats de simulation :

Les figures affichées ci-dessous représentent les résultats de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance liée au champ statorique réalisées sous environnement MATLAB/SIMULINK.

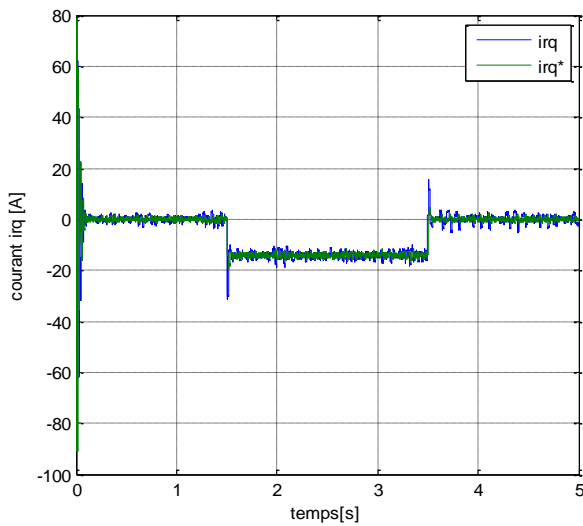
Les puissances actives et réactives ont été imposées par des échelons, et la régulation a été faite en utilisant un régulateurs classique (PI).



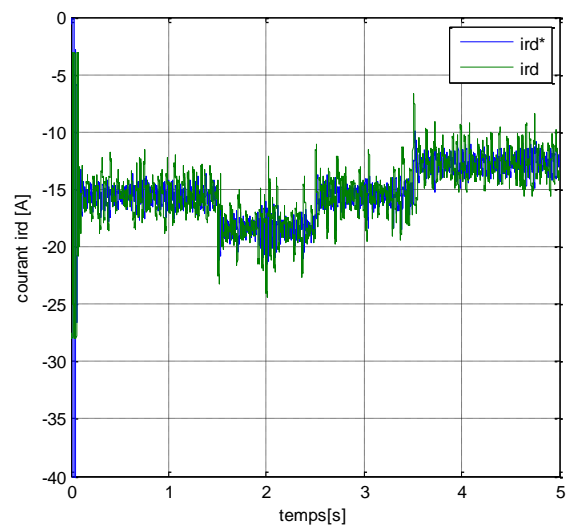
[a]



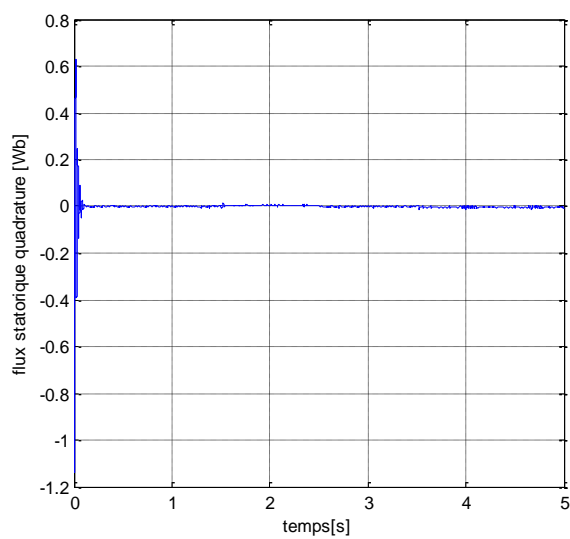
[b]



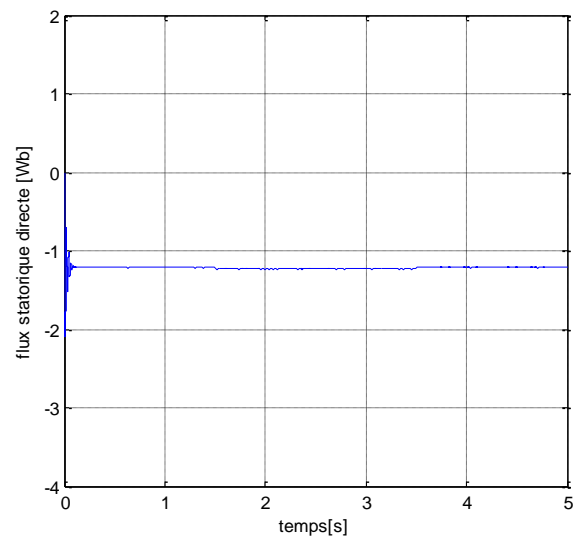
[c]



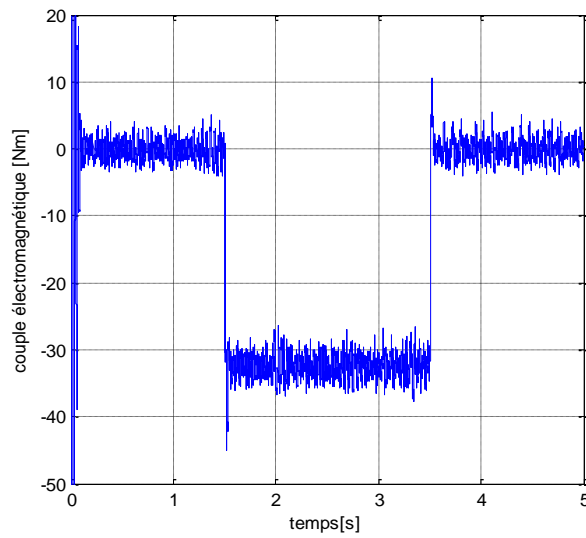
[d]



[e]



[f]



[g]

Figure II- 24 : résultats de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance

Le but est de contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. On peut remarquer que le but à bien été atteint, aussi. Le couple (figure II.24.g) prend la même allure que celle de la puissance active (figure II.24.a), à cause de la variable commune entre eux (i_{rq}) (figure II.24.c), comme le courant (i_{rd}) (figure II.24.d) qui a la même allure que la puissance réactive (figure II.24.b) imposée par des échelons puise que cette dernière (puissance réactive) est en fonction de ce courant (i_{rd}), ainsi la valeur du flux statorique quadrature (figure II.24.e) est nulle à cause du dimensionnement effectué précédemment (lié au champ statorique).

II.7 Modélisation du convertisseur coté réseau (CCR) :

Le convertisseur côté réseau se situe entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre R, L, le CCR est constitué de trois cellules de commutation de deux transistors complémentaires antiparallèles avec des diodes, représentées par des interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture. Son principal rôle est de maintenir un facteur de puissance unitaire et de garder la tension du bus continu constante à une valeur de consigne imposée [21], [29].

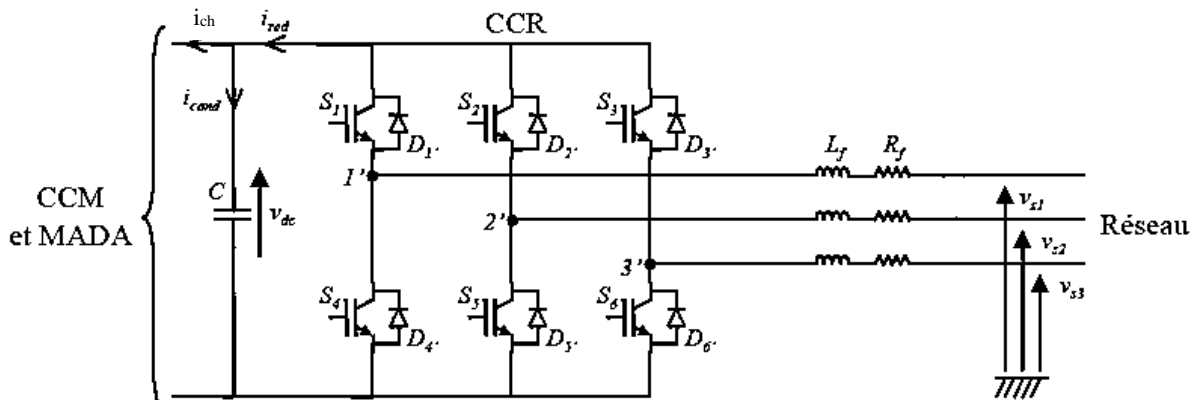


Figure II- 25 : représentation du convertisseur côté réseau

II.7.1. Modèle du redresseur MLI :

L'équation de tension d'un réseau triphasé équilibré sans neutre peut s'écrire comme suite :

$$\bar{e} = \bar{v}_f + \bar{v}_n \quad \text{II.55}$$

Avec :

\bar{e} : Tension de phase du réseau

\bar{v}_f : Chute de tension au niveau du filtre

\bar{v}_n : Tension de phase du redresseur

Ainsi la tension de phase d'entrée du redresseur peut s'écrire comme :

$$\bar{v}_n = U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad \text{II.56}$$

A partir des deux dernières équations, l'entrée du redresseur (côté alternatif) peut s'écrire comme :

$$L_f \frac{di_n}{dt} + R_f i_n = e_n - U_{dc} \left(S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad \text{II.57}$$

Avec les tensions du réseau sont exprimés par :

$$\begin{cases} v_{s1} = E_{\max} \sin(\omega t) \\ v_{s2} = E_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{s3} = E_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{II.58}$$

Le courant redressé (sortie du redresseur) est égal à la somme du produit des courants de chaque phase par leurs états de commutation[29], il est représenté par l'équation suivante :

$$i_{red} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c \quad \text{II.59}$$

II.7.2. Modélisation du bus continu :

L'équation suivante représente le courant traversant le condensateur i_{dc} :

$$i_{dc} = i_{red} - i_{ch} \quad \text{II.60}$$

Avec :

i_{red} : Courant redressé

i_{ch} : Courant de charge

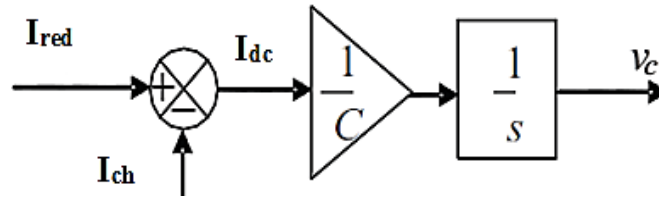


Figure II- 26 : Schéma bloc du bus continu

II.7.3. La régulation du bus continu :

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur générant la référence du courant à injecter dans le condensateur [17].

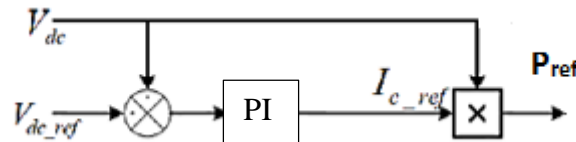


Figure II- 27 : Schéma de régulation du bus continu

La littérature et les équations employées précédemment sont représentées dans la figure suivante :

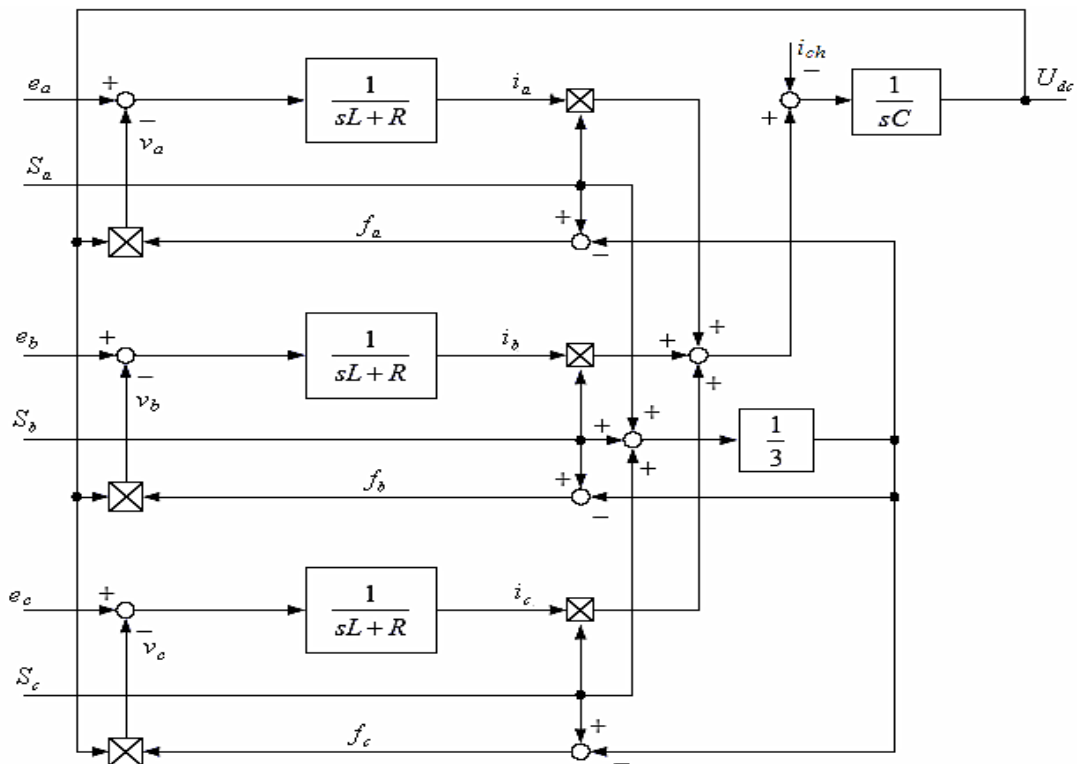


Figure II- 28 : Schéma bloc du redresseur sous MATLAB

II.7.4. Contrôle des courants

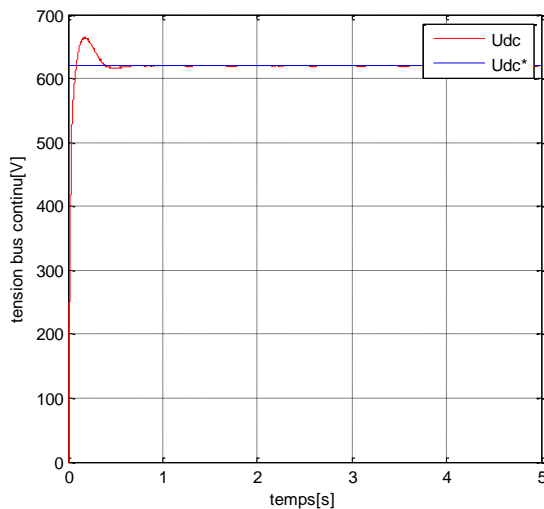
Le contrôle du courant est effectué par la comparaison entre les courants instantanés mesurés et des courants de références d'allure sinusoïdale dont l'amplitude I_{\max} est évaluée par le réglage du bus continu et le bloc PLL (Phase Lock Loop) qui permet d'estimer avec précision la fréquence et la tension du réseau[30]. Une fois la référence obtenue, l'erreur entre la valeur mesurée et la référence est évaluée par régulateur à hystérésis pour avoir les séquences de commutation[29].

Les courants de références sont exprimés par :

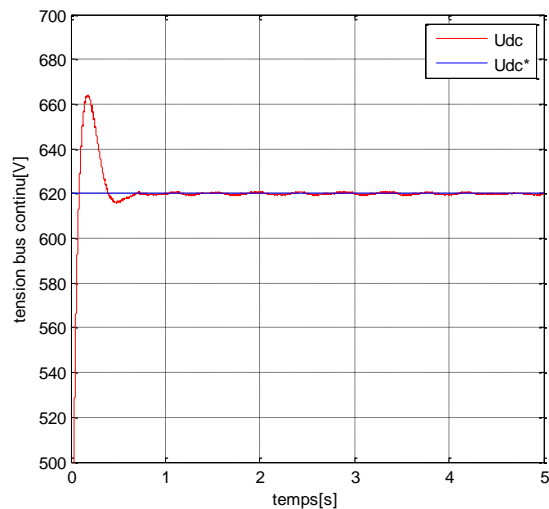
$$\begin{cases} i_{a_ref} = I_{\max} \sin(\omega t) \\ i_{b_ref} = I_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{c_ref} = I_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{II.61}$$

II.7.5. Résultats de simulation :

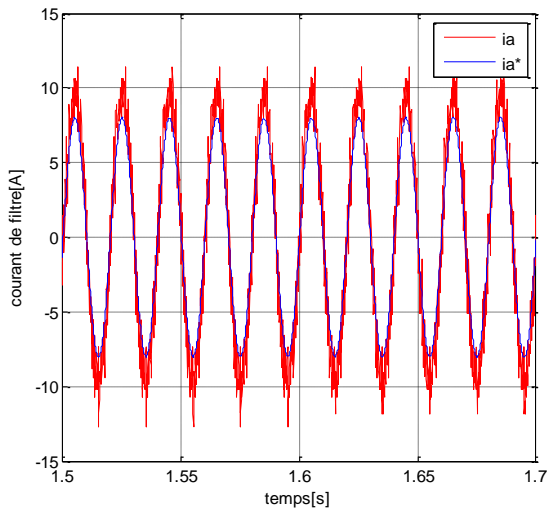
La figure II-29 montre les résultats du convertisseur MLI (CCR) relié à un réseau triphasé supposé équilibré simulé sous environnement MATLAB/SIMULINK.



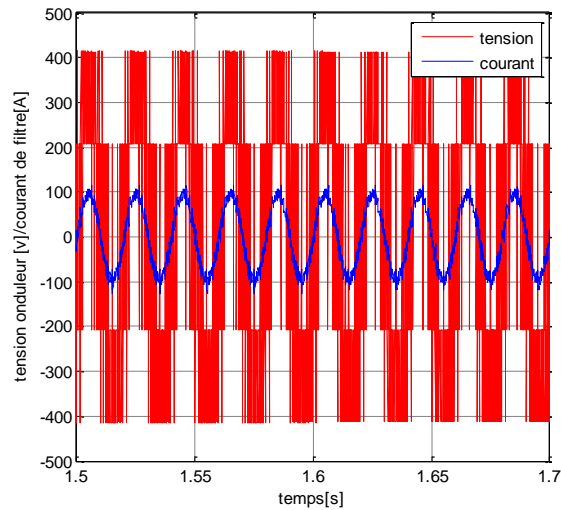
[a]



[b]



[c]



[d]

Figure II- 29 : résultats de simulation du convertisseur coté réseau

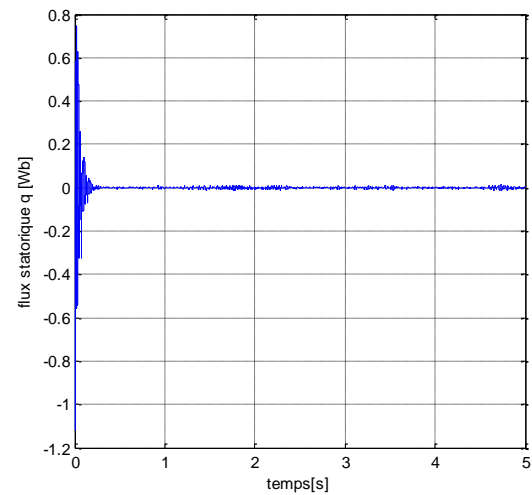
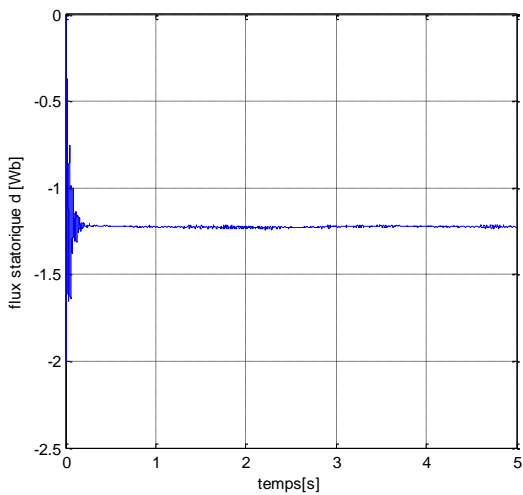
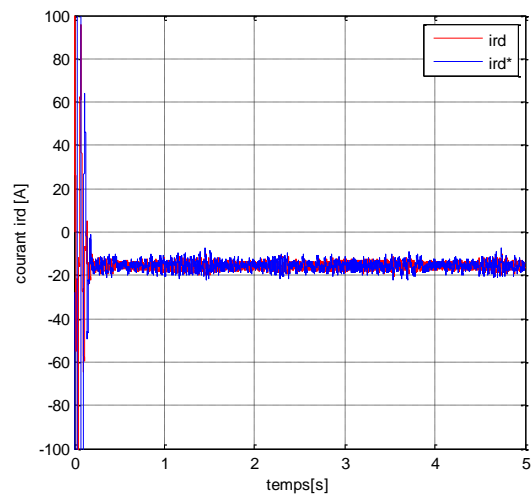
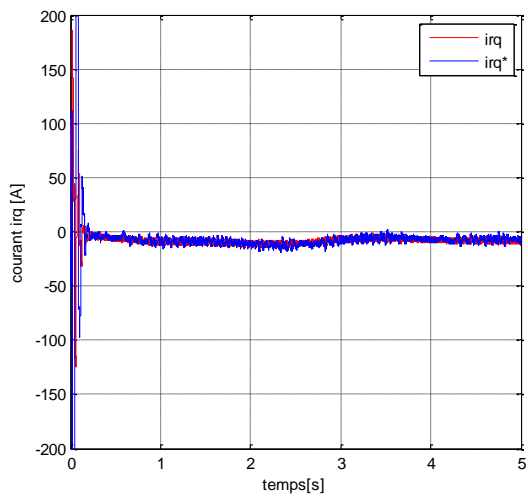
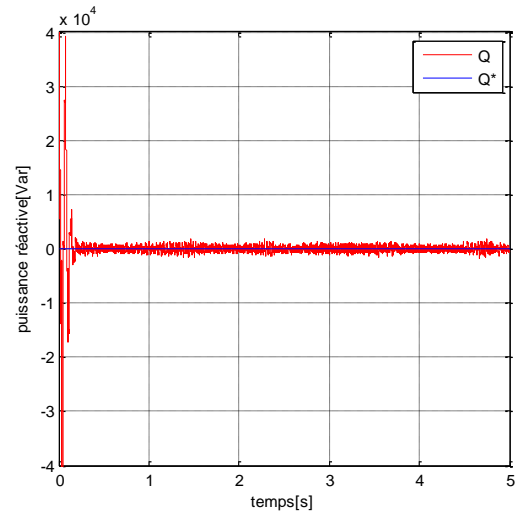
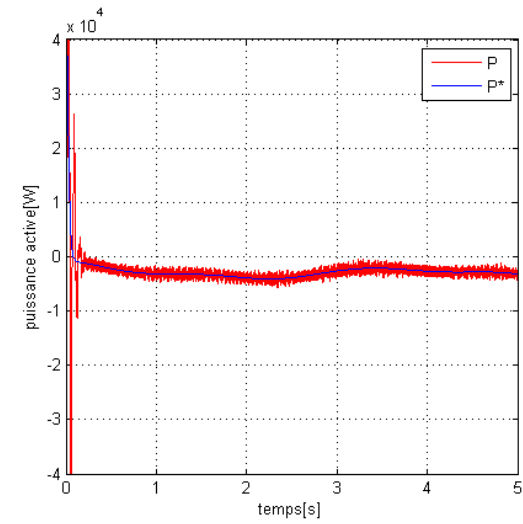
On peut remarquer que la tension du bus continu suit parfaitement sa consigne (620 V), avec présence des performances dynamiques en utilisant un régulateur classique (PI), (le dimensionnement d'un régulateur PI est représenté dans l'annexe B).

Le réglage de la tension du bus continu va nous permettre dans la suite de notre étude, d'assurer le transfert d'énergie entre le réseau et la machine. Cependant le réglage du courant a été fait par un régulateur à hystérésis (figure II-29.c) afin de garder les courants du filtre sous une forme sinusoïdale. Dans la figure (II-29. d) représente la tension de sortie du redresseur avec le courant du filtre multiplié par 10 afin de bien observer que ces deux grandeurs sont en phase.

II.8 Résultats de simulation de la chaîne complète et interprétation :

Les résultats ci-dessus ont été obtenus sous environnement MATLAB/SIMULINK, en utilisant une MADA de 7.5KW et une turbine de 10 KW dont les paramètres sont donnés dans l'annexe A.

Le système fonctionnant dans la zone II, donc une stratégie de commande de maximisation de puissance (MPPT) était proposée pour l'appliquer à la turbine éolienne afin de générer la puissance active de référence pour la MADA, et la puissance réactive égale à zéro.



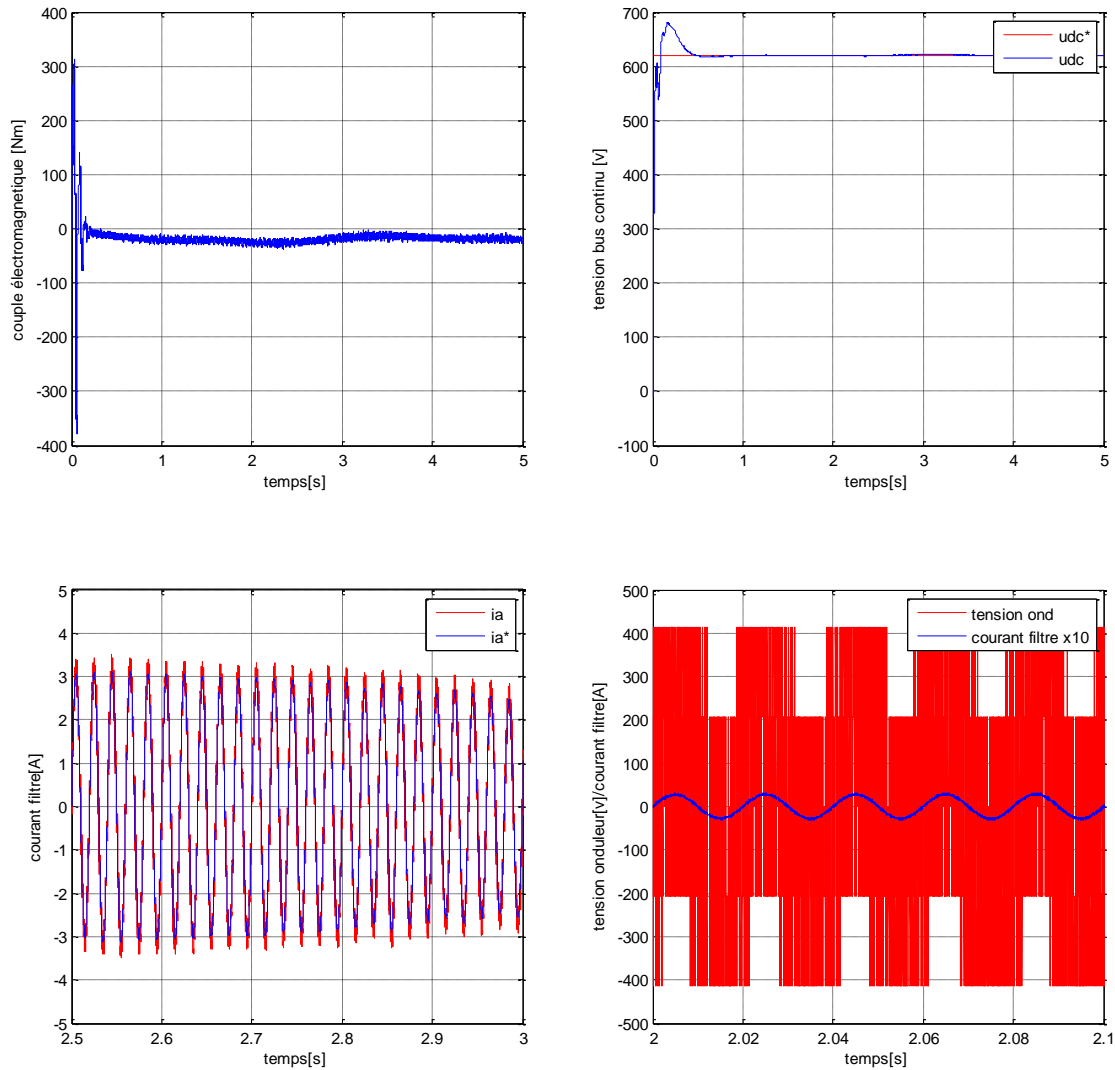


Figure II- 30 : résultats de la chaîne complète

D'après les résultats obtenus, on remarque que les grandeurs mesurées suivent leurs valeurs de consigne après l'application de la commande vectorielle, comme on peut observer les résultats de régulation du courant du filtre qui suit sa référence.

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord donné la modélisation du système de conversion d'énergie éolienne. Avec une modélisation détaillée de la turbine éolienne avec la stratégie MPPT appliquée à cette dernière, ensuite, modélisé la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park, tout en lui appliquant une commande dite commande vectorielle, dans le but de contrôler indépendamment les puissances instantanées actives et réactives. Enfin nous avons abordés la modélisation des convertisseurs (CCR et CCM).

III.1 Introduction

Pour le contrôle des puissances instantanées actives et réactives, nous avons élaboré précédemment une commande dite commande vectorielle (commande à flux orienté), elle consiste à commander les puissances actives et réactives indirectement à travers des boucles de régulations de courants rotoriques via des régulateurs classiques (PI). Cette technique avait un inconvénient qui est la dépendance des variations des paramètres de la machine, donc, afin d'éviter le problème, une nouvelle technique de commande est née, connue sous le nom de Commande Directe de Puissance ou DPC (direct power control), ainsi on aura une réponse des puissances rapides et robustes [20], [31], [32].

La commande directe des puissances a été proposée par Noguchi en 1998 ainsi que plusieurs autres configurations ont été développées par Malinowski. La commande DPC est une technique qui permet de remplacer les blocs de modulation et les boucles de régulation par une table de commutation, dont les entrées sont les erreurs obtenues entre la valeur mesurée et celle de référence et sa sortie représente des séquences d'ordres de commutation convertisseurs à MLI, le but du contrôle est d'assurer le prélèvement des courants sinusoïdaux tout en maintenant le facteur de puissance unitaire [11], [33], [34].

Pour la suite de notre sujet, nous nous concentrons sur la commande DPC classique basée sur une table de commutation établie. Dans un premier lieu, la commande va être appliquée au convertisseur côté réseau (CCR), ensuite au convertisseur côté machine (CCM). Enfin, nous allons raccorder la chaîne complète.

Les différentes stratégies évoquées précédemment pour la commande DPC sont :

➤ **Une stratégie utilisant le vecteur de tension** : cette stratégie est basée sur le positionnement du vecteur de tension du référentiel (α, β) . Dans notre sujet cette dernière est appliquée au convertisseur côté réseau « CCR »

➤ **Une stratégie utilisant le vecteur du flux virtuel** : elle se base principalement sur le calcul d'un flux virtuel, ainsi elle est appliquée au convertisseur côté machine « CCM »

III.2 Principe général de la commande DPC :

Le principe global de la commande DPC, basé sur une table de commutation est appliqué au convertisseur à MLI triphasé afin de contrôler indépendamment les puissances instantanées actives et réactives.

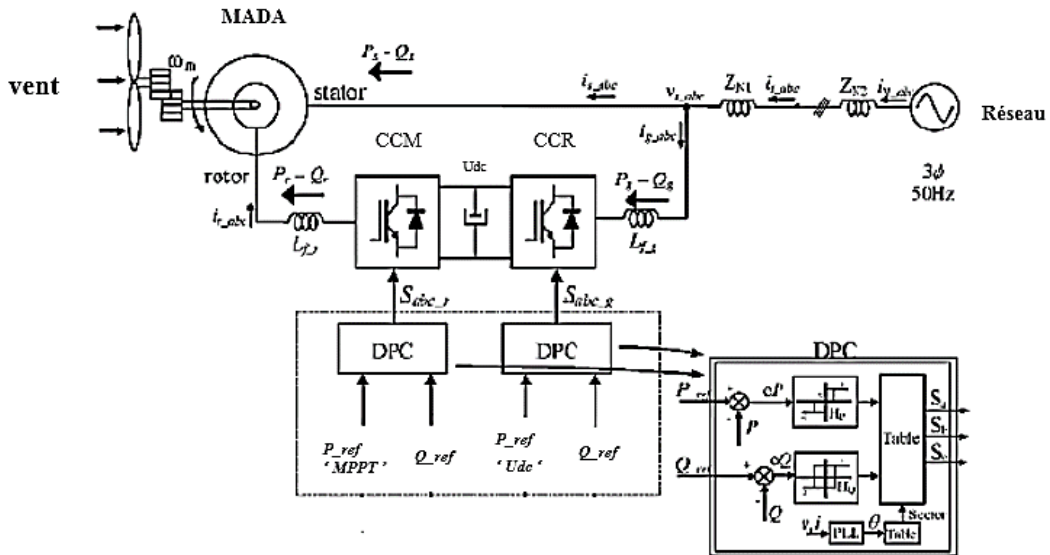


Figure III- 1: Schéma global du système éolien avec commande DPC

III.3 DPC appliquée au convertisseur côté réseau :

III.3.1 Principe

Avec la position angulaire du vecteur de tension du réseau $e_{\alpha\beta}$, et en utilisant des régulateurs à hystérésis à deux niveaux pour chacune des puissances instantanées qui fournissent les erreurs numériques e_p , e_q entre les valeurs réelles et les valeurs de références des puissances actives et réactives, on aura à la sortie de la table de commutation, une séquence des ordres de commutation (S_a , S_b , S_c) des semi-conducteurs constituant le convertisseur à MLI (CCR). L'intérêt de la commande, est d'assurer un transfert d'énergie constant entre le réseau et la machine dans les deux sens avec un contrôle découplé des puissances actives et réactives, par la suite, la valeur de référence de la puissance active est délivrée à partir de la régulation de la tension du bus continu via un régulateur classique (PI), et la référence de la puissance réactive est supposée de l'extérieur et nulle pour avoir un facteur de puissance unitaire [11], [29], [32].

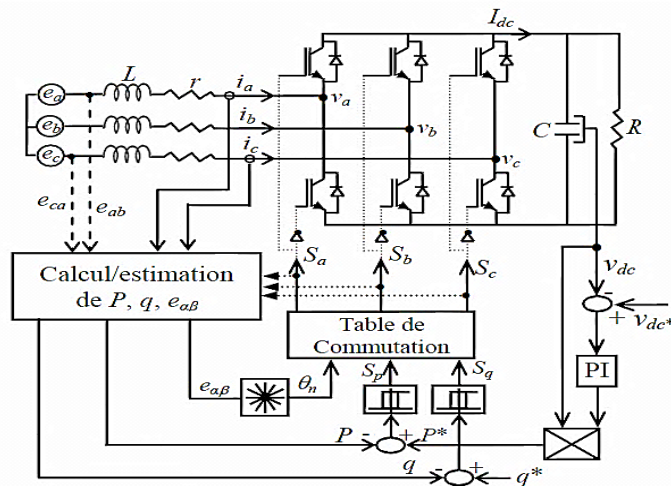


Figure III- 2: Schéma de la Commande DPC côté réseau

La séquence de commutation (Sa, Sb, Sc) représente un vecteur de tension appliqué au convertisseur à MLI. Chaque interrupteur prend soit la valeur ‘1’ ou ‘0’, donc on obtient huit vecteurs de tension. Deux d’entre eux sont nuls (V_0, V_7), et les six autres c’est des vecteurs non nuls ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$), le plan (α, β) du positionnement du vecteur de tension du réseau est divisé en six secteurs, et pour un contrôle plus précis, chaque secteur est divisé en deux secteurs, c’est-à-dire que le plan est divisé en 12 secteurs égaux déphasés de 30° [33]–[35].

La formule suivante permet la détermination de l’emplacement du vecteur de tension du réseau à partir des deux composantes e_α et e_β :

$$\theta = \arctan\left(\frac{e_\beta}{e_\alpha}\right) \tag{III.1}$$

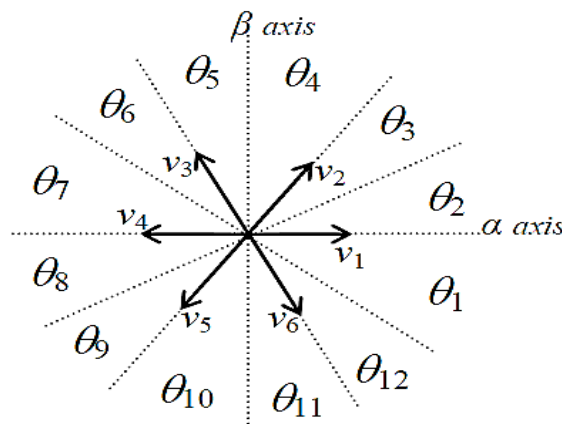


Figure III- 3: Représentation des secteurs

III.3.2 Les régulateurs à hystérésis :

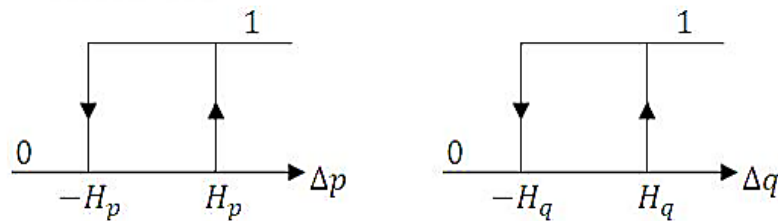


Figure III- 4: Comparateurs à hystérésis

Pour la régulation des puissances instantanées actives et réactives, on propose des régulateurs à hystérésis à deux niveaux, L'un est influencé par l'erreur $e_p = P^* - P$ pour la puissance active. L'autre est influencé par l'erreur $e_q = Q^* - Q$ pour la puissance réactive. Les erreurs numériques peuvent prendre une valeur, soit ‘1’ pour l’augmentation de la grandeur contrôlée, soit ‘0’ pour une diminution de la grandeur contrôlée [33], [36].

$$\begin{aligned} & \text{Si } P^* - P \geq hP \text{ SP} = 1, \text{ Si } P^* - P \leq -hP \text{ SP} = 0 \\ & \text{Si } Q^* - q \geq hQ \text{ SQ} = 1, \text{ Si } Q^* - q \leq -hQ \text{ SQ} = 0 \end{aligned} \tag{III.2}$$

III.3.3 L'estimation des puissances :

Il y a trois méthodes pour calculer la puissance active et réactive :

- ✓ Par la mesure des courants et des tensions ;
- ✓ Par estimation des tensions du réseau et mesure des courants ;
- ✓ Par estimation du flux virtuel et mesure des courants.

III.3.3.a Calcul des puissances par mesure des tensions et des courants :

Le calcul des puissances instantanées est défini comme suite :

$$\begin{aligned} p &= \text{Re}(\bar{e} \cdot i^*) \\ q &= \text{Im}(\bar{e} \cdot i^*) \end{aligned} \quad \text{III.3}$$

Ainsi les puissances actives et réactives sont données par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} p &= e_b i_b + e_b i_b + e_c i_c \\ q &= \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_b - e_c) i_a + (e_c - e_a) i_b + (e_a - e_b) i_c] \end{aligned} \quad \text{III.4}$$

Cette technique est connue par l'inconvénient du surcoût à cause de l'utilisation du capteur de tension, pour éviter le problème on peut appliquer les techniques suivantes [29] :

- Par estimation de la tension du réseau
- Par estimation du flux virtuel

III.3.3.b Calcul des puissances par estimation de tension :

Cette technique repose sur l'estimation de la tension qui est définie comme suit :

$$\hat{e}_{a,b,c} = U_{dc} \cdot S_{a,b,c} + L \frac{di_{a,b,c}}{dt} \quad \text{III.5}$$

$U_{dc} \cdot S_{a,b,c}$: représente la tension du convertisseur.

$L \frac{di_{a,b,c}}{dt}$: La tension du filtre de raccordement avec le réseau.

Les puissances actives et réactives sont données comme suit :

$$\begin{aligned} p &= U_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) + L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) \\ q &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ -U_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)] + 3L \left(\frac{di_a}{dt} i_c + \frac{di_c}{dt} i_a \right) \right\} \end{aligned} \quad \text{III.6}$$

III.3.3.c Calcul des puissances par estimation du flux virtuel :

On peut calculer les puissances instantanées à partir d'un flux virtuel qui est généré par l'intégration de la tension du réseau (à partir de la tension du filtre et du convertisseur)[11], [32], [37].

Ainsi les composantes du flux virtuel dans le plan α, β sont :

$$\begin{cases} \phi_\alpha = \int e_\alpha dt = \int \left(v_\alpha - L \frac{di_\alpha}{dt} \right) dt \\ \phi_\beta = \int e_\beta dt = \int \left(v_\beta - L \frac{di_\beta}{dt} \right) dt \end{cases} \quad \text{III.7}$$

ϕ_α, ϕ_β : les composantes du flux virtuel.

V_α, V_β : les composantes du vecteur de tension du convertisseur.

Avec

La tension du réseau dans le plan α, β est :

$$e_{\alpha,\beta} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad \text{III.8}$$

En introduisant III.8 dans III.7, le flux virtuel dans le plan α, β devient :

$$\begin{cases} \phi_\alpha = \int \left(\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_a - 0.5(S_b + S_c)) \right) dt - Li_\alpha \\ \phi_\beta = \int \left(\sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} (S_b - S_c) \right) dt - Li_\beta \end{cases} \quad \text{III.9}$$

On obtient la tension à partir du flux estimé :

$$\hat{e} = \frac{d}{dt} \phi = \frac{d\phi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \phi e^{j\omega t} = \frac{d\phi}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \phi \quad \text{III.10}$$

$\hat{\phi}$: Le vecteur du flux estimé.

ϕ : L'amplitude du flux estimé.

On a les puissances instantanées sont données comme suit :

$$\begin{cases} p = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \\ q = e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta \end{cases} \quad \text{III.11}$$

Pour des tensions presque sinusoïdales et équilibrées, les dérivés de l'amplitude du flux sont nuls [23], donc les puissances sont représentées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} p = \omega(\phi_\alpha i_\beta - \phi_\beta i_\alpha) \\ q = \omega(\phi_\alpha i_\alpha - \phi_\beta i_\beta) \end{cases} \quad \text{III.12}$$

III.3.4 L'analyse de la variation de la puissance :

Pour analyser la variation de puissance, il faut analyser la variation de courant par ce que, lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature [23].

La variation de courant est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$e = v + ri + L \frac{di}{dt} \quad \text{III.13}$$

Les courants absorbés par le convertisseur MLI concerné (CCR) dans le plan α, β sont définis par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = \frac{1}{L}(e_\alpha - v_\alpha - ri_\alpha) \\ \frac{di_\beta}{dt} = \frac{1}{L}(e_\beta - v_\beta - ri_\beta) \end{cases} \quad \text{III.14}$$

Ainsi, on remarque que la variation des composantes du courant peut être contrôlée par la tension du réseau $e_{\alpha, \beta}$, le vecteur de tension du redresseur $v_{\alpha, \beta}$ (vecteur de commande) et du courant actuel, la résistance des bobines du couplage peut être négligée [33], [36].

Dans une période de commutation T_s , à partir de l'équation précédente, la variation des composantes du courant à la fin d'une période de commutation est représentée sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Delta i_\alpha = i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k) = \frac{T_s}{L}(e_\alpha(k) - v_\alpha(k)) \\ \Delta i_\beta = i_\beta(k+1) - i_\beta(k) = \frac{T_s}{L}(e_\beta(k) - v_\beta(k)) \end{cases} \quad \text{III.15}$$

Si la période de commutation est très petite devant la période de la tension du réseau, la variation du vecteur des tensions durant une période de commutation peut être considérée négligeable, c'est-à-dire que : $e_{\alpha, \beta}(k+1) = e_{\alpha, \beta}(k)$. [11]

Le calcul des puissances instantanées dans le plan α, β est donné par les formules suivantes :

$$\begin{cases} p = e_{\alpha} i_{\alpha} + e_{\beta} i_{\beta} \\ q = e_{\beta} i_{\alpha} - e_{\alpha} i_{\beta} \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Donc les variations des puissances instantanées sont définies comme suit :

$$\begin{cases} \Delta p = e_{\alpha}(k) \Delta i_{\alpha} + e_{\beta}(k) \Delta i_{\beta} \\ \Delta q = e_{\beta}(k) \Delta i_{\alpha} + e_{\alpha}(k) \Delta i_{\beta} \end{cases} \quad \text{III.17}$$

En introduisant l'équation (III.15) dans l'équation précédente on obtient :

$$\begin{cases} \Delta p = \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k)^2 + e_{\beta}(k)^2] - \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k) \cdot v_{\alpha}(k) + e_{\beta}(k) v_{\beta}(k)] \\ \Delta q = \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k) \cdot v_{\beta}(k) - e_{\beta}(k) \cdot v_{\alpha}(k)] \end{cases} \quad \text{III.18}$$

De cette équation on remarque que la variation des puissances dépend de la tension du réseau $e_{\alpha, \beta}$ et de la tension appliquée au convertisseur (CCR) $v_{\alpha, \beta}$, par suite pour chacun des huit vecteurs de commandes possibles, et à une position donnée du vecteur $e_{\alpha, \beta}$, une variation des puissances actives et réactives est atteinte. Pour $i = (0, 1, 2, \dots, 6)$ les variations de ces puissances instantanées sont données par les expressions suivantes [11]:

$$\begin{cases} \Delta p_i = \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k)^2 + e_{\beta}(k)^2] - \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k) \cdot v_{\alpha i}(k) + e_{\beta}(k) v_{\beta i}(k)] \\ \Delta q_i = \frac{T_s}{L} [e_{\alpha}(k) \cdot v_{\beta i}(k) - e_{\beta}(k) \cdot v_{\alpha i}(k)] \end{cases} \quad \text{III.19}$$

Le vecteur de tension du réseau dans le plan α, β peut être exprimé par sa position angulaire qui est :

$$\begin{cases} e_{\alpha} = \|e_{\alpha, \beta}\| \cdot \cos(\theta) \\ e_{\beta} = \|e_{\alpha, \beta}\| \cdot \sin(\theta) \end{cases} \quad \text{III.20}$$

Avec

$$\begin{cases} \Delta p_i = \frac{T_s}{L} \|e_{\alpha, \beta}\|^2 - \frac{T_s}{L} \|e_{\alpha, \beta}\| \cdot [\cos(\theta) \cdot v_{\alpha i} + \sin(\theta) \cdot v_{\beta i}] \\ \Delta q_i = \frac{T_s}{L} \|e_{\alpha, \beta}\| \cdot [\cos(\theta) \cdot v_{\beta i} + \sin(\theta) \cdot v_{\alpha i}] \end{cases} \quad \text{III.21}$$

Les valeurs des vecteurs de tension du redresseur sont données dans le tableau suivant :

Tableau III- 1 : Valeurs de tension du convertisseur coté réseau

v_a	v_b	v_c	v_{ai}	$v_{\beta i}$	$\overline{v_{ai}}$	$\overline{v_{\beta i}}$
0	0	0	0	0	0	0
$(2/3)U_{dc}$	$(-1/3)U_{dc}$	$(1/3)U_{dc}$	$\sqrt{(2/3)}U_{dc}$	0	1	0
$(1/3)U_{dc}$	$(1/3)U_{dc}$	$(-2/3)U_{dc}$	$(1/\sqrt{6})U_{dc}$	$(1/\sqrt{2})U_{dc}$	1/2	$\sqrt{3}/2$
$(-1/3)U_{dc}$	$(2/3)U_{dc}$	$(-1/3)U_{dc}$	$(-1/\sqrt{6})U_{dc}$	$(1/\sqrt{2})U_{dc}$	-1/2	$\sqrt{3}/2$
$(-2/3)U_{dc}$	$(1/3)U_{dc}$	$(1/3)U_{dc}$	$(-\sqrt{2/3})U_{dc}$	0	-1	0
$(-1/3)U_{dc}$	$(2/3)U_{dc}$	$(2/3)U_{dc}$	$(-1/\sqrt{6})U_{dc}$	$(-1/\sqrt{2})U_{dc}$	-1/2	$-\sqrt{3}/2$
$(1/3)U_{dc}$	$(-2/3)U_{dc}$	$(1/3)U_{dc}$	$(1/\sqrt{6})U_{dc}$	$(-1/\sqrt{2})U_{dc}$	-1/2	$-\sqrt{3}/2$

III.3.5 Elaboration de la table de commutation :

En se basant sur le signe des sorties numériques des comparateurs à hystérésis, on détermine l'un des vecteurs appliqués au convertisseur « CCR », sachant que le vecteur de tension appliqué doit assurer, soit une augmentation, soit une diminution pour l'une des puissances actives et réactives[33].

Le tableau suivant représente l'un des vecteurs de commande appliqué pour le secteur 1 :

Tableau III- 2 : Vecteur de commande appliqué au convertisseur pour un secteur K

Secteur « S_k »		Δq	
		$Sq=1$	$Sq=0$
Δp	$Sp=1$	V_{k-2}, V_{k-3}	V_{k+2}, V_{k+3}
	$Sp=0$	V_k	V_{k-1}

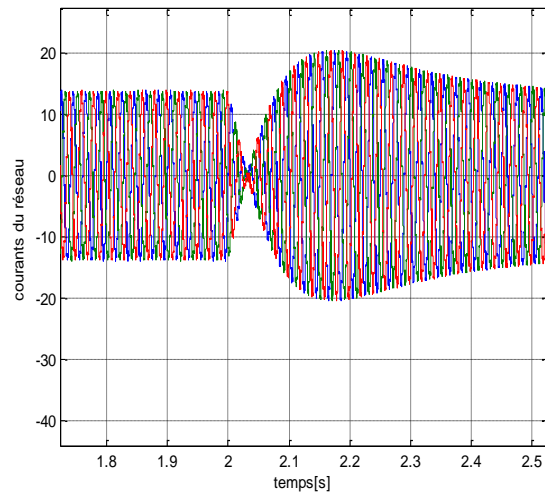
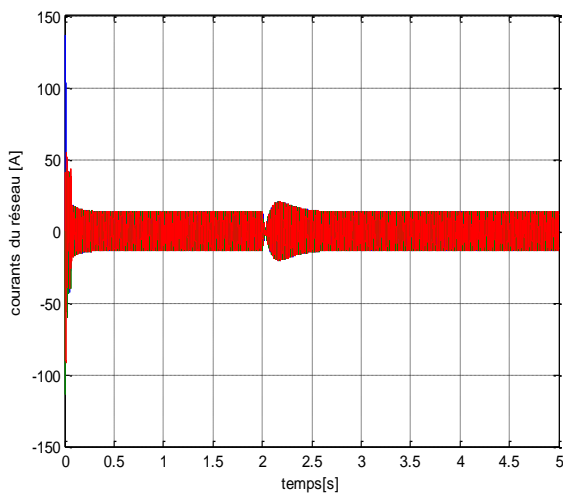
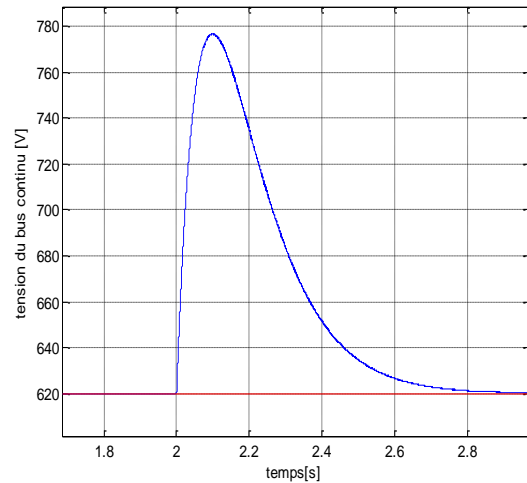
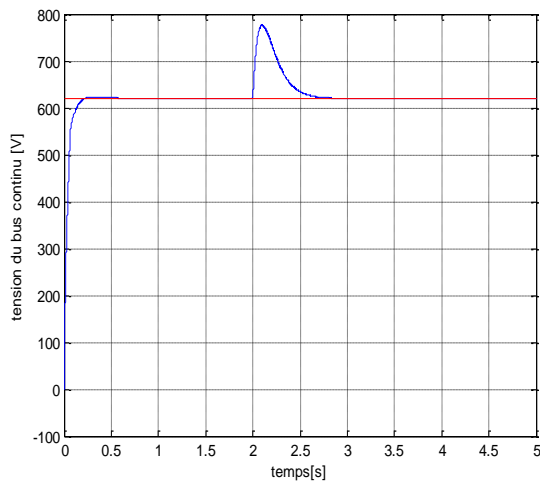
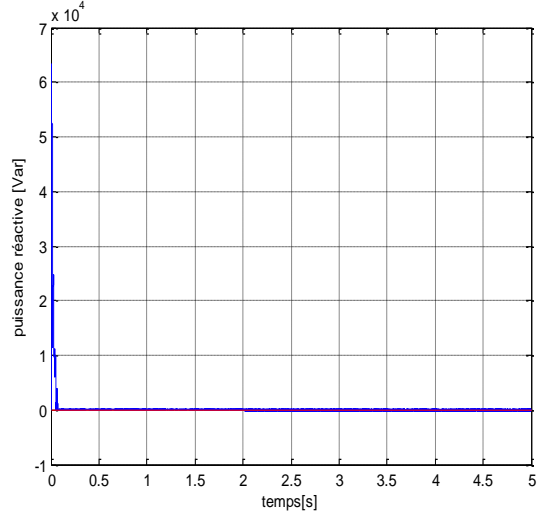
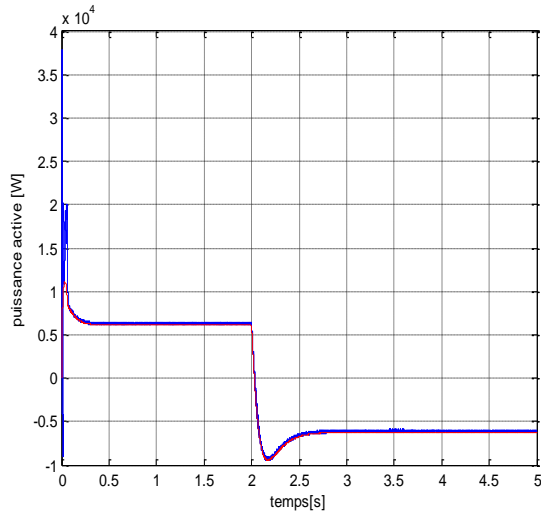
Le tableau suivant représente les vecteurs de commande appliqués au convertisseur pour tous les secteurs tout en se basant sur le tableau précédent.

Tableau III- 3 : Table de commutation de la commande DPC

S_p	S_q	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}
1	0	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5
	1	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

III.3.6 Résultat de simulation :

La commande directe de puissance est appliquée au convertisseur côté réseau triphasé CCR, elle est effectuée sous environnement MATLAB/SIMULIK.



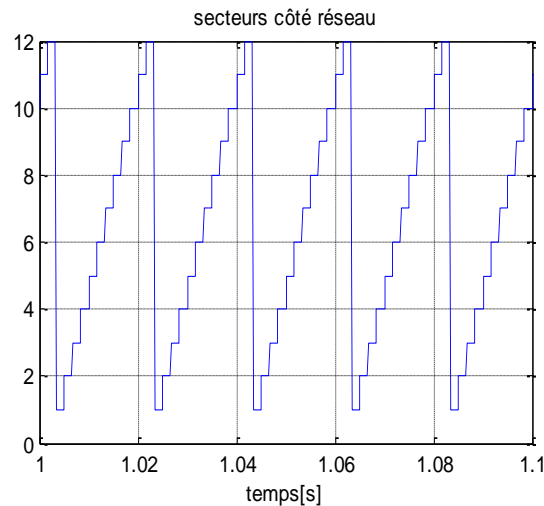


Figure III- 5: Comportement du convertisseur MLI (CCR)

Les résultats ci-dessous présentent le comportement du convertisseur MLI (CCR) lors d'un changement de mode de fonctionnement avec un inversement du sens du courant de charge.

On peut remarquer le bon asservissement des grandeurs avec la réalisation des performances du réglage (rapidité, précision, et stabilité), cependant, à l'instant $t=2s$ l'apparition d'un pic au niveau de la tension du bus continu considéré comme un régime transitoire puisque à cet instant, on a changé le mode de fonctionnement.

III.4 DPC appliquée au convertisseur côté machine :

La commande DPC suit le même principe utilisé pour la commande DTC (contrôle direct du couple), mais les principales grandeurs à contrôler sont la puissance active et réactive au lieu du couple électromagnétique et le flux rotorique[20], [38].

Le principe est effectué par la sélection des ordres de commutations des semi-conducteurs constituant le convertisseur côté machine « CCM » tout en se basant sur une table de commutation, deux comparateurs à hystérésis permettent de fournir les erreurs numériques entre les valeurs réelles et mesurées des puissances actives et réactives, ainsi que sur le secteur dans lequel le vecteur du flux rotorique se trouve. Sachant que la valeur de référence de la puissance active est délivrée par la turbine à travers la commande MPPT, et la puissance réactive est maintenue nulle afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire [20], [39], [40].

La figure suivante présente le schéma de la commande DPC côté machine :

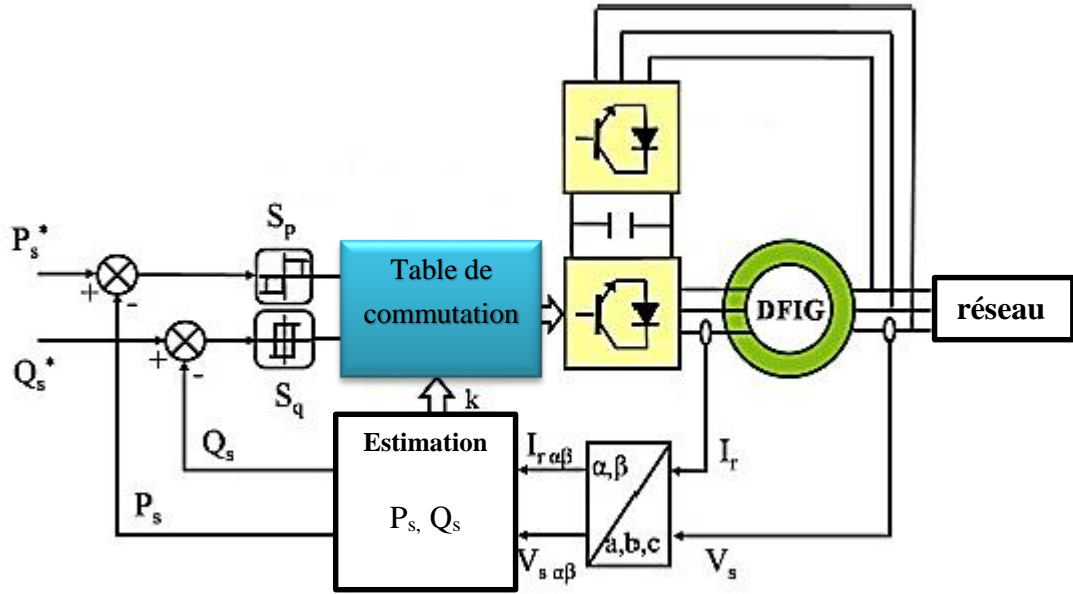


Figure III- 6: Schéma de la commande DPC côté machine

III.4.1 Avantage de la DPC côté machine :

- Réponse dynamique rapide et robuste ;
- Pas de boucles de réglages imbriquées ;
- Pas de dépendances des paramètres de la machine.

III.4.2 L'estimation de la puissance :

Trois approches sont utilisées pour l'estimation de la puissance ainsi sont représentées comme suit [20]:

1. Par capture des courants et des tensions.
2. Par estimation des tensions et capture des courants.
3. Par estimation du flux et capture des courants.

La commande est effectuée sur le model simplifié de la machine, c'est-à-dire en négligeant la résistance des enroulements statoriques.

En capturant les courants, et en estimant les puissances, cette technique prévoit le contrôle des puissances sur les enroulements statoriques, on trouve ci-dessous les relations des puissances actives et réactives en fonction du flux rotorique dans le référentiel (α, β) [20].

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} V_s \phi_{r\beta} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s}{\sigma L_s} \psi_s - \frac{V_s L_m}{\sigma L_s L_r} \phi_{r\alpha} \right) \end{cases} \quad \text{III.22}$$

D'où

$$\begin{cases} \phi_{r\alpha} = \sigma L_r i_{r\alpha} + \frac{L_m}{L_s} \psi_s \\ \phi_{r\beta} = \sigma L_r i_{r\beta} \\ |\overline{\psi_s}| = \frac{|\overline{V_s}|}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad \text{III.23}$$

En introduisant l'angle δ entre le flux statorique et celui du rotor les relations des puissances deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\psi_s| |\psi_r| \sin \delta \\ Q_s = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\sigma L_s} |\psi_s| \left(\frac{L_m}{L_r} |\psi_r| \cos \delta - |\psi_s| \right) \end{cases} \quad \text{III.24}$$

La dérivée de ces dernières, donne :

$$\begin{cases} \frac{dP_s}{dt} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_s |\psi_s| \frac{d(|\psi_r| \sin \delta)}{dt} \\ \frac{dQ_s}{dt} = \frac{3}{2} \frac{L_m \omega_s}{\sigma L_r L_s} |\psi_s| \frac{d(|\psi_r| \cos \delta)}{dt} \end{cases} \quad \text{III.25}$$

A partir des deux dernières équations on détermine que la modification de l'angle δ entre le flux statorique et celui du rotor permet de contrôler les puissances active et réactive comme le montre la figure ci-dessous.

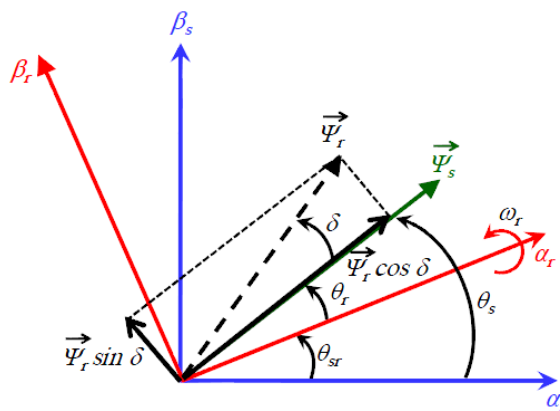


Figure III- 7 : La décomposition du flux rotorique dans les plans α, β

III.4.3 Choix du comparateur à hystérésis

Les régulateurs utilisés sont des régulateurs à hystérésis représentés dans la figure ci-dessous, ces derniers doivent contrôler l'échange des puissances actives et réactives entre la MADA et le réseau.

Les grandeurs d'entrée représentent les erreurs obtenues par la comparaison des grandeurs de référence et celles mesurées de chacune des deux puissances, ces erreurs doivent être réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis, enfin, les sorties sont des signaux numériques H_p et H_q des puissances actives et réactives respectivement qui sont utilisées pour la suite de l'étude [20], [31].

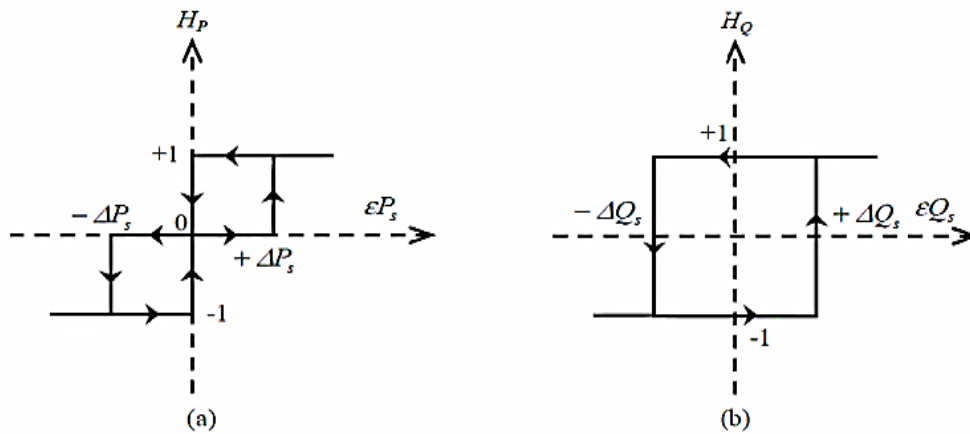


Figure III- 8 : Régulateurs à hystérésis utilisés pour la DPC côté machine

La régulation par des blocs d'hystérésis est effectuée comme suite :

$$\begin{cases}
 \text{si } \varepsilon Q_s \geq \Delta Q_s & \Rightarrow H_q = 1 \\
 \text{si } \varepsilon Q_s \leq -\Delta Q_s & \Rightarrow H_q = -1 \\
 \text{si } \varepsilon P_s \geq \Delta P_s & \Rightarrow H_p = 1 \\
 \text{si } -\Delta P_s \leq \varepsilon P_s \leq \Delta P_s & \Rightarrow H_p = 0 \\
 \text{si } \varepsilon P_s \leq -\Delta P_s & \Rightarrow H_p = -1
 \end{cases}
 \quad \text{III.26}$$

III.4.4 Effet des vecteurs de tension du rotor sur les puissances :

A la vitesse de synchronisme les flux restent stationnaires, ils tournent dans le sens anti horaire à une vitesse hypo-synchrone et dans le sens horaire à une vitesse au-dessus de la vitesse de synchronisme.

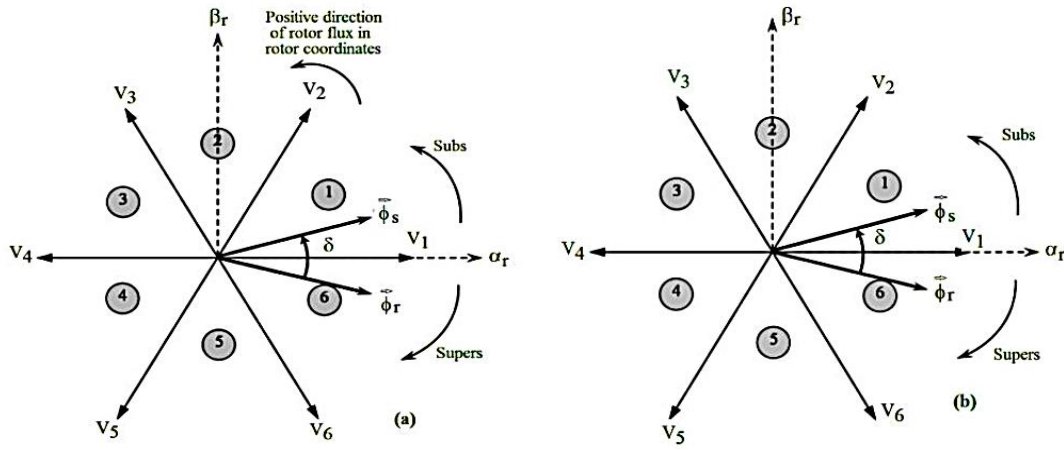


Figure III- 9 : Vecteurs de commande du CCM

L’application du vecteur de tension rotorique dépend de l’emplacement du flux rotorique dans les six secteurs disponibles, la théorie est présentée comme suit :

Si le vecteur flux rotorique se trouve dans un secteur donné i , où $i=1, 2, \dots,6$, les vecteurs V_{i+1} et V_{i+2} augmentent la puissance active et les vecteurs V_{i-1} et V_{i-2} la réduisent, en outre, l’application du V_i , V_{i+1} et V_{i-1} permet de réduire la puissance réactive par contre elle est augmentée par l’application des vecteurs V_{i-2} , V_{i+2} , V_{i+3} [39].

Ainsi pour une meilleure compréhension de la théorie on prend l’exemple suivant :

On suppose que le vecteur du flux rotorique se trouve dans le premier secteur, les vecteurs V_2 et V_3 permettent d’augmenter la puissance active et les vecteurs V_5 et V_6 la réduisent, pour la puissance réactive, on a une réduction de la puissance avec l’application des vecteurs V_1 , V_2 et V_6 , et les vecteurs V_3 , V_4 et V_5 nous permettent d’avoir une augmentation de cette dernière.

Tableau III- 4 : Vecteur de commande appliqué au convertisseur pour un secteur K

puissance	Augmentation	Diminution
Active	$V_{i+1} ; V_{i+2}$	$V_{i-1} ; V_{i-2}$
Réactive	$V_{i-2} ; V_{i+2} ; V_{i+3}$	$V_i ; V_{i+1} ; V_{i-1}$

Le partage du plan complexe en six zones angulaires Z_i ($i=1,\dots,6$) peut être déterminé par la relation suivante :

$$-\frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \tag{III.28}$$

III.4.5 Elaboration de la table de commutation :

Huit combinaisons possibles peuvent être obtenues avec les convertisseurs de tension à deux niveaux, c’est-à-dire que huit vecteurs de tension seront appliqués au convertisseur côté machine dont deux vecteurs nuls et six non nuls.

Les signaux de sortie des régulateurs HP et HQ avec l'emplacement du vecteur du flux rotorique (angle δ) représentent des entrées pour la table de commutation où les états de commutation Sa , Sb et Sc sont des sorties et qui représentent l'un des huit vecteurs appliqués au convertisseur.

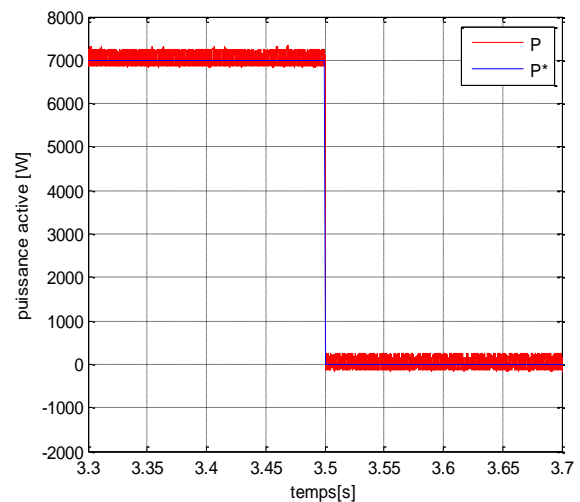
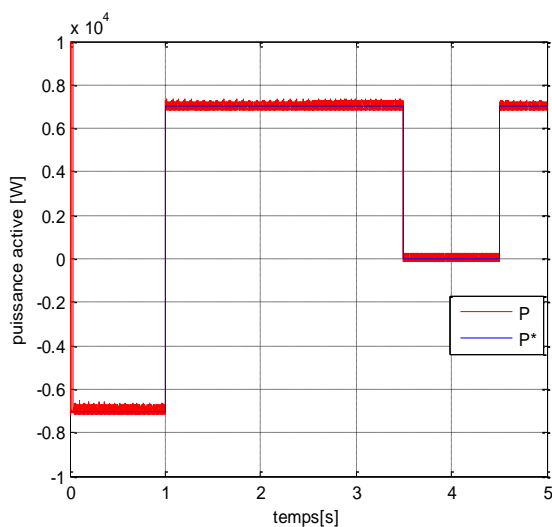
Tableau III- 5 : table de commutation pour la DPC côté machine

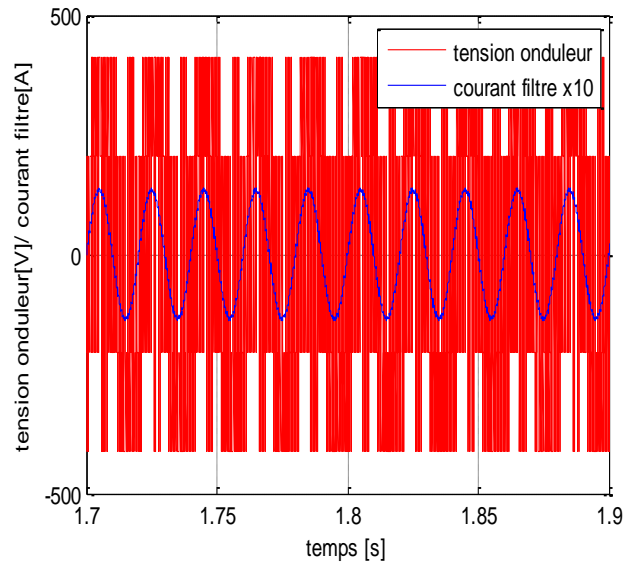
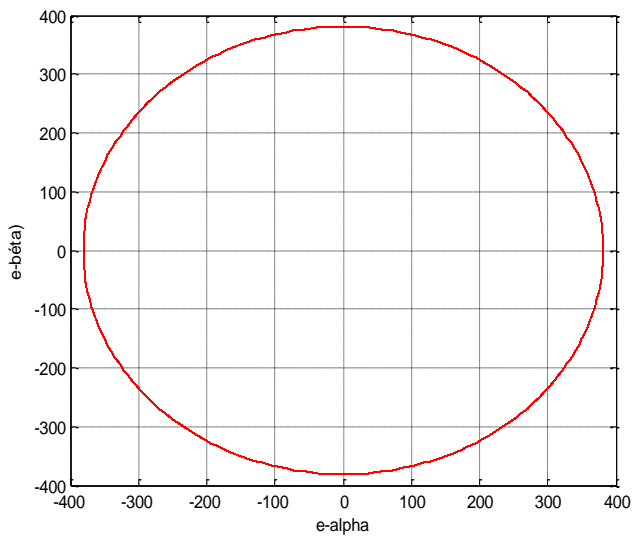
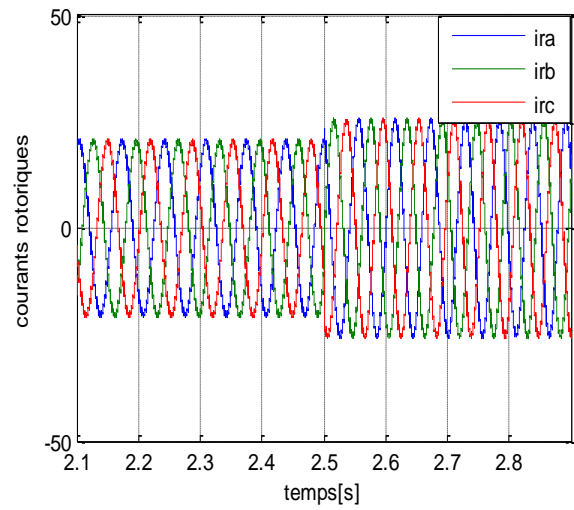
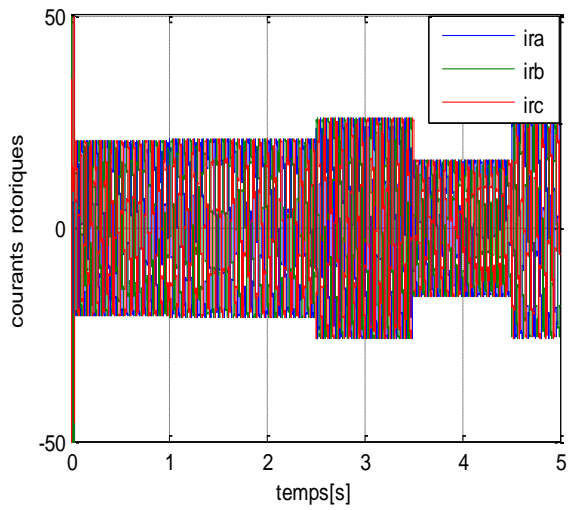
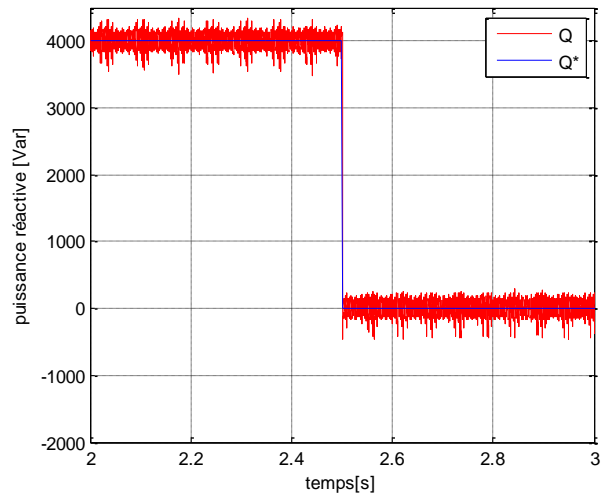
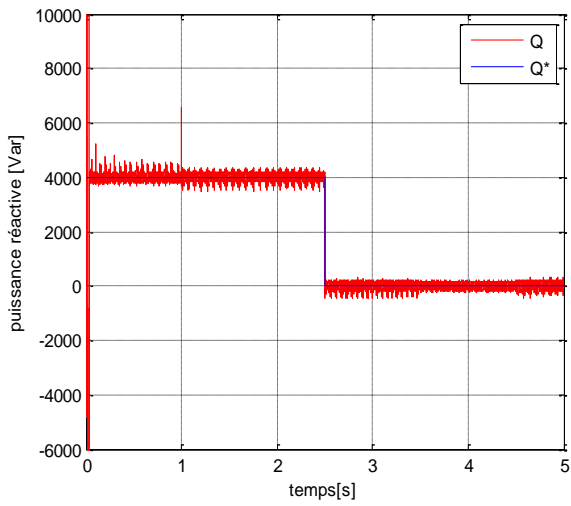
	H_Q	I			$-I$		
	H_p	I	0	$-I$	I	0	$-I$
1	$-\pi/6 - \pi/6$	V_5	V_7	V_3	V_6	V_0	V_2
2	$\pi/6 - \pi/2$	V_6	V_0	V_4	V_1	V_7	V_3
3	$\pi/2 - 5\pi/6$	V_1	V_7	V_5	V_2	V_0	V_4
4	$5\pi/6 - 7\pi/6$	V_2	V_0	V_6	V_3	V_7	V_5
5	$7\pi/6 - 9\pi/6$	V_3	V_7	V_1	V_4	V_0	V_6
6	$9\pi/6 - 11\pi/6$	V_4	V_0	V_2	V_5	V_7	V_1
$V_0(0,0,0)$; $V_1(1,1,0)$; $V_2(1,1,0)$; $V_3(0,1,0)$; $V_4(0,1,1)$; $V_5(0,0,1)$; $V_6(1,0,1)$; $V_7(1,1,1)$							

III.4.6 Résultat de simulation :

La simulation a été effectuée avec les paramètres suivants :

- Fonctionnement sans turbine (sans MPPT) ;
- Les Figures suivantes sont obtenues après l'application de la commande directe de puissance au convertisseur côté machine sous environnement MATLAB/SIMULINK ;
- Les tests de la commande directe de puissance ont été réalisés en imposant des échelons aux références des puissances actives et réactives afin de vérifier le découplage des puissances instantanées.





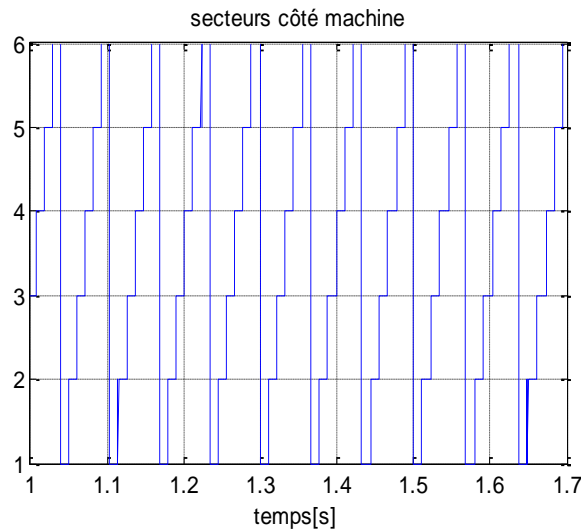
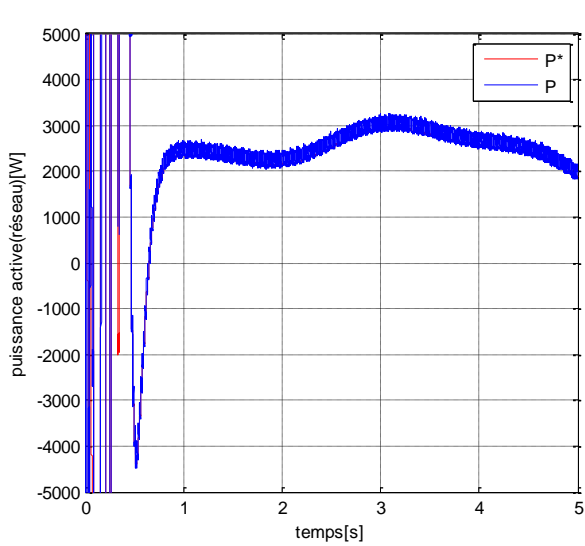


Figure III- 10 : résultats de de commande directe des puissances appliquée au CCM

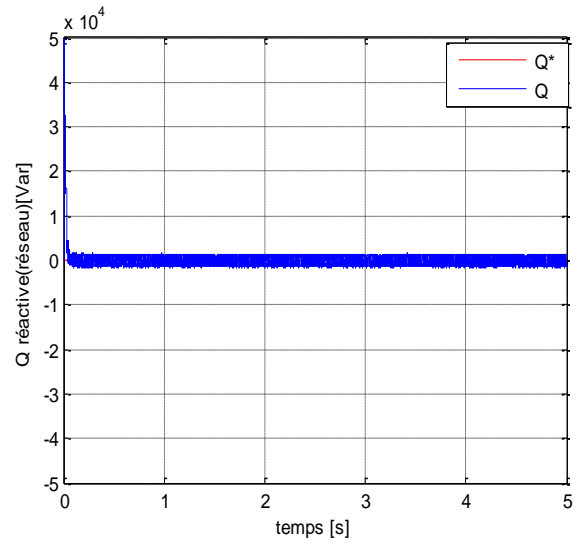
D'après les résultats obtenus ci-dessus, on peut remarquer que la condition du découplage des puissances instantanées actives et réactives à bien été réalisé. Ainsi, le courant rotorique dépend essentiellement de la variation des puissances, possédant une allure sinusoïdale avec présence de petites harmoniques, et des oscillations aux niveaux des puissances instantanées qui sont dû à une fréquence de commutation variable.

III.5 Résultats de la chaine complète avec la commande DPC :

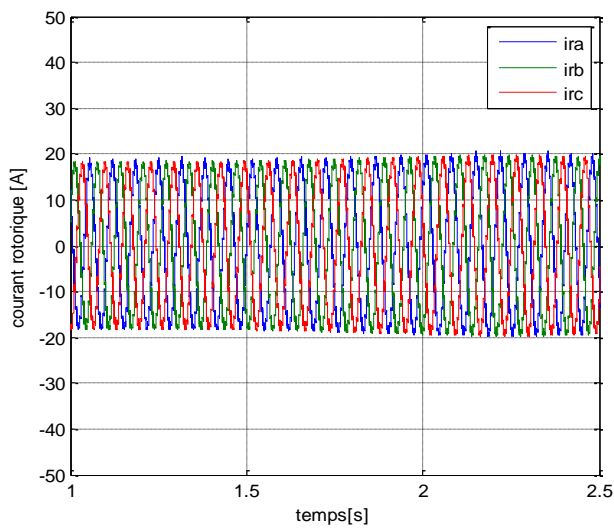
Les figures suivantes représentent les résultats de simulation d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) de 7.5KW dont le stator est relié à un réseau triphasé, et le rotor est piloté par deux convertisseurs statiques, cependant la puissance active de référence côté machine est délivrée par la commande MPPT d'une turbine éolienne de 10KW, la puissance réactive est maintenue à une valeur nulle. Comme mentionné précédemment une régulation du bus continu est établie pour maintenir sa tension à une valeur constante, ainsi on tira la puissance active de référence pour le CCR, la puissance réactive du réseau est maintenue à une valeur nulle afin d'assurer un facteur de puissance unitaire.



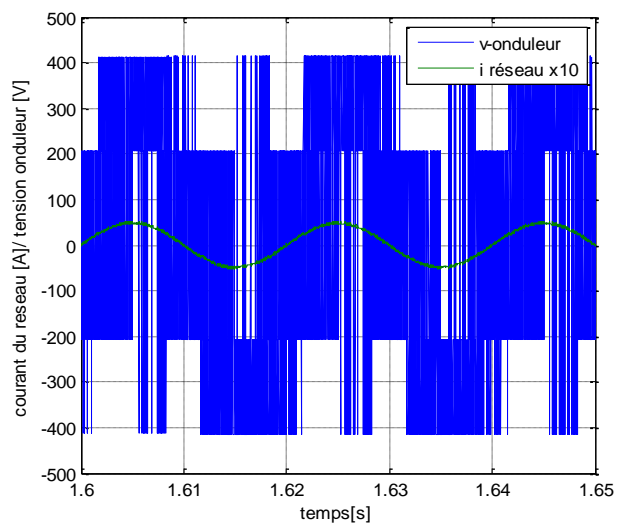
[a]



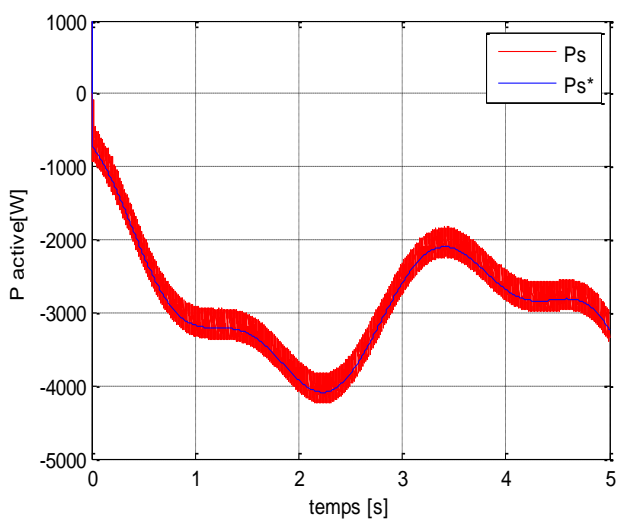
[b]



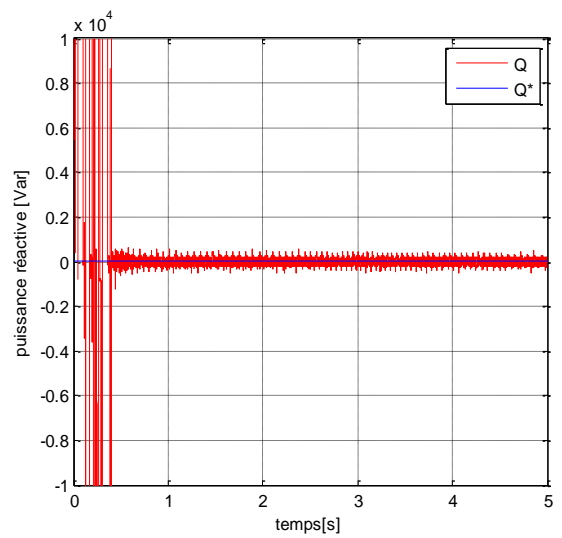
[c]



[d]



[e]



[f]

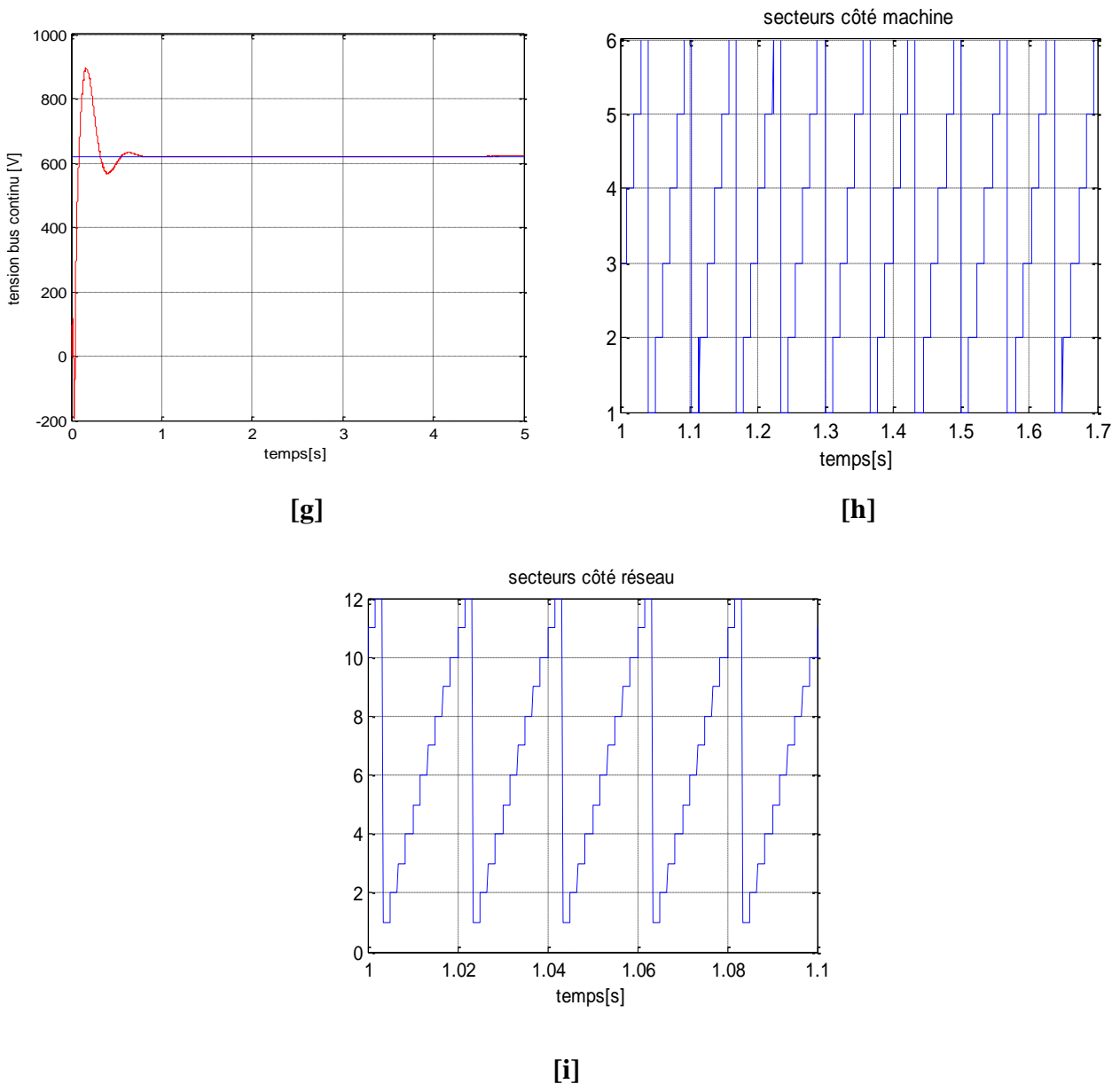


Figure III- 11 : Résultats de simulation de la chaîne complète

D’après les résultats obtenus, on peut remarquer que le contrôle indépendant des puissances instantanées actives et réactives, du côté réseau (figure a et b), et du côté machine (figure e,f), La tension de bus continu reste stable pendant la variation des puissances grâce à la régulation, ce qui nous assure le transit d’énergie (figure g), on a aussi l’apparition des six secteurs du côté machine et douze du côté réseau.

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons élaboré une commande dite commande directe de puissance similaire à cette du couple (DTC) et concurrentielle à la commande vectorielle, ainsi nous l’avons appliqué au convertisseur côté machine et du côté réseau. Le but de la commande été d’assurer un transfert d’énergie constant entre le réseau et la machine tout en contrôlant indépendamment les puissances instantanées actives et réactives

Conclusion générale :

Le thème de ce mémoire, tourne au tour du système de conversion d'énergie d'origine éolienne, le but été de se familiariser avec ce dernier et ainsi dévoiler les différentes stratégies de commandes appliquées à la machine asynchrone à double alimentation afin d'améliorer la qualité de la production d'énergie électrique. La réalisation du mémoire a été effectuée comme suite.

Dans un premier lieu, nous avons donné une description de l'énergie éolienne ainsi qu'une étude sur son état de l'art. Vu comme son utilisation représente un moyen plus écologique pour produire l'énergie électrique, la majorité s'est tournée vers ses énergies durables ce qu'on a présenté par des statistiques, même l'Algérie s'est mis aux énergies renouvelables d'après le ministère de l'énergie (énergie éolienne pour le cas de ce mémoire), cependant, différentes technologies utilisées à travers le temps pour la production d'énergie électrique ont été présentées par des schémas explicatifs.

Le deuxième chapitre, intitulé Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Ce dernier présente la modélisation des différentes parties du système de conversion, ainsi que des commandes pour plus de performance. Une stratégie de commande dite MPPT (Maximum Power Point Tracking), elle a été appliquée à la turbine, le but est d'avoir toujours le point maximal de la puissance quel que soit la variation de la vitesse du vent, et d'obtenir une puissance de référence utilisée dans la suite du travail. Ensuite on passe à la modélisation de la MADA, en lui appliquant la commande vectorielle (directe et indirecte), cette dernière a pour but le découplage entre le contrôle du flux et du couple électromagnétique, ce qui permet d'assimiler la commande de la machine asynchrone à la commande de la MCC à excitation séparée. Ce qu'on peut conclure pour ce chapitre c'est que la commande présentée précédemment peut réaliser le découplage entre les puissances instantanées, par contre, la dépendance de variation des paramètres de la machine représente un inconvénient. La suite du travail nous présente une commande permet de contourner cet inconvénient.

Le dernier chapitre est consacré à une commande à performance élevée, à savoir la commande directe de puissance ou commande DPC, la commande est appliquée aux deux convertisseurs statiques côté machine et côté réseau (CCM/CCR), le but de cette commande est assurer un transfert d'énergie constant tout en garantissant un contrôle indépendant des puissances instantanées.

Bibliographie

- [1] J.Gourmaud, « Les énergies renouvelables 2 », *C'est pas sorcier*, 2012.
- [2] J.Gourmaud, « Nouvelles énergies », *C'est pas sorcier*, 2013.
- [3] F.Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.
- [4] « <https://fr.wikipedia.org/> ». .
- [5] « <http://www.eolien-valais.ch/energie-eolienne/historique> ». .
- [6] « planetoscope.com/energie/eolienne ». .
- [7] « <http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energie-renouvelable.pdf> ». .
- [8] B.Belabbas, « L'intégration de l'énergie éolienne dans un réseau local », Mémoire de Magister, Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie, 2012.
- [9] « futurascience.com, meteo45.com ». .
- [10] S.Kouadria, « Etude et réalisation d'un émulateur d'une turbine éolienne », Mémoire de Magister, Ibn Khaldoun, Tiaret, 2012.
- [11] A.Moualdia, « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2014.
- [12] F.Merrahi, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) », Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique d'Alger, Algérie, 2007.
- [13] S.Metatla, « Optimisation et régulations des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Mémoire de Magister, École Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger, Algérie, 2009.
- [14] « <http://mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-eolienne> ». .
- [15] B.Kelkoul, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de Magister, Tlemcen, Algérie, 2011.
- [16] R.Kezerli, « Alimentation et Commande d'une MADA connectée au réseau local, en utilisant les convertisseurs multiniveaux », Mémoire de Magister, Université Houari BOUMEDIENE, Alger, Algérie, 2009.
- [17] Y.A.Benchrif, « Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, el Harrache, Alger, 2008.
- [18] T.Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de

- machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, Ecole Centrale de Lille, France, 2011.
- [19] M.A.Hassad, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques. », Mémoire de Magister, UNIVERSITE SETIF 1, Sétif, Algérie, 2012.
- [20] Y.Djeriri, « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle. », thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2015.
- [21] A.Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Nancy, France, 2010.
- [22] S.El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de LILLE, Lille, France, 2004.
- [23] A.Benamor, « Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau », Mémoire de Magister, Université d'El Oued, Algérie.
- [24] G.X.Ming, S.Dan, H.B.Teng, et H.L.Ling, « Direct Power Control for Wind-Turbine Driven Doubly-Fed Induction Generator with Constant Switch Frequency », *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007*, Seoul, Korea.
- [25] N.Hamdi, « Amélioration des performances des aérogénérateurs », thèse de doctorat, Université Constantine i, Constantine, Algérie, 2013.
- [26] K.Akkouchi, « Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2007.
- [27] E.EL Mdjabber, « Modélisation et commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », thèse de doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc, 2013.
- [28] C. Ben Djoudi, M. Araria, « Stratégies de Commande DTC-SVM appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne », Mémoire master, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie, 2016.
- [29] A.Boulahia, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Constantine, 2009.
- [30] H.Nian, Y. Song, P.Zhou, et Y.He, « Improved Direct Power Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator During Transient Grid Voltage Unbalance », *IEEE Trans. ENERGY Convers.* vol. 26, n°. 3, 2011.

- [31] Y. Djeriri, A. Meroufel, A. Massoum, and Z. Boudjema, « Direct power control of a doubly fed induction generator based wind energy conversion systems including a storage unit », *Journal of Electrical Engineering* *www.jee.ro*, Sidi Bel Abbes, Algeria.
- [32] A.Moualdia, M.Mahmoudi, L.Nezli, « DPC and DTC Control of a Wind Speed Based on the Doubly Fed Asynchronous Machine », *First International symposium on Environment-Friendly Energy and Applications (EFEA2010)*, Ghardaïa, Algiers, Algeria, 04-nov-2010.
- [33] A.Bouafia, « techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : application aux redresseurs a mli », thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2010.
- [34] A.Moualdia, M.Mahmoudi, L.Nezli, « DPC and DTC Control of a Wind Speed Based on the Doubly Fed Asynchronous Machine », *J. Electr. Eng. JEE*, vol. 12, n° 12, Edition.2, pp 39-46, 2010.
- [35] S.Breban, M. M. Radulescu, et B. Robyns, « Direct Active and Reactive Power Control of Variable-Speed Doubly-Fed Induction Generator on Micro-Hydro Energy Conversion System », *XIX International Conference on Electrical Machines*, Rome, 2010.
- [36] A.Bouafia, Jean-Paul Gaubert, Fateh Krim, « Analysis and design of new switching table for direct power control of three-phase PWM rectifier », *13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-EPESC 2008)*, Poznan, Poland, 2008.
- [37] A.Moualdia, M.Mahmoudi, L.Nezli, « Direct Power Control of Variable Wind Speed Based on the Doubly Fed Asynchronous Machine », *J. Energy Power Eng. JEPE*, vol. 6, n° pp 1005-1011, 2012.
- [38] Y. Zhang, J.Hu, et J. Zhu, « Three-Vectors-Based Predictive Direct Power Control of the Doubly Fed Induction Generator for Wind Energy Applications », *IEEE Trans. POWER Electron.* vol. 29, n° 7, 2014.
- [39] Y. Djeriri , A. Meroufel, B. Belabbes and A. Massoum, « Three-level NPC voltage source converter based direct power control of the doubly fed induction generator at low constant switching frequency », *Rev. Energ. Renouvelables Vol 16 N°1 2013 91 – 103*, vol. 16, n° 1, mars 2012.
- [40] A. Mehdi, A.Reama, H.E.Medouce, S.E. Rezgui, et H.Benalla, « Direct Active and Reactive Power Control of DFIG Based Wind Energy Conversion System », *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Constantine, Algérie, Paris, France, 2014.

Annexe A

Les paramètres du système de conversion d'énergie éolienne :

❖ **Paramètres de la turbine :**

Nombre de pales : 3 ; Rayon $R=3\text{m}$
Vitesse du vent $V=12\text{m/s}$; La masse volumique de l'air $\rho=1.225\text{ kg/m}^3$
Coefficient de frottement $f=0.00731\text{ N}$; Moment d'inertie $J=0.3139\text{ Kg. m}^2$
Gain du multiplicateur $G=5.4$; Coefficient de puissance max $C_{p_{\max}}=0.48$
Ratio de vitesse optimale $\lambda_{\text{opt}}=8.1$

❖ **Paramètres de la MADA**

La fréquence statorique $F_{\text{sn}}=50\text{ Hz}$; La tension rotorique nominale $V_{\text{rn}}=12.44\text{ V}$
La fréquence rotorique $F_{\text{rn}}=2\text{ Hz}$; Le coefficient de frottement $F=6.73\text{e-}3\text{ Nm/rad/s}$;
Puissance nominale $P_{\text{n}}=7.5\text{e}3\text{ W}$; Le courant nominal $I_{\text{sn}}=2.7\text{ A}$
La vitesse nominale $N_{\text{n}}=1440\text{ tr/min}$; Le nombre de pair de pôles $p=2$
La résistance statorique $R_{\text{s}}=0.455\text{ohm}$; La résistance rotorique $R_{\text{r}}=0.62\text{ohm}$
L'inductance cyclique statorique $L_{\text{s}}=0.084\text{H}$; L'inductance cyclique rotorique $L_{\text{r}}=0.081\text{H}$
L'inductance mutuelle $M_{\text{sr}}=0.078\text{H}$; Moment d'inertie $J=0.3125\text{ Kg/m}^2$

❖ **Le bus continu :**

La capacité du condensateur $C=4700\text{e-}6\text{ F}$; La tension $V_{\text{dc}}=620\text{V}$

❖ **Le réseau électrique :**

La tension du réseau $V=220/380$; La fréquence du réseau $F=50\text{Hz}$

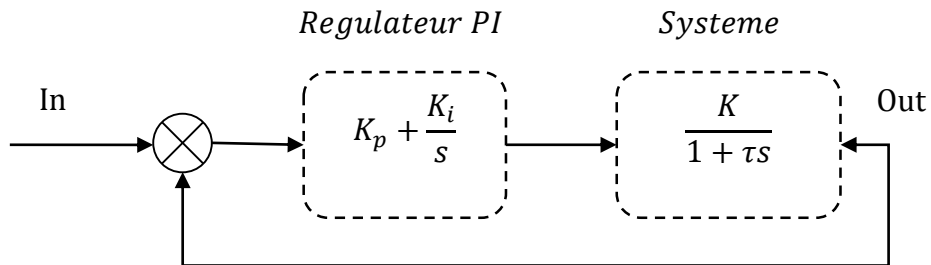
❖ **Le filtre RL :**

La résistance du filtre $R_{\text{f}}=0.2\text{ ohm}$; L'inductance du filtre $L_{\text{f}}=11.5\text{e-}3\text{ H}$

Annexe B

Calcul de régulateur proportionnel intégrateur :

La fonction de transfert du régulateur PI est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$



Systeme du 1^{er} ordre régulé par le PI

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

$$FTBO = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{K}{1 + \tau s}$$

En tirant $\frac{K_p}{s}$

$$FTBO = \frac{K_p}{s} \cdot \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right) \cdot \frac{K}{1 + \tau s}$$

Pour le dimensionnement, on compense le zéro du régulateur par un des pôles du système à régler. La FT du régulateur PI est

$$\frac{K_p}{s} \cdot \left(s + \frac{K_i}{K_p}\right)$$

Si le pôle le plus lent est compensé alors : $\frac{K_i}{K_p} = \frac{1}{\tau}$

Les pôles sont compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot K}{\tau \cdot s}$$

En boucle fermée nous aurons

$$FTBF = \frac{1}{1 + s \cdot \tau_r}$$

Avec

$$\tau_r = \frac{\tau}{K \cdot K_p}$$

Pour chaque réglage on a choisi un temps de réponse suivant notre système Le temps de réponse τ_r ,

Donc les paramètres du régulateur sont exprimés par :

$$K_p = \frac{\tau}{K \cdot \tau_r} \quad ; \quad K_i = \frac{1}{K \cdot \tau_r}$$

Annexe C :

Matrice de transformation de Park directe :

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

Matrice de transformation de Park inverse :

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

يتناول هذا العمل السيطرة على نظام تحويل طاقة الرياح باستخدام آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية (MADA) جزؤها الثابت مرتبط مباشرة بالشبكة الكهربائية اما الجزء الدوار مرتبط بآتين من المحولات الثابتة ثنائية الاتجاه. اقترحت استراتيجية تعظيم الطاقة (MPPT) لتطبيقها على توربينات الرياح لتوليد المصادر (عزم الدوران، القوة) لإكمال هذه الدراسة. نحن نستخدم طريقتين للتحكم بالمحول المجاور للجزء الدوار (CCM). وهي:

طريقة 1: التحكم الشعاعي المباشر وغير المباشر (مع وبدون حلقة القوة) والذي يهدف الى السيطرة على الطاقة

طريقة 2: وحدة تحكم (DPC) الذي يهدف إلى التحكم بالطاقة

بالنسبة للمحول المجاور للشبكة (CCR) يتم استخدام الأسلوب الثاني (DPC).

سيتم محاكاة هذه الدراسة باستخدام البرنامج "SIMULINK / Matlab".

Abstract

This work deals with the control of wind energy conversion system based on a double fed induction generator (DFIG) connected directly to the electrical grid via the stator and the rotor is controlled by two static converters. A power maximization control strategy (MPPT) was proposed to apply it to the wind turbine in order to generate the references (torque, power), to accomplish this study. Two methods will be used to control the converter side machine (CSM). These are:

1st method: Direct and indirect vector control (without and with power loop) and whose main purpose is the control of the powers.

2nd Method: the control (DPC) which has objective of the direct control of power.

The second method (DPC) is used for the converter side grid (CSG).

This study will be simulated using "Matlab / Simulink" software.

Résumé

Ce travail traite la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) connectée directement au réseau électrique via le stator et elle est pilotée par son rotor par deux convertisseurs statiques. Une stratégie de commande de maximisation de puissance (MPPT) était proposée pour l'appliquer à la turbine éolienne afin de générer les références (couple, puissance), pour accomplir cette étude. On utilisera deux méthodes distinctes pour le contrôle de convertisseur coté machine (CCM). Ces dernières sont :

1ère méthode : commande vectoriel directe et indirect (sans et avec boucle de puissance) et dont le but principal est le contrôle des puissances.

2ème Méthode : la commande (DPC) qui a pour objectif le contrôle directe de puissance.

Pour le convertisseur coté réseau (CCR), on utilise la deuxième méthode (DPC).

Cette étude sera simulée à l'aide de logiciel

« Matlab/Simulink ».