



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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème

**Commande par DTC de la machine asynchrone à
double alimentation pour l'utilisation dans la
production de l'énergie éolienne**

Réalisé par:

BELLILA Amor
MOUANE Med Sayah
BOUSBIA Larbi

Encadré par:

Dr : SERHOUD Hicham

Soutenu en Mai 2017

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à Mr: SERHOUD Hicham qui nous a fait l'honneur d'être notre encadreur ;

Nous le remercions profondément pour son encouragement continu et aussi d'être toujours là pour nous écouter, et nous guider durant la préparation de ce travail par ses précieux conseils et suggestions.

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelle,

Nos familles respectueuses à leur soutien moral et matériel, et l'atmosphère qui nous ont présenté.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*En premier lieu mon **père** qui ne cesse pas de*

*m'encourager et ma **mère** pour sa tendresse*

profonde,

Que Dieu les garde moi.

A ma chérie femme ;

A mon fils ABDERRAHMANE ;

*Mes très chère **frères** et **sœurs**.*

*Toute ma grande **famille**.*

Bellila Amor

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- ✓ *La mémoire de mon Père qu'ALLAH l'accueille dans son vaste paradis,*
- ✓ *Ma très chère mère que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères gratitude pour ses sacrifices et ses prières pour moi ;*
- ✓ *Ma petite famille, mes frères et sœurs qu'ils trouvent ici l'expression de mes sentiments les plus dévoué et mes vœux les plus sincères ;*
- ✓ *Mes amis et collègues pour leur soutien et leur encouragement.*

Sayah MOUANE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail qui résulte une partie de mes études et

Formation :

A ceux qui font l'impossible pour mon aide, au niveau matériel et moral dans cette démarche d'enseignement, avec ces précieux conseils inoubliables, ainsi leurs encouragements continus.

A tous ce qui m'ont indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes.

A mes chers parents qui m'aident avec ses meilleures consignes pour arriver au point.

A mes sœurs et mes frères mes enfants et toute ma famille maternelle et paternelle.

Bousbia larbi

ملخص :

تناقش هذه الأطروحة التحكم المباشر في العزم (DTC) لنظام تحويل طاقة الرياح يعتمد على مولدة لا تزامنيه مزدوجة التغذية ، حيث عنصرها الساكن متصل مباشرة بالشبكة بينما الدوار فهو مغذى عن طريق موجين ثلاثي الأطوار موصولين في ما بينهما بوصلة التيار المستمر .وفقا لنتائج المحاكاة المتحصل عليها أثبتت فعالية إستراتيجية التحكم المقترحة من حيث المتانة و الفاعلية .

كلمات مفتاحية:

طاقة الرياح ،مولدة لا تزامنيه مزدوجة التغذية،موجين ثلاثي الأطوار، MPPT ، التحكم الشعاعي ، DTC ، PI

Résumé :

Le présent travail est consacré à une commande par DTC "Contrôle direct du couple" de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée à un système éolien. Le transfert de puissance entre le stator et le réseau est réalisé par action sur les signaux rotoriques. Les performances et la robustesse sont analysées par simulation à base du logiciel Matlab/Simulink. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette stratégie de contrôle au travers de bon performances.

Mots clés : Machine Asynchrone à Double Alimentation ; DTC ;Eolienne

Abstract:

The purpose of this project is to show the performance of the direct torque control technique (DTC), applied to a doubly fed induction generator (DFIG) driven by a wind turbine , with a the power transfer between the stator and the network is carried out by acting on the rotor ,The studied system control is tested and validated through numerical simulation. The obtained results show the effectiveness of the control strategy leading to best performances.

Key words:

Doubly Fed Induction Generator, converter, DTC, Wind energy

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------	---

CHAPITRE.I : Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction	3
I.2. Ressources primaires de la production d'électricité au niveau mondial	3
I.3. Données générales	4
I.4. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs	8
I.5. Autres caractéristiques	15
I.6. Système de génération étudié dans ce mémoire	16
I.7. Bilan énergétique	19
I.8. Conclusion	20

CHAPITRE.II : Modélisation et simulation de la MADA

II.1 Machine asynchrone à double alimentation : classification et application	22
II.2 Modélisation et simulation de la MADA	34

CHAPITRE.III : Commande du système éolien à vitesse variable basé sur MADA

III.1. Introduction	47
III-2. Modèle de la chaîne de conversion	47
III-3. Filtre (côté réseau)	50
III-4. Régulation de la tension du bus continu	51
III-5. Modélisation de la turbine	54
III-6. Stratégie de commande de la turbine	58
III-7. Algorithmes de maximisation de la puissance extraite	59
III-8. Système de la chaîne globale	61
III-9. Résultats de simulation	61
III-10. Interprétations des Résultats	64
III-11. Conclusion	65

CHAPITRE.IV : Commande par DTC de la GADA intégré dans un système éolien

IV.1. Introduction	67
IV.2. Principe du control direct du couple	67
IV.3. Description de la structure générale de la commande (DTC) pour la machine asynchrone	71
IV.4. Elaboration des tables de commutation	78
IV.5.Résultats de simulation	79
IV.6. Interprétations des résultants	81
IV.7. Conclusion	81

<i>Conclusion Générale</i>	82
-----------------------------------	-----------

Annexe

Bibliographie

Introduction générale

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par éoliennes n'a pas cessé d'augmenter depuis 1980. L'industrie éolienne est en mesure de devenir un facteur important dans l'industrie de production de l'énergie comme un alternatif propre et renouvelable, et avec le problème de l'échauffement global, les pays à travers le monde investissent des sommes énormes pour la recherche et le développement des nouvelles technologies pour optimiser les coûts et augmenter les capacités de l'énergie extraite de l'éolienne, et par conséquent le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur.

Dans le domaine des entraînements des grandes puissances, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier. Il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation MADA.

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure exécution de la génératrice à double alimentation, il faut concevoir une commande robuste adéquate, qui rend le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Il existe différentes stratégies dans littérature pour résoudre le problème de la commande de la MADA.

Notre objectif dans ce travail est l'étude de la commande directe du couple DTC d'un système éolien basée sur MADA et connecte dans un réseau électrique.

Ce mémoire est alors divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet de description et généralités sur les énergies éoliennes. Il donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (à l'axe vertical, horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs énergies de génération.

Le second chapitre est consacré à la description et classification des Machines à double alimentation, principe de fonctionnement, la modélisation et simulation, ainsi que les applications des MADA dans les énergies éoliens.

Le troisième chapitre analyse la commande, modélisation et la régulation du système éolien basé sur MADA, en détaillant les différents facteurs qui interviennent pour la maximisation de la puissance extraite de l'éolienne.

Le dernier Chapitre présente le modèle pour la chaîne de conversion éolienne basée sur la machine à double alimentation fonctionnant à vitesse variable en appliquant la commande par DTC, en concluant par analyse et interprétation des résultats de simulation.

Généralité sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction :

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles .En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années ; En effet, des moulins à vent avec axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres Afghanes 7 siècles a-v J.C. pour moudre du grains. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique .C'est en 1891 que le Danois Poul LaCeur construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité. [1].

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évolué ceci a permis, à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique. Dans les années 40, on pensait que la technologie des automobiles n'allait plus vraiment évoluer .La même réflexion était faite à propos des avions dans les années 70. Ces technologies ont pourtant progressé. De même, il n'y a pas de doute que les aérogénérateurs évolueront encore, et la recherche a un rôle important à jouer dans ce sens. On peut, notamment y introduire plus « d'intelligence».

Les éoliennes de la dernière génération fonctionnent à vitesse variable .Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe, ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. [2].

I.2. Ressources primaires de la production d'électricité au niveau mondial :

La production d'électricité consomme actuellement environ deux tiers de l'énergie primaire mondiale. (fig.I.1) et la part des énergies renouvelables n'est que de 20% [3]. Environ, il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'elle soit énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium). C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité.

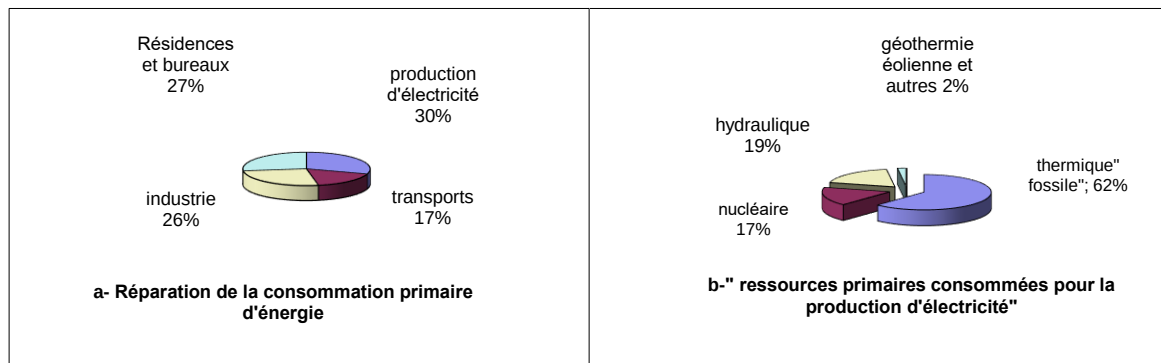


Fig. (I.1) : Parts au niveau mondial.

Ce premier chapitre a pour objectif de montrer l'évolution des chaînes de conversion électromécanique, ainsi que quelques uns des axes de recherches en Génie Electrique associés à la production éolienne d'énergie .la machine à double alimentation fera l'objet d'une attention particulière dans ce cas là.

I.3.1. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes.

Bien que connue et exploitée depuis longtemps, l'énergie éolienne fut complètement négligée pendant l'ère industrielle, au profit quasi exclusif, si l'on excepte l'hydroélectricité des énergies fossiles. L'énergie cinétique du vent peut être convertie directement en énergie mécanique et être utilisable par exemple dans les anciens moulins à vent ou, pour actionner des pompes. Mais de nos jours, on la transforma en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs. Le nouvel intérêt porté à l'énergie éolienne depuis la moitié des années 70, résulte de deux préoccupations : d'une part la protection de l'environnement et l'économie des combustibles fossiles qui en résulte. D'autre part l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance [1].

Bien que les aérogénérateurs aient une certaine maturité technique, la technologie des aérogénérateurs évolue. Les éoliennes de la dernière génération fonctionnent à vitesse variable.

Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les efforts mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. C'est le développement des variateurs électroniques qui permet de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Par conséquent, les variations de la puissance résultante

des fluctuations du vent, qui constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne. [2].

De ce fait, les éoliennes sont considérées comme des génératrices de puissance variable. Connectées au réseau électrique, les générateurs éoliens n'imposent pas la tension et ne règlent pas le rapport puissance- fréquence. Autrement dit, elles ne participent pas aux services systèmes, donc, elles perturbent d'autant plus la stabilité des réseaux que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies sont apparues pour optimiser cette génération d'énergie.

Les éoliennes actuellement installées peuvent être classées selon deux catégories : les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. La technologie inhérente à la première catégorie d'éolienne est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité, et un faible coût, ce qui permet une installation rapide de centaines de KW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, se sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance générée. En effet ces dernières présentent plusieurs avantages, notamment une meilleure exploitation de l'énergie du vent, la réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques, ainsi que une grande souplesse quant à la connexion au réseau grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance totalement commandables.

I.3.2. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne :

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses ; les guerres, les crises, d'autres types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution de la technologie, changement de politique énergétique etc....

Suite à la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs Danois améliorèrent cette technologie durant la 1^{ère} et 2^{ème} guerre mondiale pour faire face à la pénurie d'énergie électrique, malgré certains succès technologiques obtenus à cette époque, l'insères pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la 2^{ème} guerre mondiale.

C'est avec la crise pétrolière des années 70s que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes. Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de

l'énergie éolienne peut se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux EU mais augmentèrent en Europe, ce qui a permis un développement important de cette industrie dans des pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001. [1].

I.3.3 La situation actuelle

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences sur le monde entier, le marché mondial de l'éolien a pu résister. Le chiffre d'affaires du secteur éolien dans le monde entier a atteint le 60 milliards d'euros (75 milliards de dollars) en 2012.

En effet, en 2012 près de 100 pays ont installés des capacités d'énergie éolienne sur leur territoire, parmi eux 34 pays européens davantage que sur n'importe quel autre continent. Le rythme de croissance de l'éolien dans le monde reste globalement soutenu, selon le rapport annuel de l'association mondiale de l'énergie éolienne (World Wind Energy Association - WWEA) publié en mai 2013 [WWEA], la puissance éolienne mondiale installée durant l'année 2012 est de l'ordre de 44609MW, soit une puissance mondiale cumulée de plus de 282GW. La plus grande partie de la puissance installée se trouve en Europe avec environ 107GW et qui représente 38% de la capacité éolienne mondiale.

la figure (I.2) montre l'évolution de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale exprimée en MW

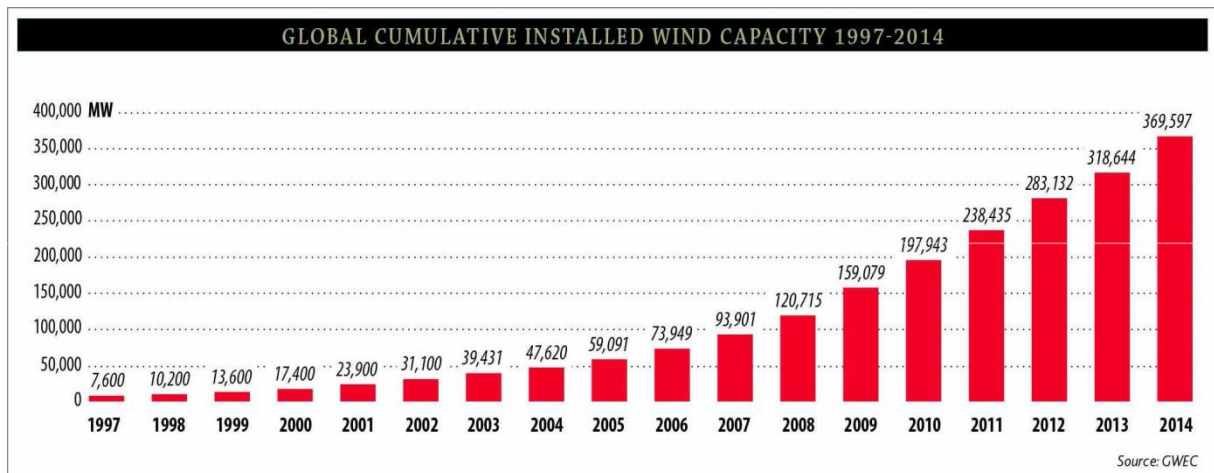


Fig 1.2 Capacité éolienne cumulée dans le monde entier

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs et par conséquent diffère d'un pays à l'autre, et même d'un site à l'autre puisque la vitesse du vent est un des facteurs de plus d'importance (la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent). Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie a été divisé par deux ces 10 dernières années. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse des prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et de la disponibilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance

vers des turbines toujours plus grandes. La baisse des coûts d'infrastructure que cela entraîne ainsi les réductions du coût des matériaux. Le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. Il faut de plus noter qu'en prenant en compte le coût correspondant à la pollution produite par les différentes sources d'énergie, le coût de l'énergie éolienne est encore plus compétitif. [1].

I.3.4. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des avantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.3.4.1. Les avantages:

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement:

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂. [1].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO₂, 21 milles tonnes de SO₂ et 17.5 milles tonnes de NO_x. ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Ainsi que le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

I.3.4.2. Les désavantages:

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

- L'impact visuel: ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit: il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux: certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- La qualité de la puissance électrique: la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance n'est pas donc toujours très bonne. Jusqu' à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau est faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classique : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites (c'est à dire là où il y a le plus de vent) concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classique sur les sites moins ventés. [1]

I.4. Spécificités liées à la technologie des aérogénérateurs :

Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation de différents types d'éoliennes. Certains concepts de base permettent de classer les diverses sortes d'aérogénérateurs.

I.4.1. Constitution d'un aérogénérateur :

Bien qu'il existe des turbines à axe vertical (Darius, Savonius...), les machines à axes horizontal dominant très largement le marché des petites puissances (quelque 10 W jusqu'aux plus élevés, de quelques MW) .Les turbines sont toujours bipales ou, le plus souvent, tripales [3], la figure (I.3) montre quelques exemples des machines à axe horizontal :



Tripale

bipales

tripale

Excel : 7m-10 kW

Ge 220 :220kw

E 66 : 65m-1.8Mw

Dans les chaînes de conversions électromécaniques conventionnelles, on intercale entre la turbine et la génératrice un multiplicateur mécanique à engrenages, la génératrice est alors très souvent une machine asynchrone à cage voire à rotor bobiné et à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable économique. La figure (I.4) montre un exemple typique de chaîne de conversion à multiplicateur.

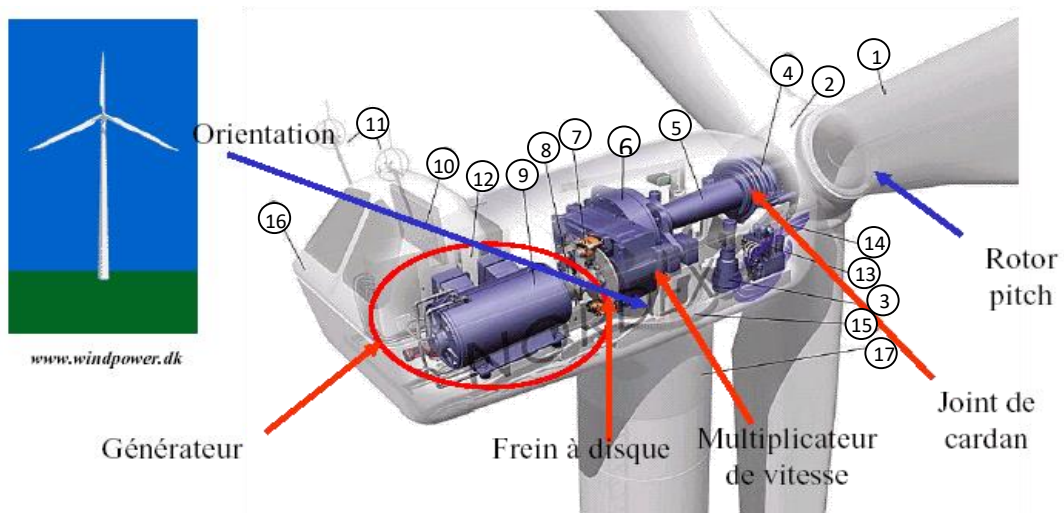


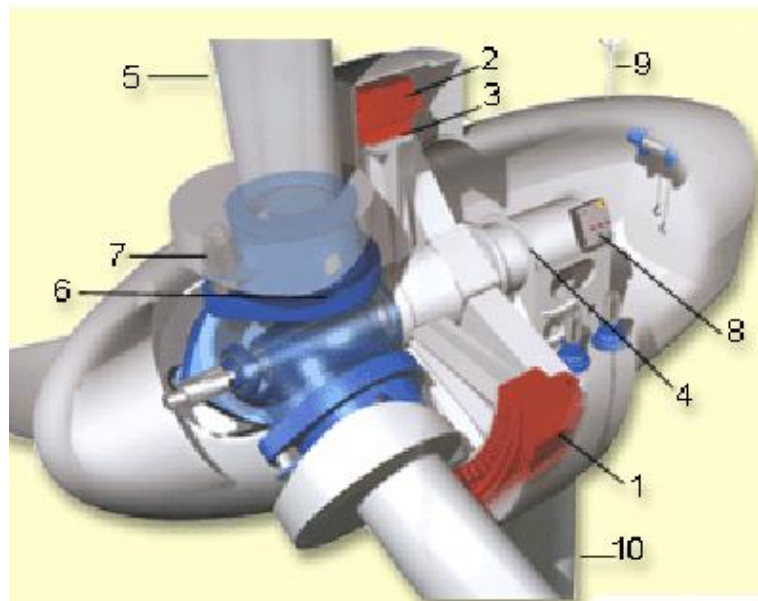
Fig. (I.4) : Schéma d'une éolienne- N 60 (1300KW).

1 : pales, 2 : moyeu rotor, 3 : nacelle, 4 : cadran, 5 : transmission, 6 : multiplicateur de vitesse, 7 : frein à disque, 8 : accouplement, 9 : génératrice, 10 : radiateur, 11 : centrale de mesures du vent, 12 : contrôle, 13 : centrale hydraulique, 14 : mécanisme d'orientation face au vent, 15 : joint de cardan, 16 : générateur, 17 : frein à disque.

Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison

pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique. [1],

La figure (I.5) montre le schéma de la nacelle d'une telle machine, le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte. Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50 Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable. [3].



1- Générateur, 2- Redresseur de générateur, 3- Disque de rotor, 4- Goupille principale, 5- lame de rotor, 6- Roulement de bride de lame, 7- commande de lancement, 8- le support machine, 9- sonde de vent, 10- Tour.

Fig. (I.5) : Schéma d'une éolienne à entraînement direct.

Depuis les années 80s, les puissances moyennes unitaires des aérogénérateurs sont passées de 50 kW, à 200 kW (1990), 500 kW (1998) à plus de 1 MW en 2002 (1,4 MW en Allemagne), l'accroissement des puissances permet des réductions de coût au kW, les aérogénérateurs les plus puissants en 2003 frôlent les 5 MW avec des diamètres de turbine proches de 120 m.

I.4.2. Types des machines électriques:

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

- Fonctionnement à vitesse fixée :
 - Système électrique plus simple.
 - Plus grande fiabilité.
 - Peu de probabilité d'excitation de la fréquence de résonance des éléments de L'éolienne.
 - Pas besoin d'un système électronique de commande.
 - Moins cher.
- Fonctionnement à vitesse variable :
 - Augmentation du rendement énergétique.
 - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
 - Réduction des efforts subis par le train de puissance.
 - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machines. [3].

- **Générateur synchrone:** ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 KW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus lorsque, ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence de réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice -réseau, les fluctuations du couple capté par aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau.

Elles sont par contre utilisées, lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à

optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation, donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur.

- **Générateurs asynchrones** : la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement qui se produit entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine. Ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant. Comme pour les machines synchrones. Il existe différents types de machines asynchrones qui sont associées à divers convertisseurs de puissance, ils fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins grands. Deux des désavantages principaux des machines à induction sont la consommation de puissance réactive et le courant élevé au démarrage, mais ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance.

- Deux variantes de ces machines synchrones et asynchrones pourraient se développer dans les prochaines années : des générateurs synchrones à aimant permanent directement couplés à la turbine ou des générateurs asynchrones doublement alimentés au stator. Ces derniers n'ont pas encore complètement au point mais auraient un avantage sur les générateurs asynchrones doublement alimentés (GADA) à rotor bobiné, puisqu'ils n'ont pas de bagues, élément des machines asynchrones à rotor bobiné qui demande une certaine maintenance.

Même si elles ne sont pas utilisées dans l'industrie éolienne, d'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids. Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple. Ce type de machine pourrait être un candidat pour de futures éoliennes.

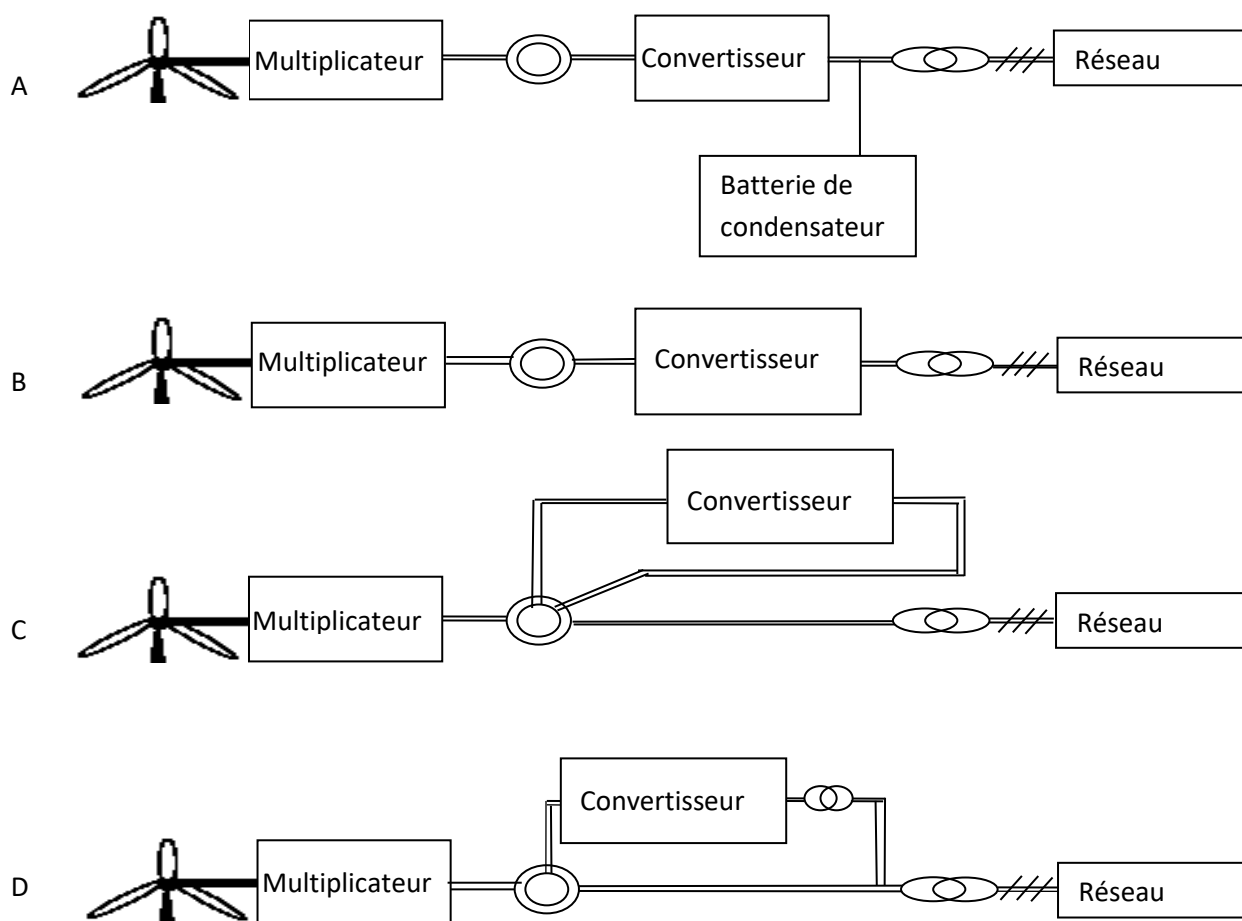
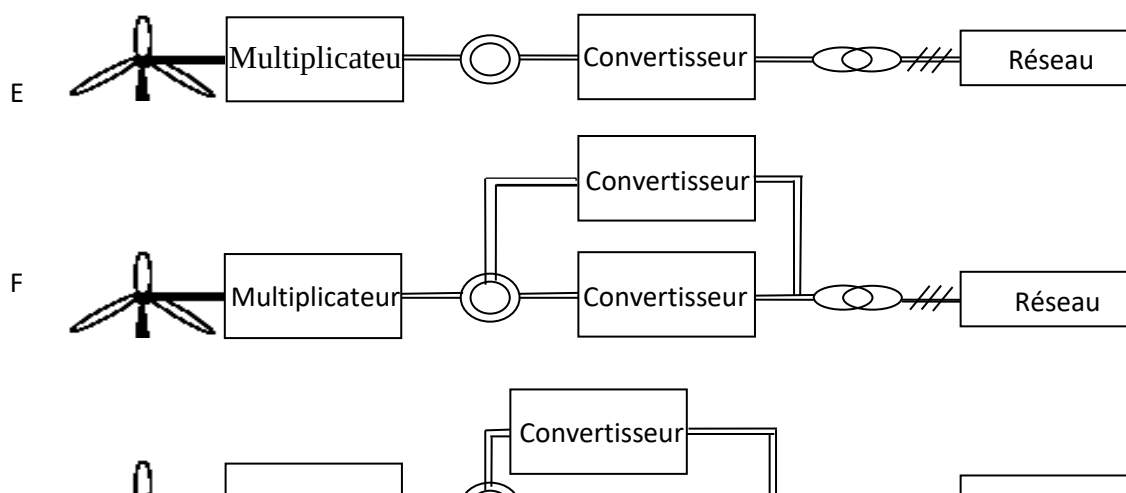


Fig. (I.6) : Configuration électrique utilisant la machine asynchrone.

Les configurations illustrées sur les figures (I.6) et (I.7) représentent les topologies les plus courantes rencontrées dans les aérogénérateurs et faisant intervenir les deux types de machines dont on a décrit les caractéristiques principales. Le terme « Convertisseur » apparaissant dans ces figures se réfère à différents types de composants d'électronique de puissance.



Les différentes configurations sont décrites par la suite:

A- Sous cette forme, l'éolienne fonctionne à vitesse fixe, avec un générateur asynchrone à cage d'écureuil. Les bancs de condensateurs sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive et les convertisseurs pour un démarrage plus doux.

B- Les bancs de condensateur et le « démarreur doux » sont remplacés par des convertisseurs de fréquence soit de grande échelle, soit utilisés seulement pour compenser la puissance réactive à des vitesses de vents élevées. La première configuration a l'avantage de pouvoir faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne pour toutes les vitesses du vent.

C- Ici, le générateur est asynchrone à rotor bobiné. L'idée de base est de contrôler la résistance du rotor par l'intermédiaire d'un convertisseur d'électronique de puissance et de commander le glissement de la machine sur un domaine de variation de 10%.

D- Cette configuration contient un générateur asynchrone doublement alimenté. Un convertisseur de fréquence commande directement les courants dans les enroulements du rotor. Ceci permet de contrôler la puissance de sortie du générateur en utilisant des convertisseurs dimensionnés à 20 voir 30% de la puissance nominale du générateur. La puissance traversant les convertisseurs dans le cas D étant moindre que celle du cas B, les harmoniques sont nettement plus faibles.

E- Dans cette configuration on commande la totalité de la puissance (application : bateaux à voiles, recharge de batteries de stockage, systèmes hybrides ou d'autres applications exploitant des éoliennes de moins de 20 KW).

F- Une machine synchrone est ici existée par l'intermédiaire d'un redresseur. Inconvénients : besoin d'un circuit d'excitation et de bagues et stratégie de commande plus complexe.

G- Par rapport à la configuration précédente, celle-ci permet un fonctionnement à vitesse variable si le convertisseur lié au réseau est un convertisseur de fréquence à quatre quadrants.

H- Cette configuration contient un générateur synchrone multipolaire, évitant ainsi l'utilisation d'un multiplicateur.

I.5. Autres caractéristiques:

I.5.1 Système isolé ou connecté:

Les aérogénérateurs sont soit connectés au réseau, soit isolés. Ces derniers servent surtout à alimenter des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés. Ces aérogénérateurs sont plus petits et ne représentent que 0,8% de la puissance électrique générée à partir du vent dans le monde .Ainsi la plus grande partie des aérogénérateurs sont connectés à des réseaux électriques, et c'est surtout la technologie de ces machines qui a progressée ces dernières années. [4]

I.5.2. Nombre de pales:

Les aérogénérateurs ont plus ou moins de pales, plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les aérogénérateurs modernes ont 1 ,2 ou 3 pales. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles Produisent plus de fluctuations mécaniques, elles ont un rendement énergétique moindre, elles font plus de bruit dans la mesure où elles vont plus vite et elles provoquent un impact visuel plus important. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants réalisent des aérogénérateurs tri-pales. [1].

I.5.3 Axe horizontal ou vertical :

Les aérogénérateurs sont à axe horizontal ou vertical. Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur plus faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché. [4].

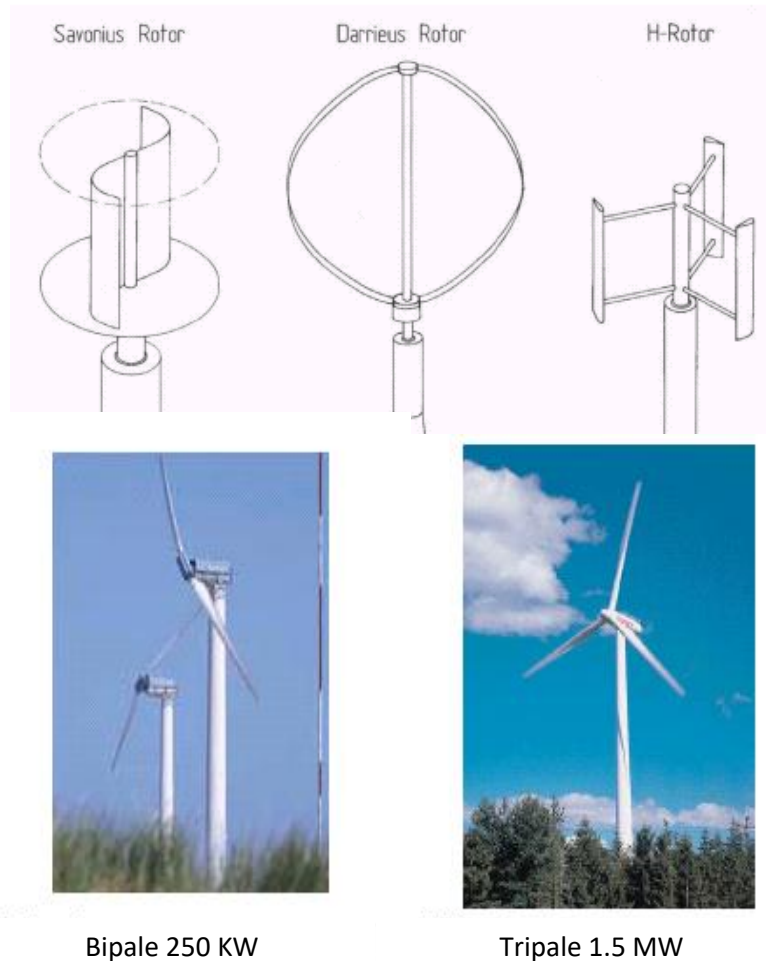


Fig. (I.8) : Des Aérogénérateurs à axe horizontal.

I.6. Système de génération étudié dans ce mémoire:

La machine asynchrone à double alimentation présente des avantages distincts par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil conventionnelle. La MADA peut être alimentée et contrôlée par l'un ou les deux côtés statorique et rotorique. Le schéma type de connexion de la MADA donné par la figure (I.9) est le plus utilisé dans la littérature, vue que le convertisseur de puissance associé au circuit rotorique traite seulement de 20-30% de toute la puissance du système.

Il existe deux types de convertisseurs de puissance contrôlés pour l'alimentation du rotor tel que le convertisseur matriciel DC/AC qui représente des difficultés pour le système de contrôle et qui nécessite un système de protection compliqué, l'autre type consiste à utiliser un redresseur et un onduleur contrôlé. Ce dernier type offre une robustesse au réglage de la puissance active et réactive transmises au rotor. [5].

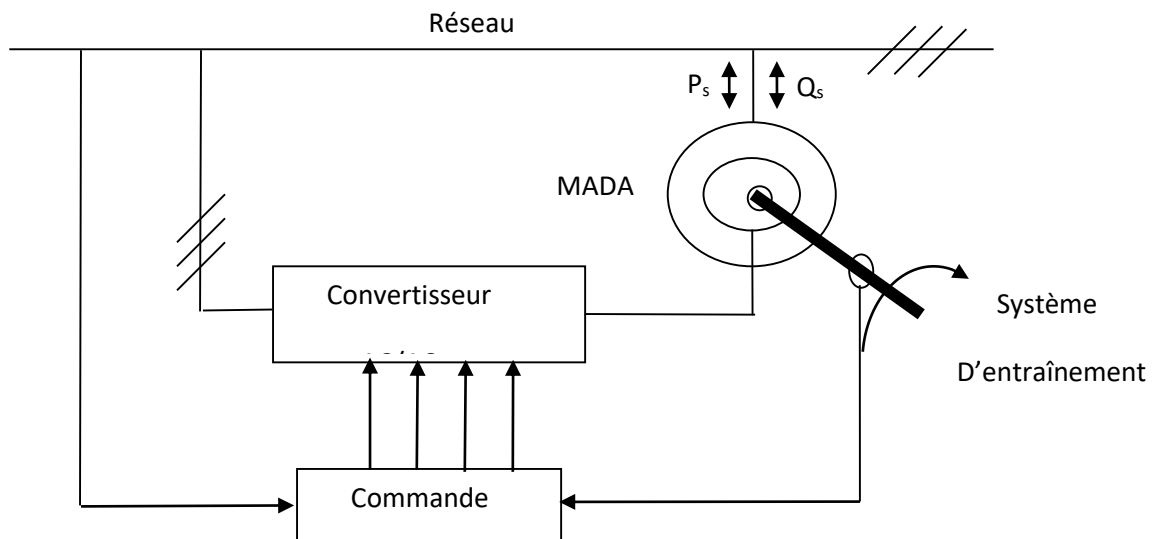


Fig. (I.9) : Schéma de conversion typique de la MADA.

Il nous a semblé utile de mettre en évidence le gain sur la puissance de dimensionnement de la partie alimentée à courant et fréquence variables (généralement le rotor). Rappelons d'abord que la cascade hypo synchrone, qui fonctionnait en régime moteur avec un convertisseur non réversible (de la puissance était prélevée au rotor et envoyée sur la source à fréquence fixe), constituait une version minimale de la machine doublement alimentée, parfois appelée machine généralisée.

Le double alimentation, concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statorique et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné. Lorsqu'on alimente le stator et le rotor d'un moteur asynchrone à partir d'un même réseau, simultanément, le courant statorique i_s va créer un champ magnétique qui tourne à la vitesse $n_1 = f_s/p$. et le courant rotorique i_r va créer aussi un champ magnétique tournant à la vitesse $n_2 = \pm n_1$. Le signe $\pm$ indique que le sens de rotation du champ magnétique rotorique par rapport au champ statorique. Dans ce cas le moteur à double alimentation tourne à la vitesse $n = n_1 \pm n_2$, c'est-à-dire qu'on a deux cas ($n=0$ et $n=2 n_1$) donc la machine peut fonctionner à une vitesse double du synchronisme à vide.

Une technologie qui permet de faire varier la vitesse d'une machine asynchrone, ici alimentée au stator par un réseau fixe à 50 Hz et au rotor par des sources de tension, consiste à utiliser le système de Scherbius dans lequel un cyclo-convertisseur commande l'écoulement d'énergie dans le circuit rotorique.

La machine à double alimentation s'apparente fortement la machine asynchrone à rotor bobiné classique, du point de vue technologique il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car cette dernière est toujours, d'actualité, son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de la vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, ou encore pour sa possibilité de démarrer sans demander un courant élevé.

Ces machines sont classiques, et ne posent pas de problèmes particuliers de réalisation.

La machine à double alimentation est une machine asynchrone à rotor bobiné possédant des enroulements triphasés au stator et rotor.

Cette machine a fait l'objet de trois variantes de fonctionnement:

- La première fonctionne en alternateur.
- La deuxième fonctionne aussi en moteur mais elle est alimentée par deux convertisseurs.
- La troisième fonctionne en moteur, et elle est alimentée par un seul convertisseur.

Le cas de nos études basé sur le troisième type de fonctionnement. Dans ce fonctionnement le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, par contre le rotor est alimenté par un convertisseur qui peut être un cyclo-convertisseur ou un onduleur, cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur à condition que le système à entraîner tolère une interprétation du couple à une certaine vitesse.

La machine à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette commande, ce qui permet de trouver un domaine d'application très vaste.

I.7. Bilan énergétique

Le bilan énergétique simplifié (pas de pertes dans la transmission de la puissance statorique vers le rotor) d'une machine à induction aide considérablement à la compréhension.

Les relations algébriques (en convention motrice, récepteur électrique au stator et générateur au rotor) entre les puissances statorique, rotorique et mécanique sont rappelées ci-dessous:

$$P_{em} = P_{stat} = \frac{P_{méca}}{1-g} \text{ et } P_{rot} = \frac{g}{1-g} P_{méca} \quad (1)$$

$$\text{Où } g \text{ est le glissement classique : } g = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_s} \quad (2)$$

Ω Et Ω_s sont les vitesses de rotation respectivement du rotor et du champ tournant (imposée par l'alimentation du stator à fréquence et tension fixes). Considérons le cas où la vitesse de rotation Ω varie dans une plage déterminée par g_{max} symétrique autour de Ω_s . Pour illustrer les expressions (1) la figure (I.10) donne les transferts d'énergie et leurs proportions dans les quatre situations extrêmes (hypo et hyper synchrone), en moteur et en générateur.

	Ex. : $g = g_{Max} = +0,5$ hyposynchrone $\Omega = 0,5.\Omega_s$	Ex. : $g = -g_{Max} = -0,5$ hypersynchrone $\Omega = 1,5.\Omega_s$
Récepteur Moteur $P_{méca} > 0$		
Générateur Frein $P_{méca} < 0$		

Fig. (I.10)- Transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la vitesse varie de la moitié ou double de Ω_s .

I.8. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons vu que le domaine des énergies renouvelables, notamment l'éolien, représente une nouvelle opportunité pour les recherches en Génie Electrique .Ces recherches seront d'autant plus fructueuses qu'elles seront suffisamment pluridisciplinaires ainsi que l'exigent de ses systèmes complexes.

Dans notre travail, nous nous intéressons à la commande des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) entraînée à une vitesse autour de celle de synchronisme .Ainsi que le rotor de cette dernière est alimenté par un redresseur associé à un onduleur de tension.

Modélisation et Simulation de la MADA

II.1 Machine asynchrone à double alimentation : classification et application

II.1-1 Description de la machine à double alimentation :

La machine à double alimentation en anglo-saxon "*doubly-fed induction machine* (DFIM)" est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers les enroulements rotoriques.

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux cotés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction, [5].

II.1-2 Classification et comparaison :

La classification de la machine asynchrone à double alimentation est obtenue à partir d'une recherche historique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation, [6].

Le schéma (II-1), illustre les différentes catégories les plus connues de la machine à double alimentation. Ceux sont :

- * (MDASC) : Machine à double alimentation sans collecteur.
- * (MDAS) : Machine à double alimentation standard à rotor bobiné.
- * (MDACA) : Machine à double alimentation en cascade asynchrone.
- * (MADS) : Machine asynchrone à double stator.
- * (MDACA-SA) : Machine à double alimentation en cascade asynchrone avec un seul stator.
- * (MDARV) : Machine à double alimentation à reluctance variable.

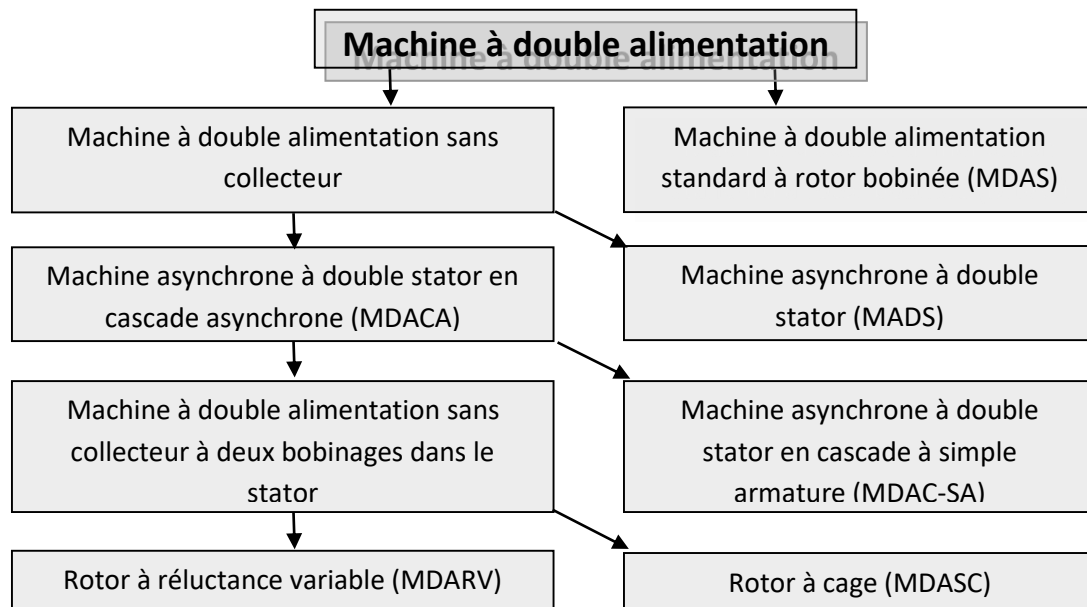


Fig. (II-1) : Les différentes variétés de la machine à double alimentation.

Les schémas de principe pour les variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et qui sont beaucoup plus développées dans la littérature sont données ci-dessous.

II.1-2-1 Machine à double alimentation standard (MDAS) :

La machine à double alimentation standard, est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague. La figure (II-2) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe), [6].

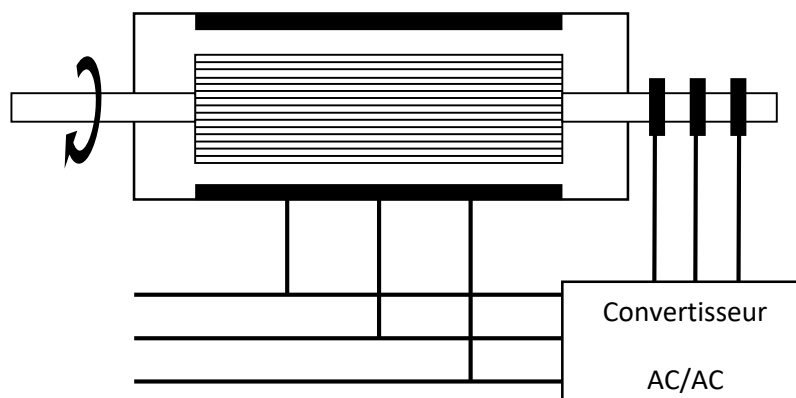


Fig. (II-2) : Schéma de principe de la machine à double alimentation standard.

II.1-2-2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone (DACA) :

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste à deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré par la figure (II-3), tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif. Dans ce cas là, et dès que les tensions rotorique dans les deux machines sont égales, il est également possible de piloter la machine qui est connecté directement au réseau par celle alimentée par le convertisseur, [6].

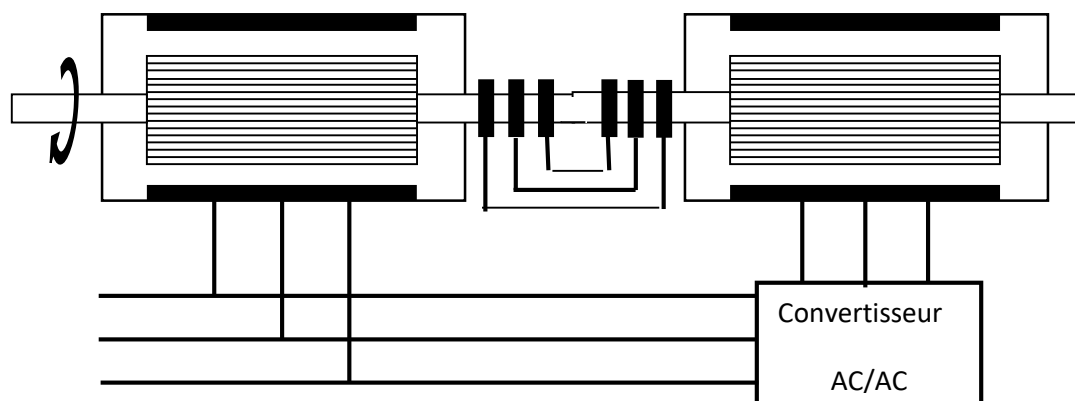


Fig. (II-3) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.

Ce type des machines offre la possibilité d'obtenir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard.

Dans la pratique, il est possible de combiner deux machines asynchrones à double alimentation dans une seule machine avec un comportement identique à celui de la machine à double alimentation en cascade asynchrone, tel que les deux enroulements des stators sont prolongés dans une seule armature et le rotor soit à cage d'écureuil, comme dans le cas de la machine à double alimentation en cascade avec un seul stator.

II.1-2-3 Machine à double alimentation sans collecteur (MDASC) :

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, figure (II-4). Ce type des machines consiste à deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles.

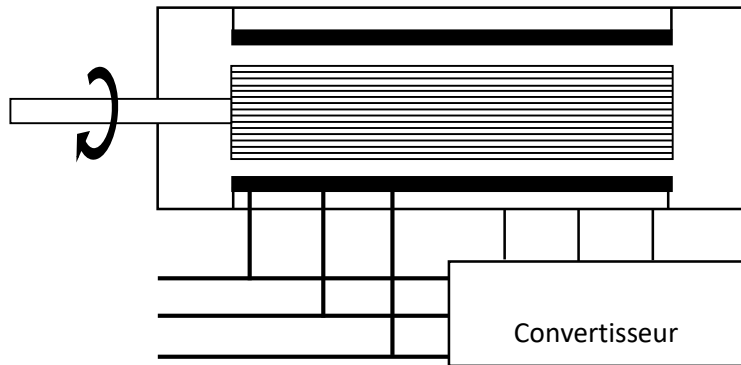


Fig. (II-4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans collecteur, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste à un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans collecteur et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable). 7 dernière est caractérisée par un flux d'entrefer pulsatoire, [6].

La MDAS, MDACA, MDASC, MDACA-SA, et la MDARV utilisent toutes un convertisseur bidirectionnel de puissance pour la commande de la vitesse désirée, qui doit être autour de la vitesse de synchronisme. Plus la gamme opérationnelle est mince plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite.

Commercialement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Cependant, la machine la plus attractive semble être la machine à double alimentation à réluctance variable (MDARV), qui est analogue à la machine à double alimentation standard (à rotor bobiné) par sa commande et son modèle. D'autre part, le courant réduit dans le rotor de la MDACA, MDA-SA, et le MDASC signifie un rendement élevé, [5,6].

D'après cette comparaison illustrée par le tableau, on constate que la machine à double alimentation standard (MDAS), représente une construction établie et simple par rapport aux autres types des machines. Sa commande se fait sur la base d'un convertisseur de puissance disponible (AC/AC); de plus cette machine possède une commande par orientation du flux statorique afin d'obtenir un découplage entre les puissances active et réactive.

L'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique rendre la machine à double alimentation plus attractive par de nombreux chercheurs, vu que cette dernière est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application, [1].

II.1-3 Connexion au réseau :

Contrairement à certaines machines synchrones, qui ont des convertisseurs qui sont traversés par 100% de la puissance nominale, les convertisseurs associés à la MADA sont dimensionnés pour traiter seulement 25 à 30% de la puissance nominale. Ils coûtent moins chers et sont moins encombrants. Ils permettent de piloter la MADA par le rotor en réglant sa vitesse de rotation autour de celle de synchronisme.

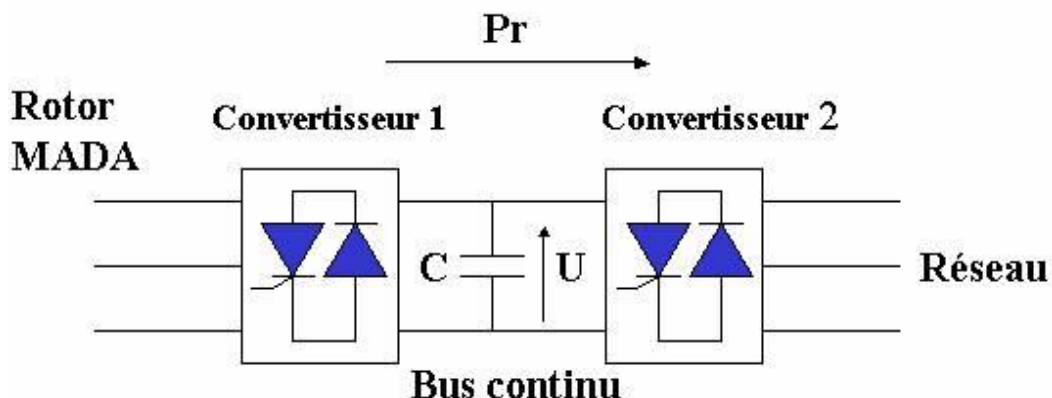
Nous allons étudier dans le paragraphe suivant les convertisseurs de puissance statiques qui relient le rotor de la MADA avec le réseau. Ainsi que, les enroulements triphasés du stator sont directement reliés au réseau.

Le convertisseur statique se compose d'un redresseur, un bus continu et un onduleur. Il est réversible en courant puisque la puissance rotorique (P_r) transitée par le convertisseur dans un sens pour un fonctionnement hypersynchrone, et dans le sens opposer pour un fonctionnement hyposynchrone. L'onduleur devient redresseur et le redresseur devient onduleur.

Sachant que ($P_r = g \cdot p_s$), et que généralement, la valeur absolue du glissement ' g ' est très inférieur à 1, p_r est seulement une fraction de la puissance statorique p_s . Le signe de p_r change avec le glissement g .

On a deux modes de fonctionnement possibles pour la génératrice selon le signe du glissement g :

Sens 1 : Fonctionnement en mode hypersynchrone :

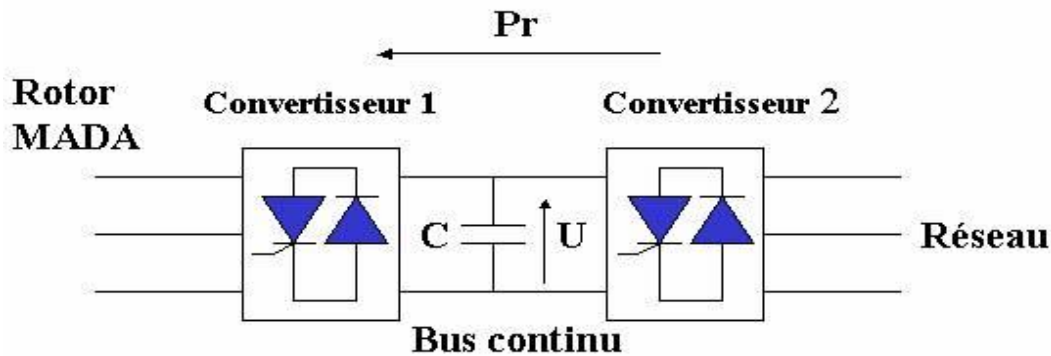


Le convertisseur 1 fonctionne en redresseur. Le redresseur transforme la tension alternative et le courant alternatif délivrés par la MADA en tension continue et courant continu. Le condensateur crée un bus intermédiaire.

Le convertisseur 2 fonctionne en onduleur. L'onduleur récupère cette tension continue et ce courant continu. On règle la commande de l'onduleur pour ajuster et obtenir à la sortie de l'onduleur un signal avec une amplitude et une fréquence adaptées à celles du réseau, après le passage par le transformateur élévateur de tension.

Le passage par le bus continu est indispensable pour permettre à l'onduleur de réguler l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie. Le réseau est considéré comme une source de courant, car on prend en compte les inductances du réseau, [7].

Sens 2 : Fonctionnement en mode hyposynchrone :



Le convertisseur 2 fonctionne comme redresseur. Il transforme le signal fourni par le réseau en signal continu.

Le convertisseur 1 fonctionne en onduleur. L'onduleur règle l'amplitude et la fréquence du signal à envoyer vers le rotor de la MADA : Il agit sur les tensions aux bornes des circuits rotoriques pour alimenter la machine à courant alternatif, [7].

II.1-4 Principe de fonctionnement de la MADA :

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le rotor a des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel avec un système ballast bague. Le stator désigné par "s" et le rotor par "r", et par " n_p " le nombre de paires de pôles de la machine, défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme suit :

$$f_s = f_r + n_p f_m \quad (\text{II-1})$$

Avec f_m : la fréquence de rotation du rotor.

Le glissement g est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (\text{II-2})$$

n_m : est la vitesse mécanique du rotor et n_s la vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{n_p} \quad (\text{II-3})$$

Les figures (II-5) et (II-6) représentent l'évolution de la fréquence et de la tension du rotor en fonction du glissement, où le circuit du stator est alimenté directement par le réseau et le rotor en circuit ouvert, ces grandeurs dépendent de la vitesse opérationnelle de la machine, [6].

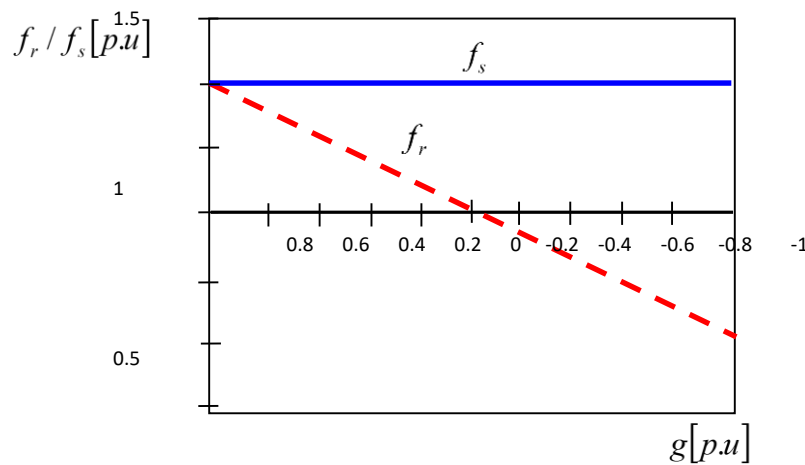


Fig. (II-5) : Fréquences de la MADA en fonction de

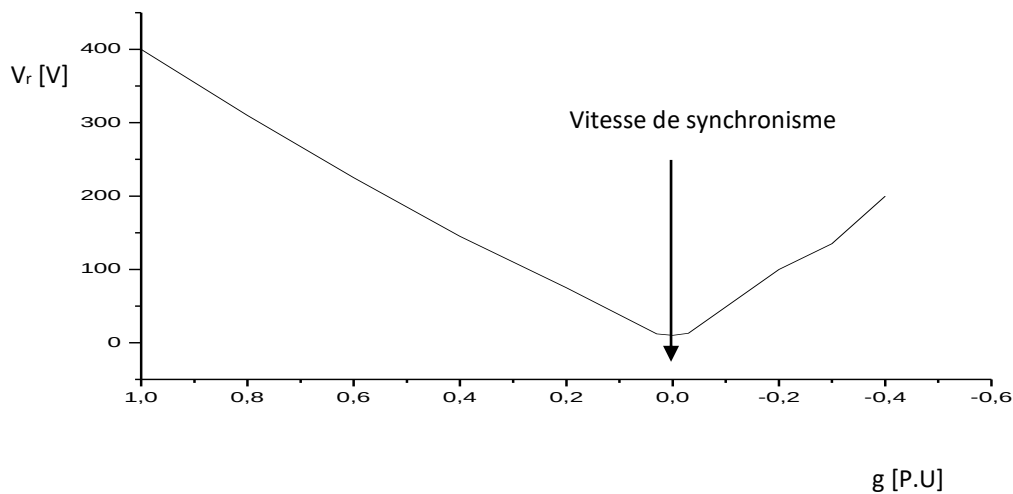


Fig. (II-6) : Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peut être divisés en fonction de glissement comme suit :

- **Stationnaire** ($g = 1$) : Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Par conséquent, le rotor est le siège d'une F.é.m. induit avec une fréquence f_r identique à f_s . Dans ce cas là, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- **Hyposynchrone** ($0 < g < 1$) : En tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître (Fig. (II-5)). Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchrone, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone** ($g = 0$) : C'est le point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Autrement dit, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hypersynchrone** ($g < 0$) : Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (I-2) et (I-3). Cette valeur négative signifie que l'ordre de phase du rotor " a_r, b_r, c_r " s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

II.1-5 Ecoulement des puissances dans la MADA :

Les puissances (en ignorant les pertes) de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$P_r = -gP_s \quad (\text{II-4})$$

$$P_m = -(1-g)P_s \quad (\text{II-5})$$

Quand la puissance s'écoule vers l'arbre de la machine où elle se transforme en énergie mécanique, cette puissance prend un signe positif. À l'arrêt de la machine, l'écoulement de puissance se fait seulement entre le stator et le rotor et inversement et dans ce cas la machine se comporte comme un transformateur. À l'accélération, la puissance mécanique augmente linéairement, par contre la puissance transmise au rotor décroît. Quand la machine atteint sa vitesse de synchronisme, l'écoulement de la puissance se transmet seulement entre le stator et l'axe

mécanique. Au-delà de la vitesse de synchronisme, le sens d'écoulement de puissance s'inverse avec une augmentation linéaire. Ce comportement est également illustré par la figure (II-8) pour les deux régimes de fonctionnement hyposynchrone et hypersynchrone de la génératrice asynchrone à double alimentation, [5].

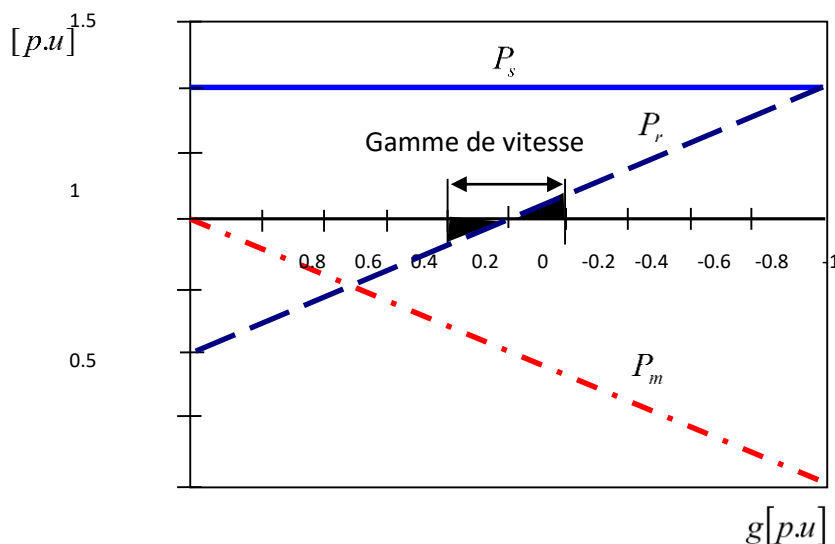


Fig. (II-7) : Puissances de la GADA (pertes négligeable, couple constant) en fonction de glissement.

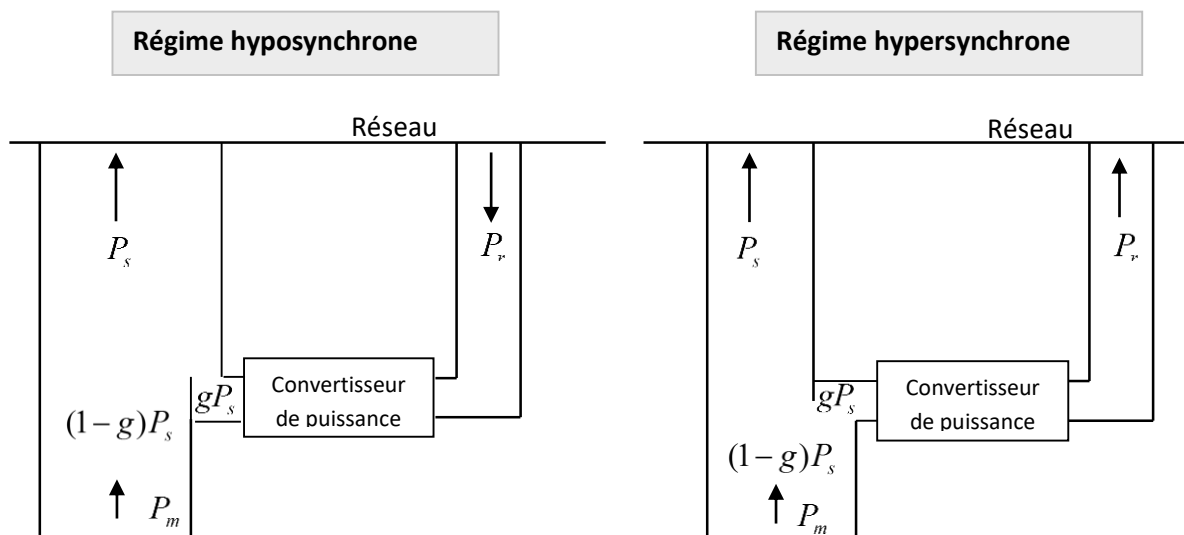


Fig. (II-8) : Diagramme de puissance de la MADA.

	Moteur $P_m < 0$	Génératrice $P_m > 0$
Hyposynchrone $P_s = -(P_m + P_r)$	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
Hypersynchrone $P_m = -(P_s + P_r)$	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$

D'après la figure (II-7), on constate que la puissance à travers le convertisseur associé au rotor en régime hyposynchrone, s'écoule seulement entre le stator et le réseau ; par contre cet écoulement s'inverse en régime hypersynchrone. C'est-à-dire que la puissance s'écoule à partir du rotor vers le réseau, comme il est montré par la figure (II-8).

Par exemple, une gamme de vitesse de $\pm 20\%$ autour du point de synchronisme correspondant à une gamme de glissement de 0.2 à -0.2. Ceci limite la puissance active maximale traité par le convertisseur à 20% de la puissance du stator, [5].

La puissance réactive est définie comme suit :

$$Q_{sr} = Q_s + \frac{Q_r}{|g|} \quad (\text{II-6})$$

Q_s et Q_r sont les puissances réactives respectivement du stator et du rotor ;

Q_{sr} est la somme des puissances réactives requises pour établir le flux de fuite et de magnétisant dans la MADA.

La puissance apparente maximale du rotor S_r est liée du celle du stator S_s par l'expression suivante :

$$S_r = |g_{\max}| \cdot S_s \quad (\text{II-7})$$

Avec $g_{\max}$ le glissement maximal pour une gamme de vitesse bien définie.

II.1-6 Domaine d'application de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone et surtout en ce qui concerne la gamme de vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques

avec une vitesse variable et à fréquence constante (VVFC), comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau, [6].

II.1-7 L'application de la MADA dans les systèmes éoliens :

Actuellement, la majorité des éoliennes installées de puissance supérieure à 1 MW utilisant une machine asynchrone pilotée par le rotor.

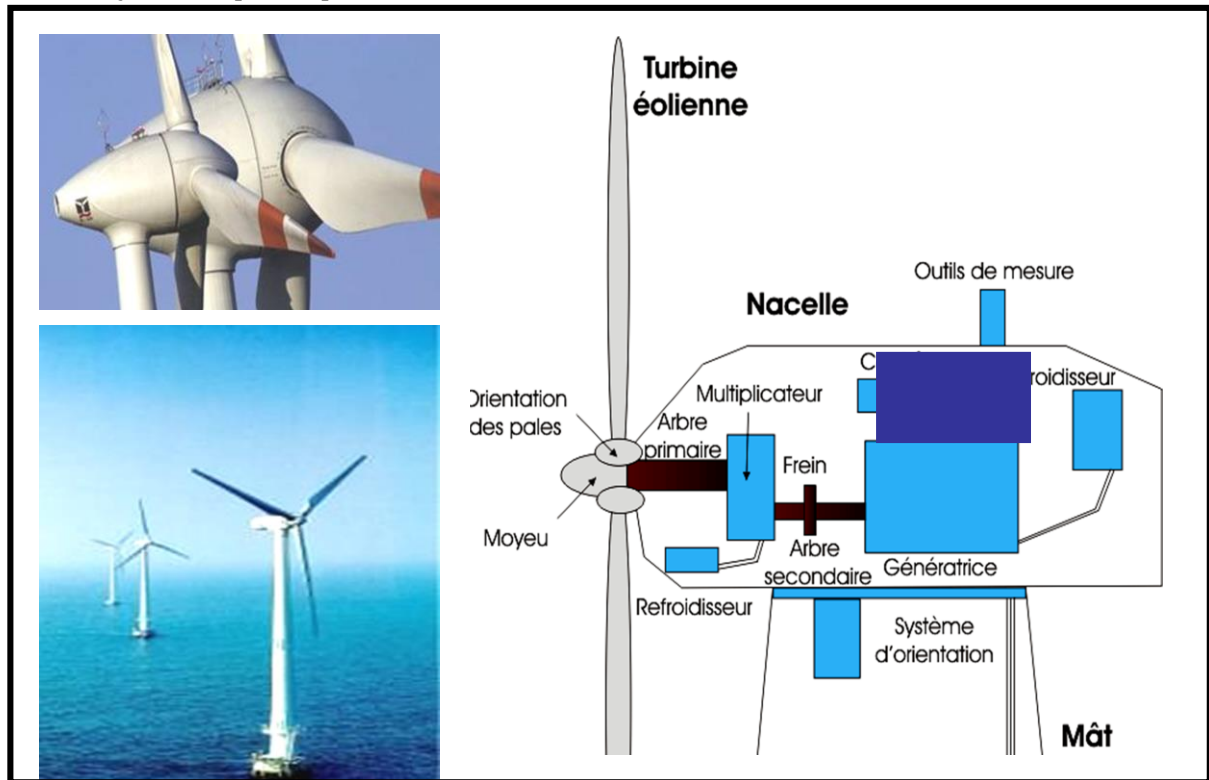
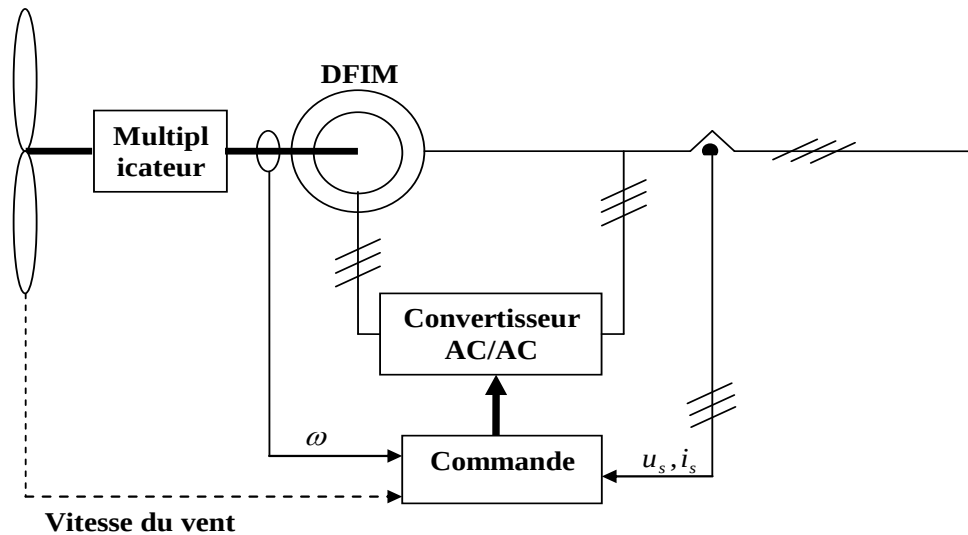


Fig. (II-9) : Eolienne installée en mer.

Les turbines de vent sont construites pour des puissances allant jusqu'à 4.5 MW. On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer, vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante. Une synthèse bibliographique a mis en évidence l'abondante littérature sur ce sujet a permis d'identifier un système d'alimentation particulière adéquat reposant sur l'utilisation d'un convertisseur AC/AC (cyclo-convertisseur) ou bien AC/DC/AC (redresseur-onduleur), figure(II-10). Les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la puissance rotorique qui représente environ de 20 à 30% de la puissance nominale. C'est le principal intérêt de cette technique.



II.1-8 Intérêt de la MADA :

On explique ici pourquoi utiliser une MADA plutôt qu'un autre type de génératrice. Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme, car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Comme la vitesse du vent fluctue beaucoup, la puissance captée varie. Mais il faut pouvoir livrer au réseau la puissance nominale voulue.

Pour cela, le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor, en fonction de la vitesse du vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent, [7].

II.1-9 Conclusion :

La machine à double alimentation offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste, notamment dans les systèmes de génération de l'énergie électrique. L'avantage principale de la MADA dans les systèmes de génération de l'énergie électrique est que le convertisseur associé au circuit du rotor ne traite qu'une fraction de 20 à 30% de toute la puissance du système, ce qui permet de minimiser les pertes et le coût de production.

La maîtrise et la compréhension du comportement de ce type des machines passe obligatoirement par une étude modélisation, qui est l'objectif du chapitre suivant.

II.2 Modélisation et simulation de la MADA

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ainsi la modélisation permet de guider les développements par une quantification des phénomènes. En outre elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Pour obtenir le modèle d'un système ; trois tâches doivent être accomplies : choisir le modèle, déterminer ses paramètres et enfin vérifier sa validité. [8]

II.2-1 Modèle mathématique de la MADA :

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entres/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état. Ce modèle mathématique a pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

II.2-1-1 Hypothèses de simplification :

Pour simplifier l'étude de la machine asynchrone idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La parfaite symétrie de la machine tant magnétique qu'électrique.
- Les forces magnétomotrices créées par chaque phase du stator ou rotor ont une répartition sinusoïdale.
- L'effet de la variation de la température sur les résistances statorique et rotorique est négligeable.
- On néglige l'effet de peau.
- L'entrefer est constant.
- Le circuit magnétique non saturé et perméabilité constant.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.

La machine asynchrone à double alimentation doit être représentée dans le système triphasé par la figure (II-11)

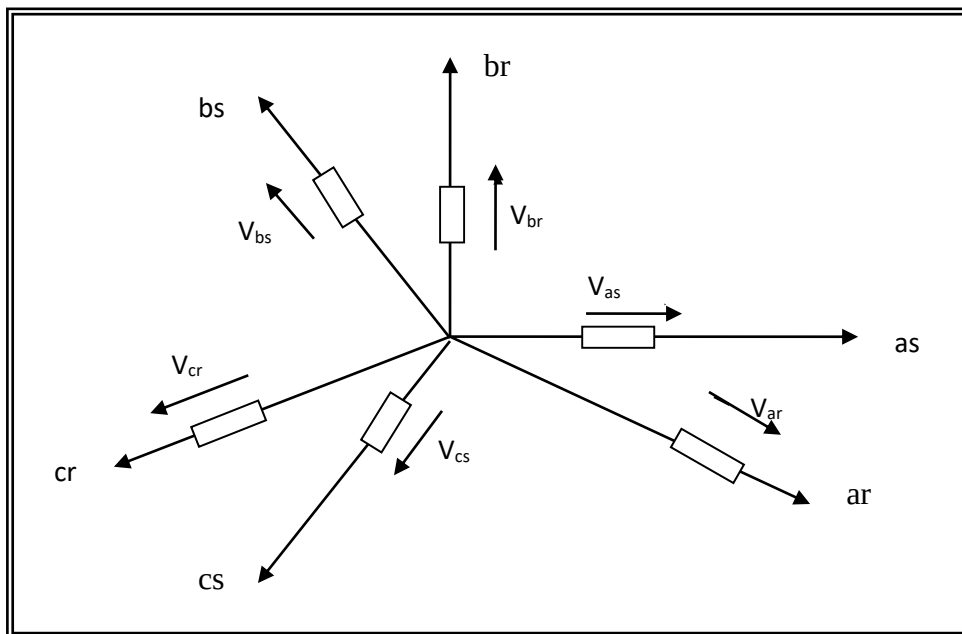


Figure (II-11) Représentation schématique de la MADA

II.2-1-2 Equations électriques :

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

$$\text{Pour le stator : } \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

$$\text{Pour le rotor : } \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

II.2-1-3 Equations magnétiques :

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & L_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

avec:

$$M_1 = M \cos(\theta)$$

$$M_2 = M \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_3 = M \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

II.2-2 équations électriques et magnétique aux systèmes d'axe (U, V) :

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (U, V) sont données par :

$$\begin{cases} V_{us} = R_s I_{us} + \frac{d\Phi_{us}}{dt} - W_{cor} \Phi_{vs} \\ V_{vs} = R_s I_{vs} + \frac{d\Phi_{vs}}{dt} + W_{cor} \Phi_{us} \\ V_{ur} = R_r I_{ur} + \frac{d\Phi_{ur}}{dt} - (W_{cor} - W) \Phi_{vr} \\ V_{vr} = R_r I_{vr} + \frac{d\Phi_{vr}}{dt} + (W_{cor} - W) \Phi_{ur} \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

Avec : W : Vitesse rotorique.

W_{cor} : Vitesse du système d'axe (U, V).

Les expressions des flux statorique et rotorique dans (U, V)

$$\begin{cases} \Phi_{us} = l_s I_{us} + M I_{ur} \\ \Phi_{vs} = l_s I_{vs} + M I_{vr} \\ \Phi_{ur} = l_r I_{ur} + M I_{us} \\ \Phi_{vr} = l_r I_{vr} + M I_{vs} \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

$l_r = L_r - M_r$: inductance cyclique propre du rotor .

$l_s = L_s - M_s$: inductance cyclique propre du stator .

$M = 3/2 l_m$: inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature du rotor.

II.2-2-1 Choix de référentiel :

Pour effectuer une étude par simulation du moteur asynchrone, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe.

A partir du système d'axe (U,V) on peut avoir d'autres d'axes qui sont des cas particuliers, dans la suite , les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.2-2-a. Référentiel fixé par rapport au stator (α, β) :

Les axes de référence sont fixés par rapport au stator d'ou :

$$W_{coord}=0 \Leftrightarrow \begin{cases} U \rightarrow \alpha \\ V \rightarrow \beta \end{cases}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Ce référentiel sera choisi en vue d'étudier les variations des grandeurs rotoriques.

II.2-2-b. Référentiel fixé par rapport au rotor (x , y) :

Les axes de référence sont fixés par rapport au rotor d'ou :

$$W_{coord} = W \Leftrightarrow \begin{cases} U \rightarrow X \\ V \rightarrow Y \end{cases}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{xs} \\ V_{ys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xs} \\ I_{ys} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W \\ W & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

$$\begin{bmatrix} V_{xr} \\ V_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xr} \\ I_{yr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xr} \\ \Phi_{yr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-16})$$

Ce référentiel est utilisé pour l'étude des grandeurs statorique.

II.2-2-c. Référentiel fixé par rapport au champ tournant :

Pour un référentiel lié au champ tournant, on a $W_{\text{coor}} = W_s$ dans le système d'équation devient comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W_s \\ W_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-17})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W \\ W & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

Les expressions des flux sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux. En remplace (II-19) dans (II-17) et (II-18) on obtient :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + l_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - W_s l_s I_{qs} - W_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + l_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} + W_s l_s I_{ds} + W_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + l_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - W l_r I_{qr} - W M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + l_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + W l_r I_{dr} + W M I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

En générale, le référentiel lié au champ tournant est utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel à un fait que les grandeurs deviennent continues.

► De plus, les équations représentant le mouvement mécanique sont données par :

$$\begin{cases} C_e = \frac{3pM}{2L_s} (\Phi_{qs} I_{dr} - \Phi_{ds} I_{qr}) & (II-21) \\ C_e - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega & (II-22) \end{cases}$$

II.2-3 Simulation de la machine asynchrone a double alimentation :

II.2-3-1 Structure sous forme de schéma bloc :

Pour simplifier cette étude, on a choisi la représentation sous forme schéma –bloc, qui nous permettra la simulation par Simulink sous MATLAB.

Pour une machine MADA alimentée en tensions statorique (V_{ds}, V_{qs}), et les tensions rotorique (V_{dr}, V_{qr}) et la vitesse de champ tournant W_s sont considérées comme variable de commande, le couple résistant C_r comme perturbation.

On a choisi le référentiel lié au champ tournant, le modèle de la machine MADA alimentée en tension est représenté par les équations (II-17), (II-18), (II-19) et les équations mécaniques (II-25) et (II-26).

II.2-3-2 Equation d'état :

Nous considérons les flux statorique, les courants rotoriques et la vitesse mécanique ($\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}, \Omega$) comme variable d'état,. D'après les équations (II-17), (II-18), et (II-19) et les équations mécaniques ce système devient comme suit :

- Equations électriques :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (II-23)$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & W_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -W_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \frac{M}{T_s L_s L_r \delta} & \frac{-MW}{L_s L_r \delta} & -\frac{1}{T_r \delta} - \frac{M^2}{L_r L_s T_s \delta} & W_s - W \\ \frac{MW}{L_s L_r \delta} & \frac{M}{T_s L_s L_r \delta} & -W_s + W & -\frac{1}{T_s \delta} - \frac{M^2}{T_s L_s L_r \delta} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{L_s L_r \delta} & 0 & \frac{1}{L_r \delta} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{L_s L_r \delta} & 0 & \frac{1}{\delta L_r} \end{bmatrix}$$

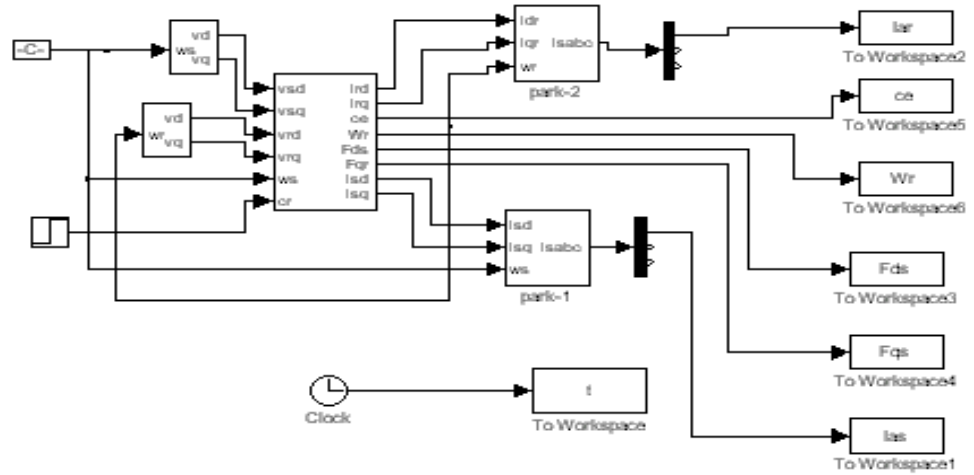
Remarque :

On peut écrire la matrice $[A]$ sous la forme : $[A]=[A1]+[A2]W+[A3]Ws$

$$[A1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \frac{M}{L_r L_s T_s \delta} & 0 & \frac{-R_r}{L_r \delta} - \frac{M^2}{L_r L_s T_s \delta} & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_r L_s \delta T_s} & 0 & \frac{-R_r}{L_r \delta} - \frac{M^2}{L_r L_s T_s \delta} \end{bmatrix}$$

$$[A2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\delta L_s L_r} & 0 & -1 \\ \frac{M}{\delta L_s L_r} & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad [A3] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Pour réaliser la simulation de la MADA ; nous peut transférer le modèle représenté par les équations (II-21), (II-22) et (II-23) sous forme de structure en schéma bloc qui est présenté sur la figure (II-12).



II.2-5 Résultats de simulation de la MADA :

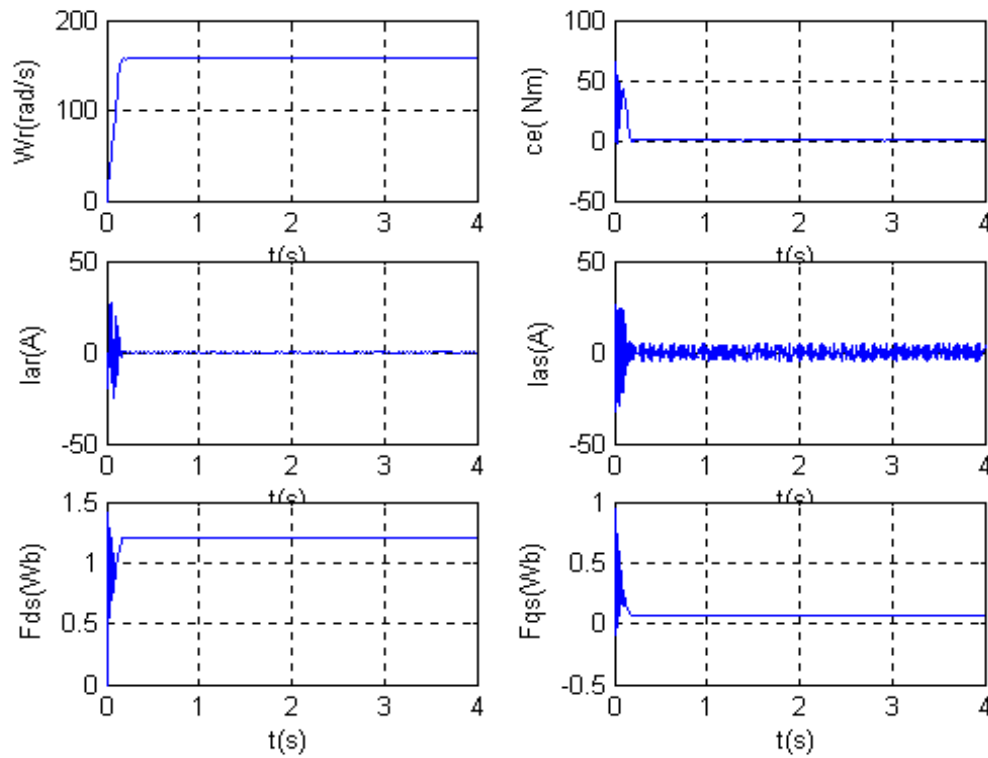


Figure (II-13) Courbes de simulation de la MADA ($V_r=0, f_r=50\text{Hz}, C_r=0$)

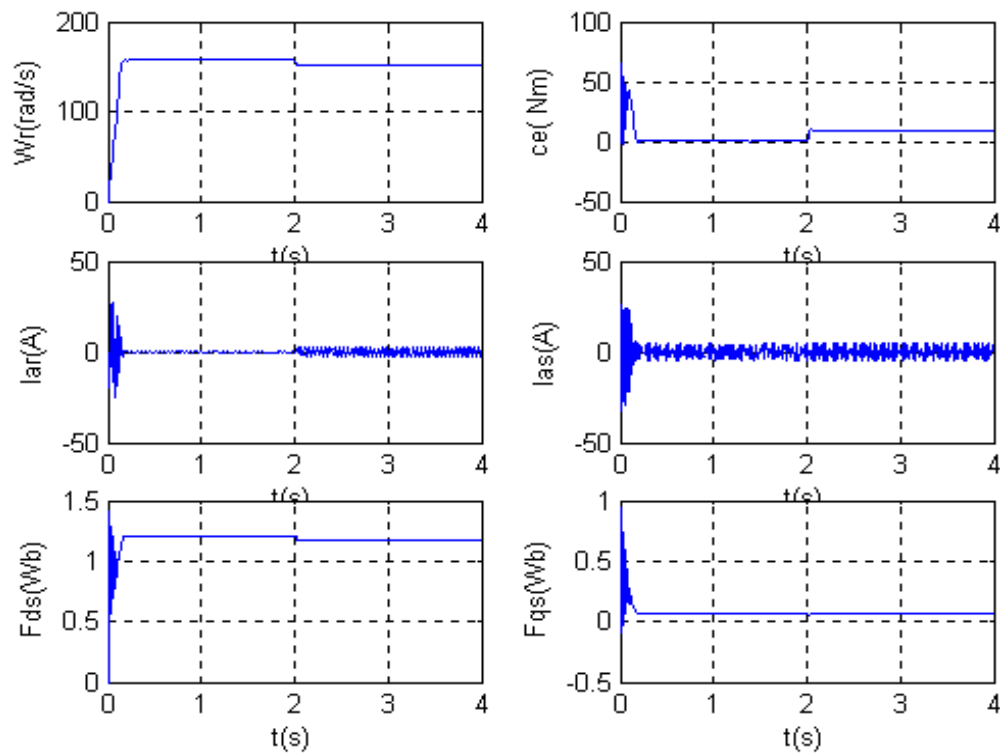


Figure (II-14) Courbes de simulation de la MADA ($V_r=0, f_r=50\text{Hz}, C_r=9\text{N.m}$)

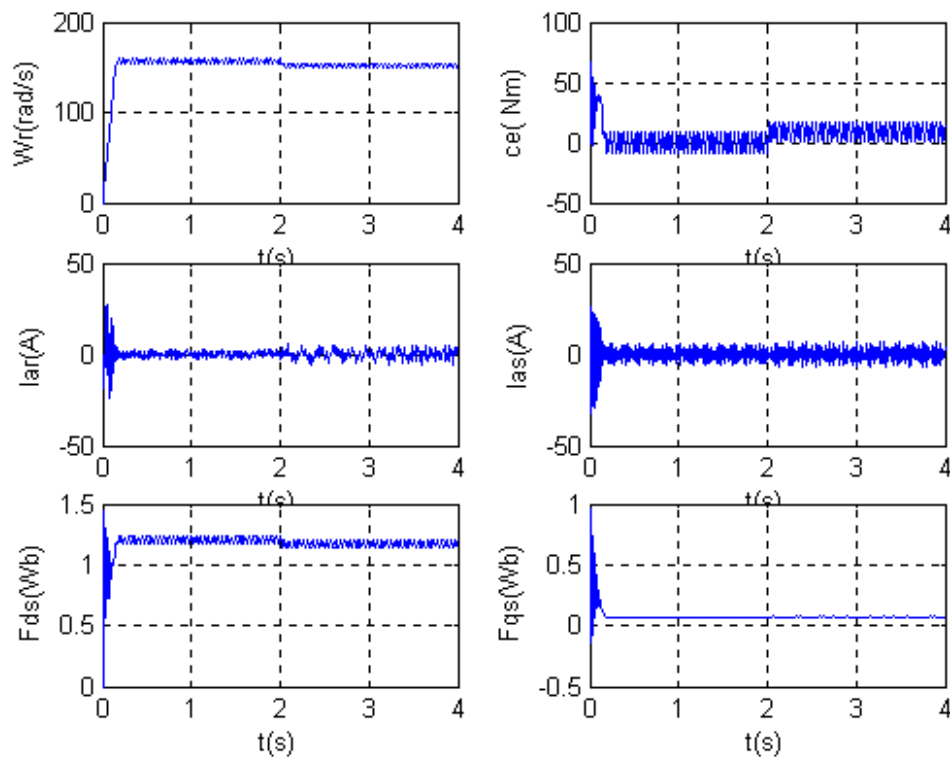


Figure (II-15) Courbes de simulation de la MADA pour ($V_r=12\text{v}$, $f_r=5\text{Hz}$ et $C_r=9\text{N.m}$)

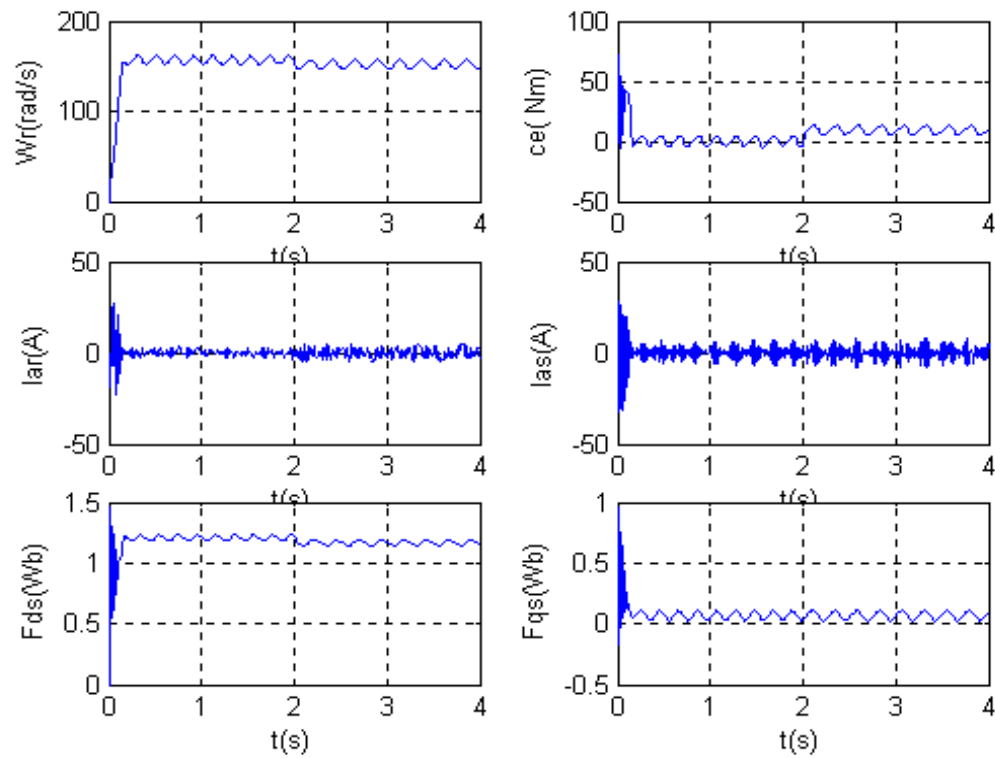


Figure (II-16) Courbes de simulation de la MADA pour ($V_r=12\text{v}$, $f_r=20\text{Hz}$ et $C_r=9\text{N.m}$)

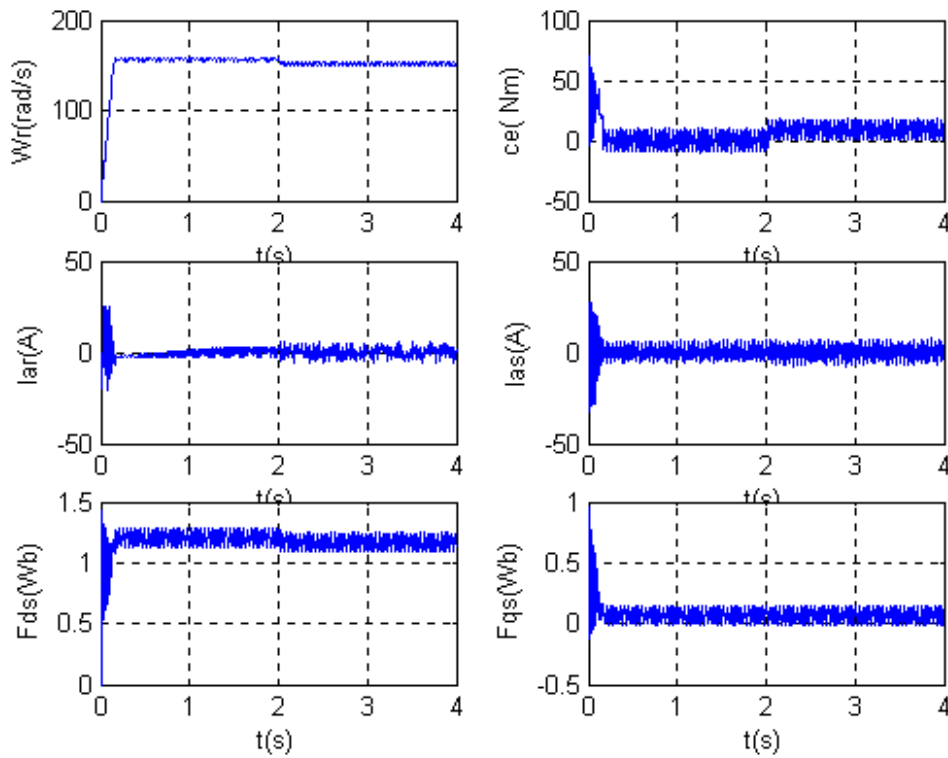


Figure (II-17) Courbes de simulation de la MADA pour ($V_r=12\text{v}$, $f_r=50\text{Hz}$ et $C_r=9\text{N.m}$)

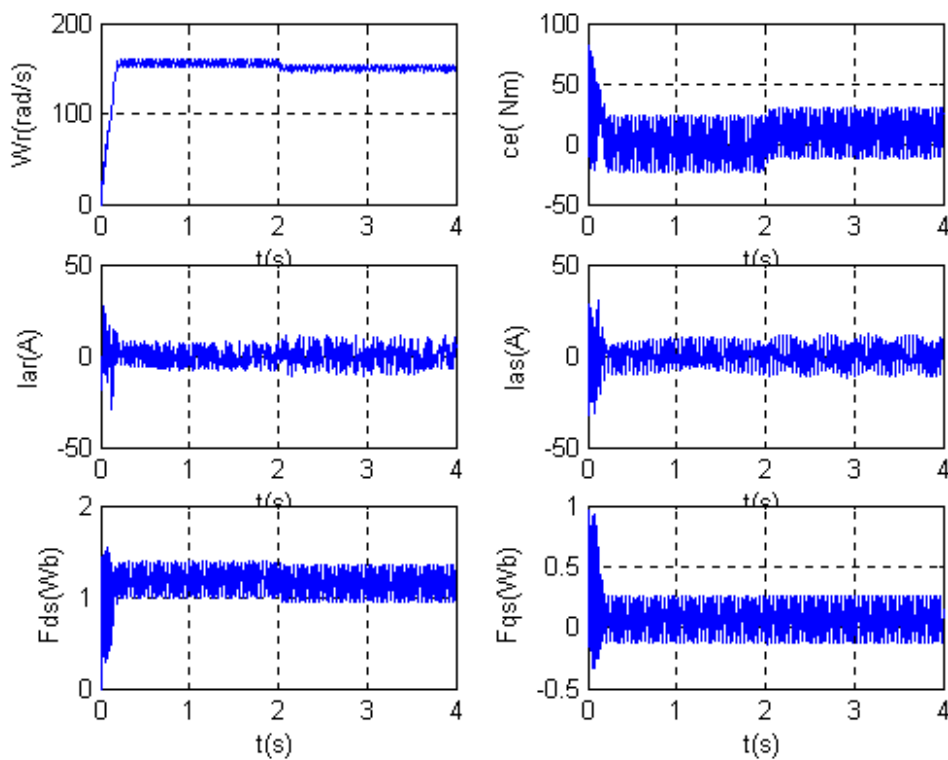


Figure (II-18) Résultats de simulation pour ($V_r=30\text{v}$, $f_r=50\text{Hz}$ et $C_r=9\text{N.m}$)

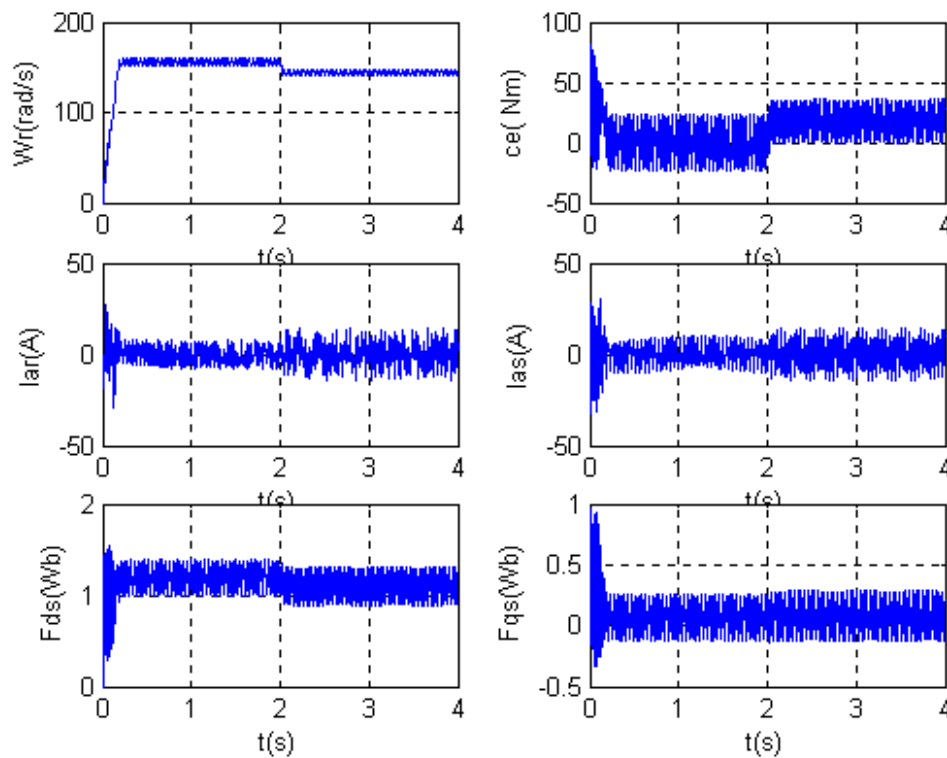


Figure (II-19) Résultats de simulation pour ($V_r=30V$, $f_r=50Hz$ et $C_r=18n.m$)

II.2-6 Interprétation des résultats de simulation :

La tension d'attaque de la MADA à $t=0$ coté stator c'est la tension de réseau électrique à fréquence et tension constantes ($V=220V$; $f=50Hz$). Dans le coté rotorique deux cas sont étudiés ;
 1^{er}cas : tension constante et fréquence variable.

2^{ème}cas : tension variable et fréquence constante.

D'après les résultats de simulation obtenus, on observe que toute variation au niveau de la fréquence rotorique ou tension rotorique a une influence directe sur la vitesse et le couple.

La figure (II-13) représente le fonctionnement de la MADA à vide. (Fonctionnement en simple alimentation MAS).

La figure (II-14) représente le fonctionnement de la MADA en charge. (Fonctionnement en simple alimentation MAS).

Pour les figures (II-15), (II-16) et (II-17), on a appliqué une variation de fréquence rotorique de (5Hz à 50Hz) avec une tension rotorique constante de 12V ; on remarque que cette variation implique des oscillations au niveau des grandeurs de la machine.

Dans le cas de variation de la tension rotorique (12V et 30V) on remarque qu'elle a une influence sur les grandeurs de la machine où des oscillations importantes sont apparaissent comme il est illustré sur les figures (II-17) et (II-18).

On remarque également que cette machine peut supporter le double de sa charge nominale comme il est illustré sur la figure (II-19).

II.2-7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a aussi étudié le modèle de la MADA qui été établi en passant du système réel triphasé du modèle vers un système biphasé de Park.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone double alimentée avec comme variation d'états le courant rotorique et le flux statorique ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple et de la vitesse pour différentes valeurs de fréquence et de tension rotorique.

*Commande du
système éolien à
vitesse variable
basé sur MADA*

III.1. Introduction :

La turbine éolienne permet la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique transmise à l'ordre de la génératrice. Les différents éléments constituant une éolienne sont conçus pour maximiser la conversion énergétique [13].

L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et de la génératrice. Pour satisfaire cela, l'éolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

Dans ce chapitre nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension qui est supposé constante dans le chapitre précédent, ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI.

L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau, par la suite, on a modélisera la turbine, son contrôle, et puis, l'asservissement de toute la chaîne de conversion éolienne.

III-2. Modèle de la chaîne de conversion :

III-2-1. Architecture du dispositif de commande :

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue, qui est fournie par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. La structure montrée sur la figure (III-1) comporte deux convertisseurs à MLI, l'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations [14].

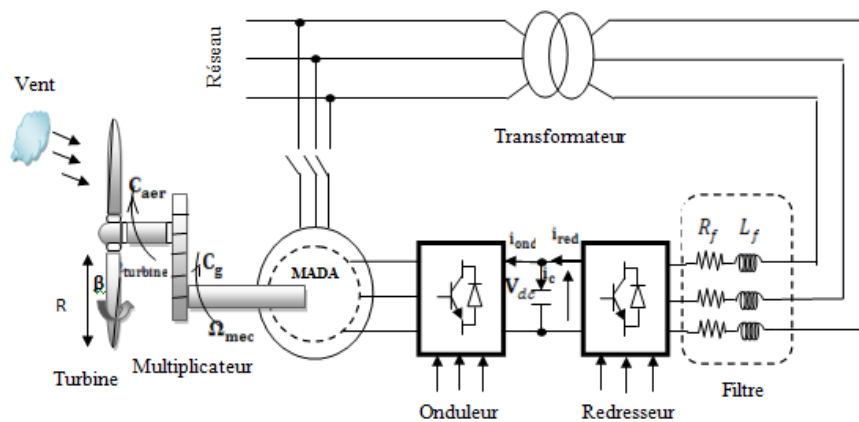


Fig. III-1 : Modèle de la chaîne de conversion éolienne.

Les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux, Commandés par MLI, ils sont bidirectionnels en puissance, donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur côté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur tel que décrit précédemment, Sauf que signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

Le rotor de la MADA et entraîné par la turbine qui sera détaillée dans les paragraphes qui suit.

III-2-2. Redresseur de tension :

Le rôle du redresseur de tension est de fournir la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI permet le contrôle des courants injectés par ce convertisseur dans le réseau .Ainsi, il est possible de contrôler la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance de réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent êtres sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées [13].

III-2-2-1. Modélisation du redresseur :

Le redresseur est à deux niveau, son modèle est identique à celui de l'onduleur étudié précédemment, tel que :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III. 1)$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = [S_a \ S_b \ S_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (III. 2)$$

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$C \frac{dV_c}{dt} = i_a S_a + i_b S_b + i_c S_c - idg \quad (III. 3)$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_s Li_{qr} \\ V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_s Li_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

Le découplage entre l'axe d et q est réalisé par le variable h_d et h_q :

$$\begin{cases} h_d = e_d - \omega_s Li_{qr} - V_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \\ h_q = e_q + \omega_s Li_{dr} - V_q = R \cdot i_q + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

Il est possible de commander indépendamment les composants du courant i_d et i_q par action sur h_d et h_q , ainsi, il est simple de dimensionner les régulateurs.

La PLL sert essentiellement pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park de la phase équivalente d'un système triphasé. La PLL réalise la suivre de phase de la composante directe de la tension des réseaux e_d , afin d'éliminer la composante en quadrature, e_q , ce qui se produit lorsque la phase estimée, θ_g est égale à la phase du réseau.

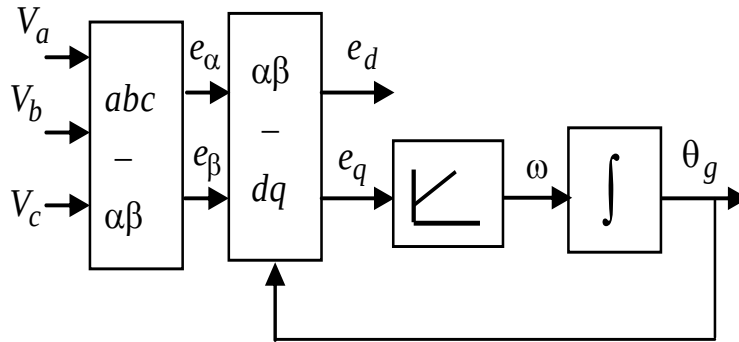


Fig. III-2 : Structure classique d'une PLL triphasée.

Le système de commande conventionnel utilise la commande en boucle fermée du courant dans le système de coordonnées tournant, commande à tension orientée (VOC) est montrée dans la figure (III-3).

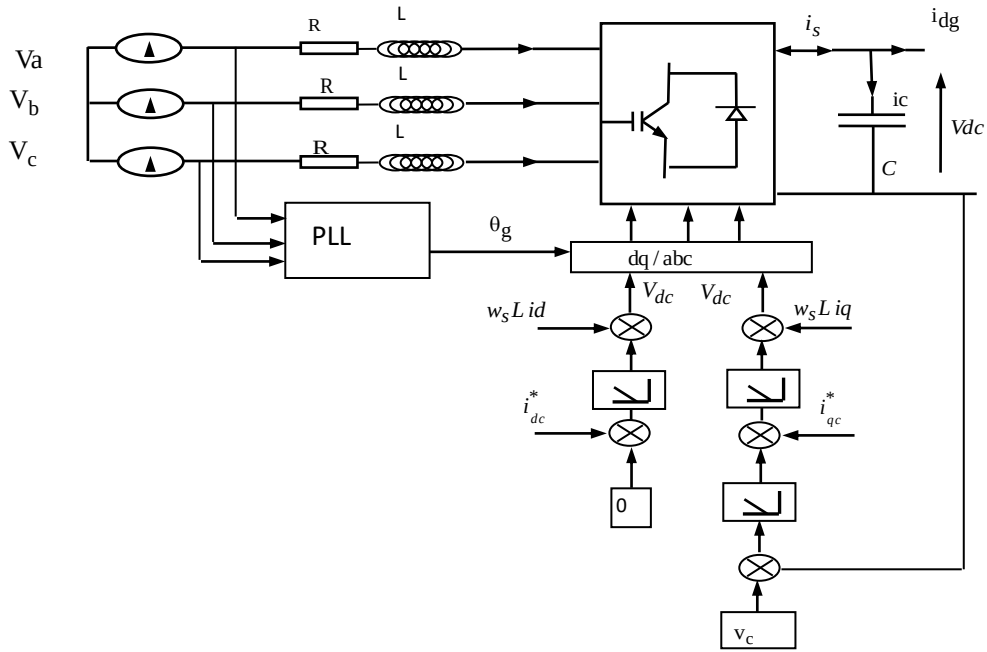


Fig. III-3 : structure du redresseur avec régulateur de tension redressée

III-2-2-2. Commande du redresseur :

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence [16].

III-3. Filtre (côté réseau) :

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas. Durant la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation [17].

III-3-1. Modélisation du filtre passif (côté réseau) :

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes directs et quadrature [17].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res-d}(s)}{V_{res-d} - V_{red-d}} = \frac{I_{res-q}(s)}{V_{res} - V_{red-d}} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (III.6)$$

III-4. Régulation de la tension du bus continu :

Le réglage de la tension de bus continu est réalisé par une boucle externe, la transition de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu, donc la boucle de régulation externe permet de maintenir une tension constante au niveau de bus continu et de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur i_{c-ref} .

- **Modélisation du bus continu :**

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitif [13] :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (III.7)$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (III.8)$$

Avec : i_{red} : courant redressé ; $i_{ond} = i_{ch}$: Courant de charge ;

La tension de bus continu est modéliser par :

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \quad (III.9)$$

Où : $V_{dc}(t_0)$: est la valeur de la tension continue à l' instant initial.

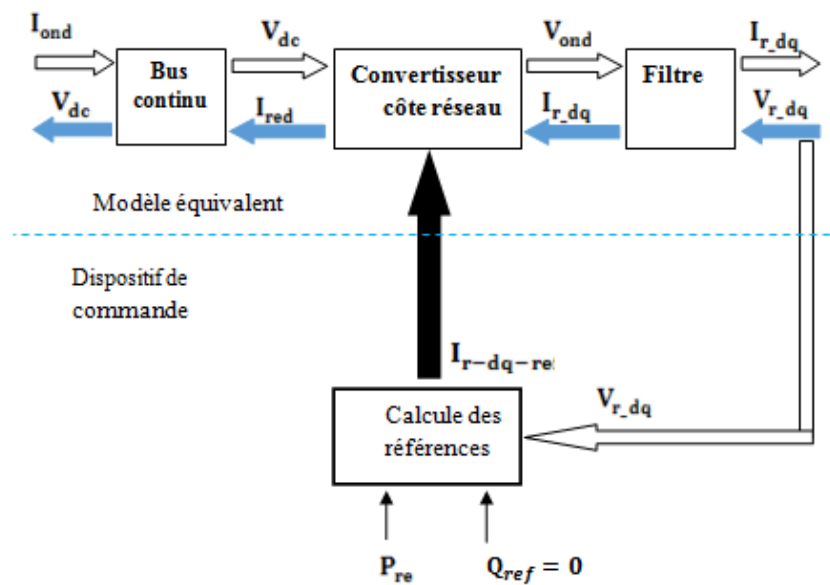


Fig. III-4 : Schéma synoptique de la commande du bus continu.

L'utilisation du redresseur a pour but d'assurer une tension continue constante quelles que soient les perturbations qui peuvent avoir lieu lors du fonctionnement. Pour cela, une boucle de régulation doit être réalisée. Celle-ci permet de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur. Aussi, afin de déterminer les signaux de commande du redresseur, il faut prendre en compte les puissances transitées qui sont en fonction des courants du réseau alimentant le convertisseur [18] :

$$\begin{cases} P = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad (III.10)$$

A partir de ces relations il devient aisé de réguler les courants du coté réseau en imposant des références sur les puissances actives et réactives (P_{ref} , Q_{ref}) :

$$\begin{cases} i_{dr_ref} = \frac{P_{ref} v_{dr_mes} + Q_{ref} v_{qr_mes}}{v_{dr_mes}^2 + v_{qr_mes}^2} \\ i_{qr_ref} = \frac{P_{ref} v_{qr_mes} - Q_{ref} v_{dr_mes}}{v_{dr_mes}^2 + v_{qr_mes}^2} \end{cases} \quad (III.11)$$

La composante du courant en quadrature est utilisée pour réguler la tension du bus continu, quand à la composante directe, elle est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [13]. La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Il est à relever que le réglage du bus continu est réalisé par une boucle externe tandis que les courants transités seront réglés par une boucle interne intégrée dans la commande du redresseur commandé. Cette solution est la plus adaptée pour la commande des courants à la sortie d'un convertisseur statique [13].

Le redresseur sera commandé par deux grandeurs. La puissance réactive de référence sera fixée à une valeur nulle pour ne pas altérer la qualité du réseau. La puissance active sera estimée à partir de la valeur référence du bus continu. L'estimation de la valeur référence de la puissance active passe par la connaissance du bilan énergétique, donc une modélisation des transits de puissance active [15].

Pour pouvoir faire une modélisation du transit dans la liaison avec le réseau, il est impératif d'effectuer le bilan énergétique de cette dite liaison. En supposant que les pertes dans les convertisseurs et le condensateur sont nulles, la puissance transmise au redresseur s'exprime par:

$$P_{red} = P_{ond} - P_c \quad (III.12)$$

P_c Est la puissance emmagasinée dans le condensateur, elle s'exprime par :

$$P_c = V_{dc} \cdot I_c \quad (III.13)$$

La puissance fournie par l'onduleur connecté à la MADA s'exprime par :

$$P_{ond} = V_{dc} \cdot I_{ond} \quad (III.14)$$

La puissance transitée par le redresseur vers le réseau passe par un filtre, celui-ci contient une résistance et donc une partie de la puissance transitée vers le réseau sera dissipée par effet Joule, d'où l'expression de la puissance renvoyée au réseau [15] :

$$P = P_{red} - P_{filtre} \quad (III.15)$$

Tel que :

$$P_{filtre} = R_{filtre} \cdot (I_{d_res}^2 - I_{q_res}^2) \quad (III.16)$$

Et donc la puissance renvoyée au réseau s'exprime par :

$$P = P_{red} - P_c - P_{filtre} \quad (III.17)$$

A partir des relations (III.11, III.12, III.13, III.14) cette puissance peut être écrite en fonction de la tension du bus continu tel que :

$$P = (I_{red} - I_c) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III.18)$$

Il est possible donc d'estimer la valeur de la puissance de référence établie à partir d'une valeur référence du courant dans le condensateur tel que :

$$P_{ref} = (I_{red} - I_{c_ref}) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III.19)$$

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 PI (le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans l'annexe(B)) générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (Figure III-5).

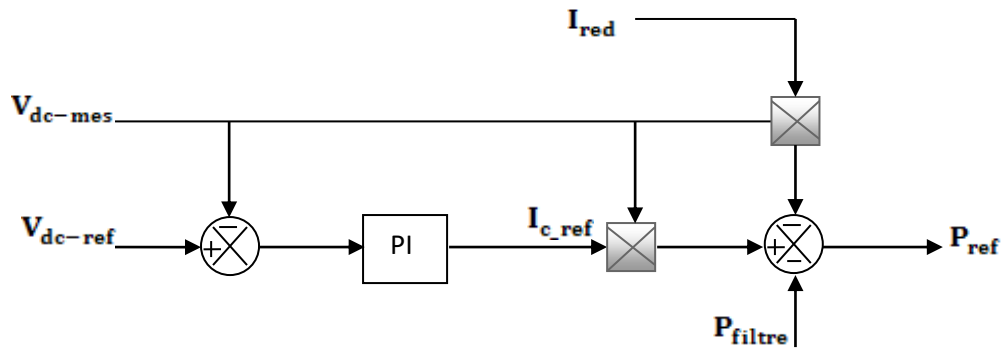


Fig. III-5 : Contrôle de Bus continu

III-5. Modélisation de la turbine :

III-5-1. La modélisation :

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

III-5-1-1. La surface balayée par le rotor :

La surface balayée par le rotor d'une éolienne typique de 600 Kw est de quelque 1.500 m², le diamètre du rotor étant d'environ 43 à 44 m. L'énergie récupérable par une éolienne dépend en effet de la surface balayée par son rotor. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de $2^2 = 2 \times 2 =$ quatre fois plus d'énergie.

III-5-1-2. La densité de l'air :

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Elle dépend donc de la densité de l'air, c.-à-d. la masse de l'air par unité de volume. Ou n'autrement dit, plus l'air est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'éolienne est importante.

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne [19].

III-5-1-3. La Vitesse du vent :

La variation journalière de la vitesse du vent est due aux phénomènes thermiques liés au rayonnement solaire. La vitesse moyenne du vent varie peu la nuit et augmente pendant la journée à partir du lever du soleil. Les variations saisonnières ou mensuelles de la vitesse du vent dépendent du lieu géographique et diffèrent d'un site à un autre. Seuls les relevés météorologiques des paramètres vent sur une longue période peuvent caractériser ces variations.

III-5-1-4 Puissance récupérable par une turbine :

La turbine qui comporte trois pales de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine, qui entraînera une génératrice (MADA) à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . La figure (III-6) montre le schéma d'une turbine éolienne. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v , l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{III. 20})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2}\rho \cdot S \cdot V_{\text{vent}}^3 = \frac{1}{2}\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{III. 21})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale).

S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la .Longueur de la pale.

R : correspond pratiquement à la longueur de la pale.

V_{ent} : est la vitesse du vent en (m/s).

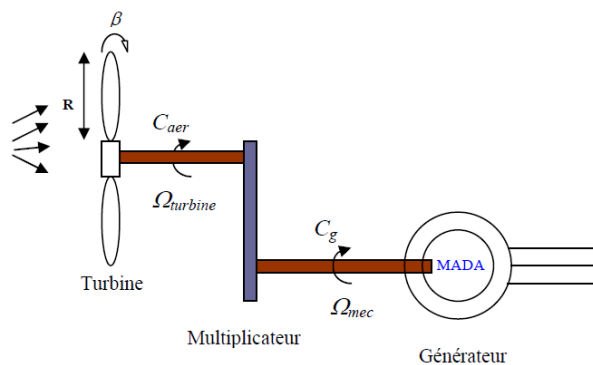


Fig. III-6 : Schéma d'une turbine éolienne

D'après la relation (III.21) on remarque que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, on ne peut pas extraire la totalité de la puissance car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p , qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne [18], [19], [20]. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit :

$$P_{aer} = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p (\lambda, \beta) (\rho S v^3) \quad (III. 22)$$

C_p : coefficient de puissance défini comme suit :

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 + 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0,001 \quad (III. 23)$$

β : angle d'orientation des pales.

λ : est le ratio de vitesse défini comme:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (III. 24)$$

R : Longueur de pales. Ω_t : Vitesse de la turbine.

V_{vent} : Vitesse de vent en (m/s)

Le couple aérodynamique est donné par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho S v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (III. 25)$$

III-5-1-5. Le coefficient de puissance :

Le C_p représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59 [6] [5]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure (III-7).

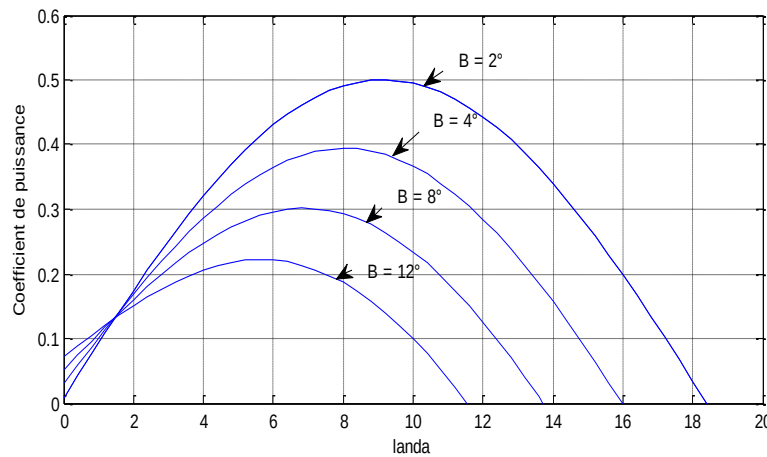


Fig. III-7 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

III-5-1-6. Modèle du Multiplicateur :

Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplications de l'ordre de 100. ces engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques [21].

Le multiplicateur a pour rôle d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice, et pour pouvoir le modéliser, nous allons utiliser un gain de vitesse G qui correspond au rapport de multiplication.

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (III. 26)$$

Avec :

C_g : Couple issu du multiplicateur.

$C_{aéro}$: Couple aérodynamique.

G : Gain du multiplicateur

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III. 27)$$

III-5-1-7. Equation dynamique de l'arbre :

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [22] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f_{mec} = \sum des\ couples = C_{mec} \quad (III. 28)$$

Où: J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_{mec} : Le couple mécanique, ce dernier prend en compte :

Le couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} ;

Le couple de frottement visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g

III-5-2. Schéma bloc du modèle de la turbine :

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur. Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et en couple du multiplicateur.

La turbine peut être ainsi commandée par l'action du couple électromagnétique du convertisseur électrique. La vitesse du vent est considérée comme perturbation (Figure III-8).

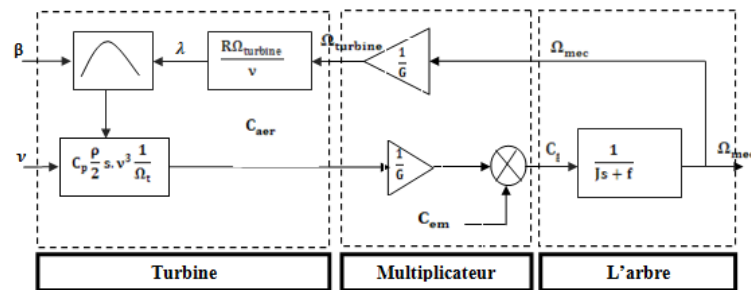


Fig. III-8 : Schéma bloc du modèle de la turbine

III-6. Stratégie de commande de la turbine :

Comme il est illustré sur la figure (III-9), on distingue quatre (04) zones principales de fonctionnement.

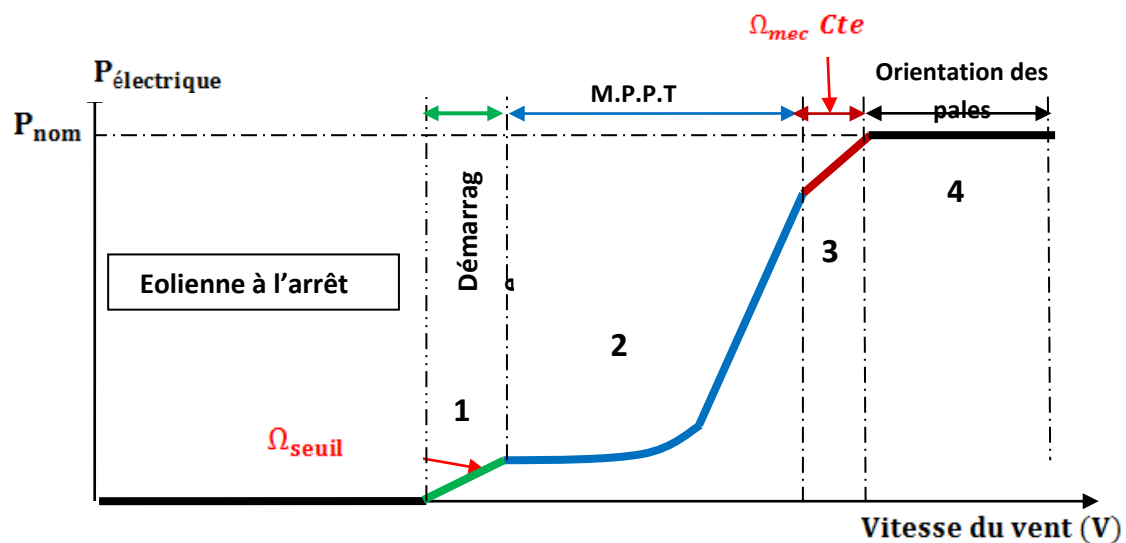


Fig. III-9: Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

- **Zone1** : C'est la zone de démarrage de la machine, elle démarre lorsque la vitesse mécanique atteint une valeur minimale. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré).
- **Zone2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.
- **Zone3** : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. (angle de calage), c'est le '**Pitch Control**'
- Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la **zone 2** ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

III-7. Algorithmes de maximisation de la puissance extraite :

Le but de la commande à vitesse variable de la MADA est d'extraire le maximum de puissance éolienne. Pour cela, nous avons besoin d'un algorithme agissant sur les variables de consigne afin d'avoir le meilleur rendement possible du dispositif étudié.

A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

Il est difficile de mesurer précisément la vitesse du vent qui est de nature une grandeur très fluctuante. Une mesure erronée de la vitesse conduit à une dégradation de la puissance captée selon la technique MPPT. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [16].

- **Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :**

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas on obtient:

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III. 29)$$

Si on néglige l'effet du couple des frottements visqueux $C_{vis} \cong 0$, on obtient :

$$C_{mec} = C_g \quad (III. 30)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient :

$$C_{aer} = C_p \frac{\rho S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} V_{estimé}^3 \quad (III. 31)$$

$$\text{Avec : } V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (III. 32)$$

On fixe le ratio de vitesse à la valeur λ_{Cpmax} , qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} et, en regroupant les équations précédentes, on aura l'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice.

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{Cpmax}^3} \cdot \frac{\rho \pi R^3}{2G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (III. 33)$$

La figure (III-10) représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

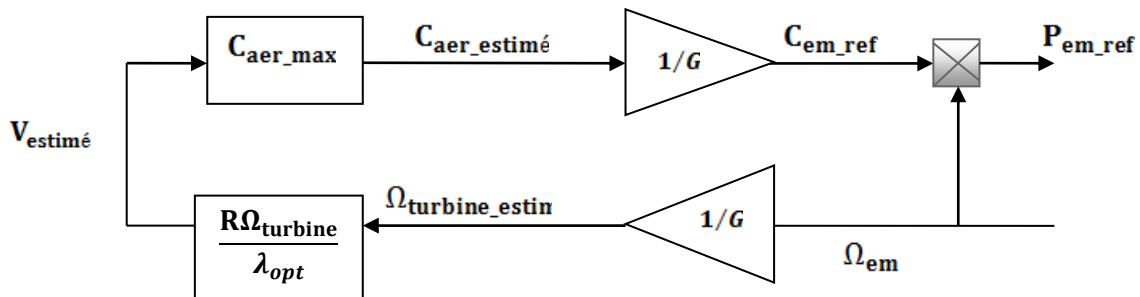
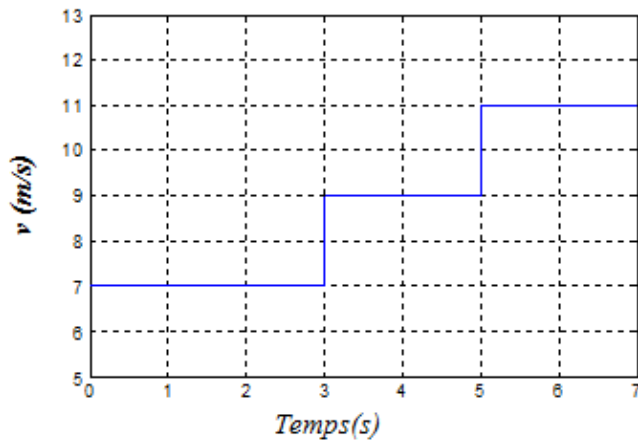
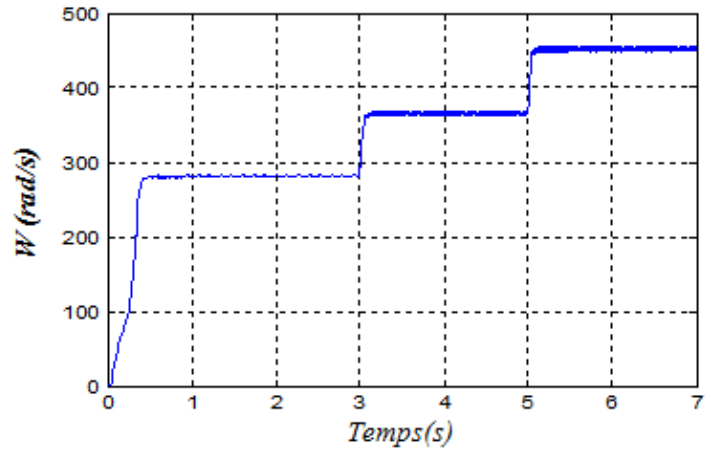


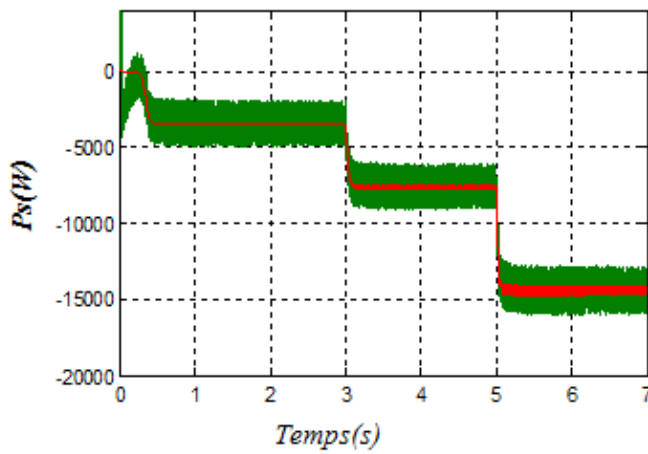
Fig. III-10: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse



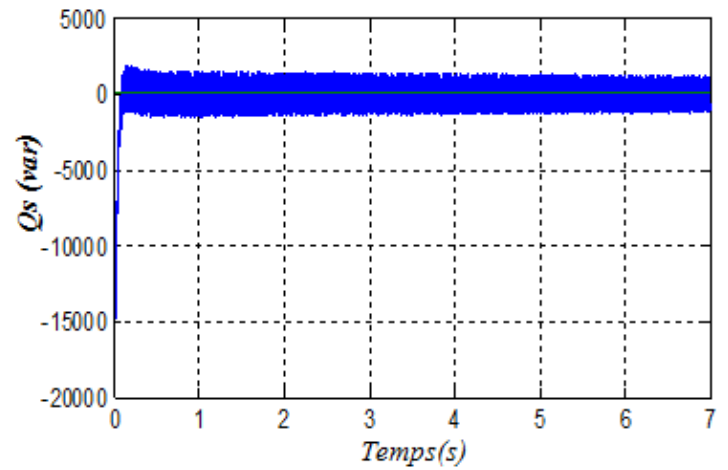
a. Vitesse du vent



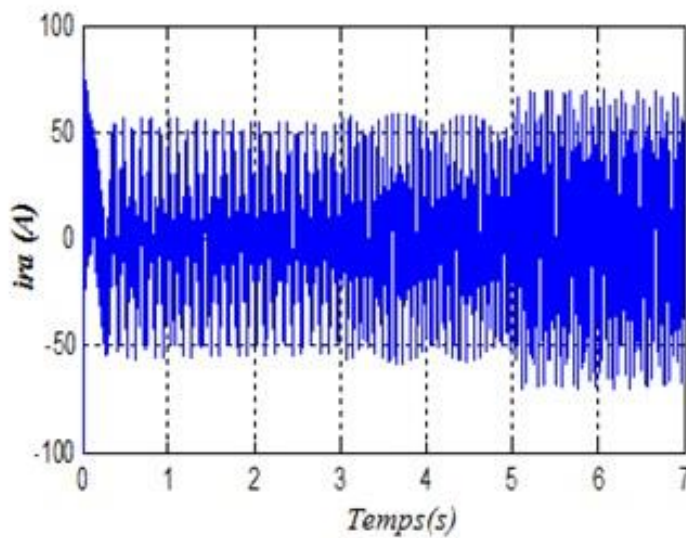
b. Vitesse de rotation



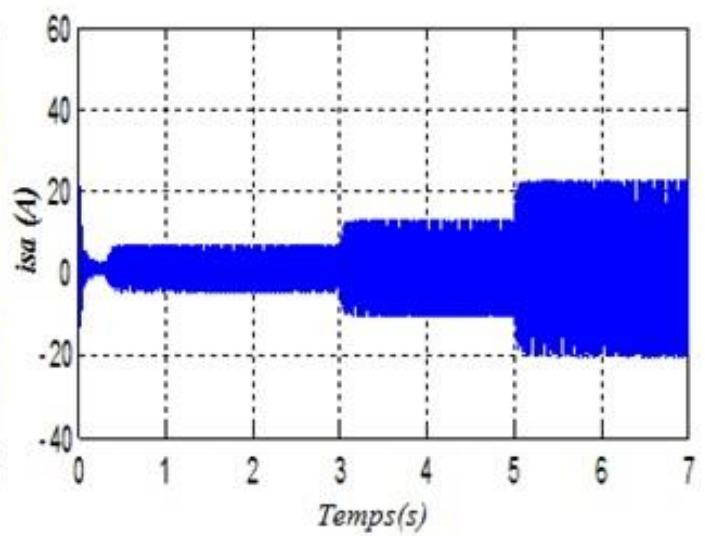
d. Puissance active statorique et sa référence



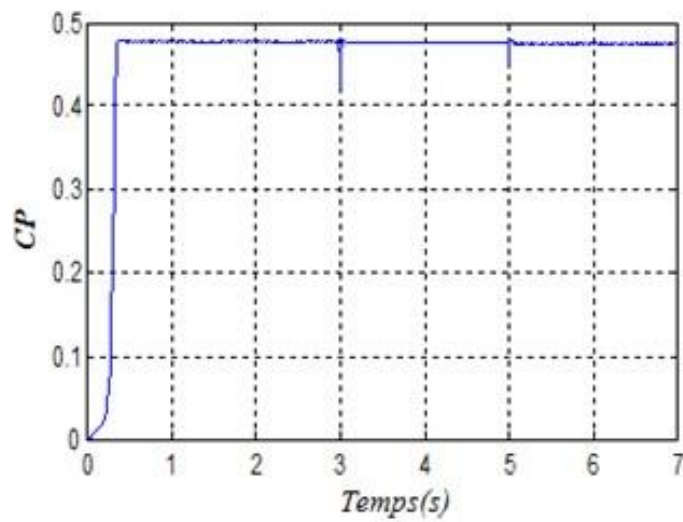
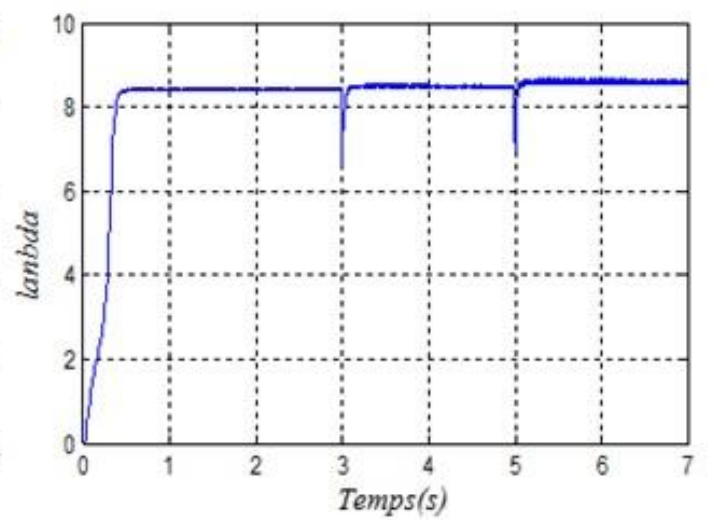
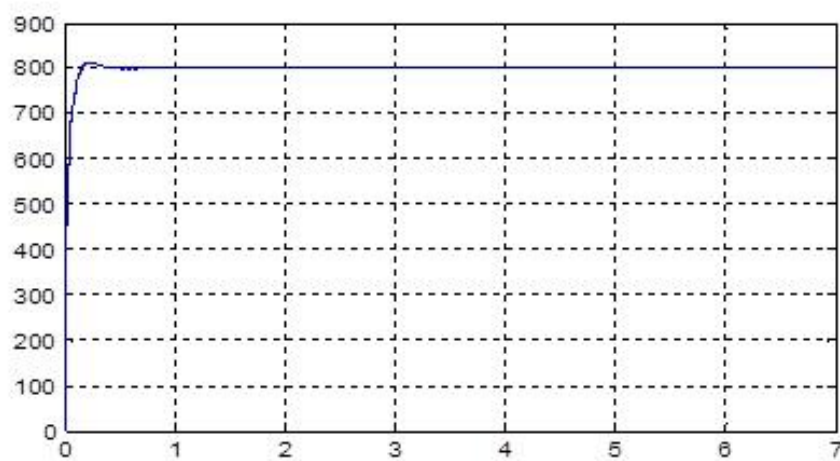
d. Puissance réactive statorique et sa référence



e. Courant rotorique d'une phase



f. Courant statorique d'une phase

**g. Coefficient de puissance de la turbine****h. Vitesse relative de l'éolienne****i-tension bus continue**

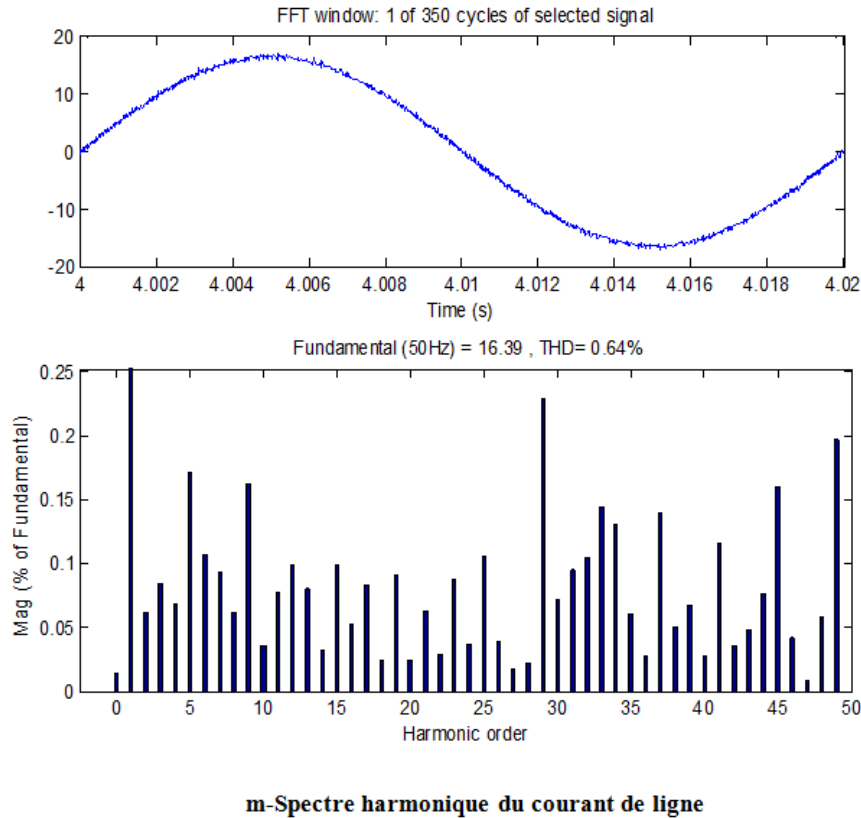


Fig. III-12 : Résultat de simulation de vitesse d'un aérogénérateur de la MADA

III-10. Interprétations des Résultats :

Les figures ci dessus représentent les résultats obtenus de cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés par la stratégie triangle – sinusoïdale, et une machine asynchrone à double alimentation. La tension du bus continu suit bien sa référence qui est 800V.

Les courants délivrés par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. Le spectre harmonique de i_g présente des harmoniques pairs et impairs d'amplitude pratiquement négligeables devant celle du fondamental. Les courants statorique et les courants du côté rotor sont stables et similaires à ceux trouvés avec une alimentation continue parfaite. Un bon suivi de consigne pour les puissances réactive statorique.

la vitesse spécifique et le coefficient de puissance ne changent pas beaucoup de valeurs en régime permanent, ils restent pratiquement égaux a leurs valeurs de références optimales 8.1et 0.49 successivement , avec la puissance éolienne capturée suit sa référence optimale. Le courant statorique fourni par la DFIG est en opposition de phase par rapport à la tension du réseau, puisque la DFIG n'injecte que la puissance active dans le réseau ($Q_{p_ref} = 0$).

Nous constatons que durant le régime de fonctionnement, le courant du filtre est en phase avec la tension du réseau, cela signifie que la DFIG absorbe une puissance active du réseau.

On remarque que la tension de bus continu stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande.

La tension continue en sortie du redresseur est bien contrôlée et quasi insensible aux variations de la vitesse.

L'analyse spectrale du courant montre bien que les harmoniques des rangs faibles sont rejetés vers les hautes fréquences avec tout en diminuant le taux de distorsion harmonique.

III-11. Conclusion :

Dans ce troisième chapitre, on a présenté la commande de la machine asynchrone double alimentée pilotée par le rotor à l'aide de deux convertisseurs électroniques à commande MLI. L'un de ces deux convertisseurs joue le rôle d'un redresseur à transistors à commutation forcée et l'autre convertisseur est un onduleur. Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié, la structure est associée à des stratégies de commande qui règle le couple électromagnétique recherche automatique sur un rendement de puissance proche de celui du maximum théorique sans correction de la vitesse de la turbine.

*Commande par
DTC de la GADA
intégrée dans un
système éolien*

IV.1. Introduction :

Le contrôle direct du couple, venu du terme anglais " Direct Torque Control (DTC)", des machines asynchrones proposé par *Takachachi* et *Depenbrok* est apparu dans la deuxième moitié des années 1980 comme concurrentielles des méthodes classiques [26],[29]. Dans un repère lié au stator, les valeurs instantanées du flux statorique du couple électromagnétique sont estimées à partir des grandeurs statorique. En utilisant des comparateurs à hystérésis, le flux et le couple sont contrôlés directement et indépendamment avec une sélection appropriée du vecteur de tension imposé par l'onduleur [29].

Des exigences en termes de performances dynamiques de plus en plus élevée sous des contraintes encore plus sévères (suppression de tout capteur monté sur l'arbre moteur, notamment) ont poussé la recherche de nouvelles stratégies de commande sans capteur mécanique, utilisant uniquement les grandeurs électriques mesurables au stator. Parmi ces stratégies de commande, la commande directe du couple DTC, cette technique implique un fonctionnement de l'onduleur à deux niveaux standard avec une fréquence de commande variable par fois élevée et incompatible avec des applications forte puissance du fait du niveau des pertes par commutation [30],[31].

Dans ce chapitre on présentera les principes de la DTC. On analysera en particulier, le couple et la dynamique du contrôle entre le flux statorique et le couple électromagnétique puis en aborde la structure du système du contrôle directe du couple, en présentant les méthodes d'estimation du couple et de flux, les correcteurs de couple et de flux et les différentes stratégies et tables de commutation des interrupteurs de l'onduleur de tension, puis une amélioration par le changement de la table de vérité à l'aide de décalage des zones de position du flux statorique.

A la fin, des résultats de simulation viendront finalement mettre en évidence les performances de contrôle du couple électromagnétique.

IV.2. Principe du control direct du couple :

Le contrôle direct du couple DTC est basé sur l'orientation du flux rotorique, en utilisant les valeurs instantanées du vecteur tension. Un onduleur triphasé peut fournir huit vecteurs tensions de base instantanées, parmi les quels deux sont nuls. Ces vecteurs sont choisis à partir d'une table de commutation en fonction des erreurs du flux et du couple et de la position du vecteur flux rotorique. Dans cette technique, on à plus besoin de la position du rotor pour choisir le vecteur tension, cette particularité définit la DTC comme une méthode bien adaptée pour le contrôle sans capteur mécanique des machines à courant alternatif.

La commande DTC d'une machine asynchrone est basée sur la détermination directe des séquences de commande appliquées aux interrupteurs d'un onduleur de tension à partir des valeurs calculées du flux rotorique et du couple [27]. Donc l'état des interrupteurs est lié directement à l'évolution de l'état électromagnétique du moteur asynchrone, qui pour le déterminer il faut disposer d'un modèle approprié du moteur.

A partir des mesures de la tension continue à l'entrée de l'onduleur et des courants des phases rotorique, le modèle donne à chaque instant :

- . Le flux rotorique réel dans le moteur;
- . Le couple réel qu'il développe;
- . La position du secteur.

IV.2.1. Règle de comportement des grandeurs à contrôler (flux, couple) :

Pour un contrôle efficace du couple de la machine asynchrone, il est tout d'abord impératif de régler correctement le flux. En control de type DTC, on réalise le réglage du flux rotorique, d'une part parce que qu'il à une dynamique plus rapide que celle du flux rotorique (la constante de temps rotorique est plus grande que celle du stator, donc la variation de flux rotorique est négligeable vis-à-vis à celle du flux statorique) [27].

La différence entre le flux rotor et le flux rotor ramené au stator correspond au flux de fuites qui présente typiquement des valeurs relatives inférieures à 10 % du flux magnétisant. Ainsi le flux stator, on règle indirectement le flux rotor.

IV.2.2 Contrôle du vecteur flux rotorique :

A partir du modèle de la machine asynchrone dans un repère lié au stator et de l'expression de la tension rotorique, le flux rotorique est estimé à partir de la relation suivante:

$$\phi_r(t) = \int_0^t (V_r - r_r i_r) dt \quad (IV.1)$$

Sur un intervalle périodique de contrôle $[0, T_e]$ correspondant à une période d'échantillonnage T_e les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixés, ainsi on peut écrire: [24],[34]

$$\phi_r(t) \approx \phi_{ro} + V_r T_e \quad (IV.2)$$

Où ϕ_{so} : est le vecteur flux à l'instant $t = 0$, et avec l'hypothèse que la résistancereste r_r constante. Pour simplifier notre étude, on considère le terme $r_r i_r$ comme négligeable par rapport à la tension V_r (ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée).

La relation (IV.2) montre que si on applique un vecteur tension non nul sur l'intervalle $[0 T_e]$, l'extrémité du vecteur flux rotorique ϕ_r se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliqué V_r . La fig. (IV.1) illustre ce principe, lorsque on l'on sélectionne le vecteur $V_r=V_3$ par exemple :

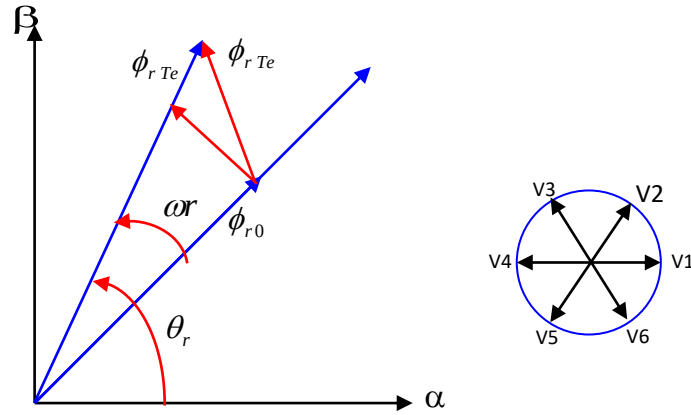


Fig. (IV.1) Exemple de l'évolution de l'extrémité de ϕ_r pour $V_r=V_3$ avec (r_{si}) négligeable

La "composante du flux" du vecteur tension (composante radiale) change l'amplitude du vecteur flux et la "composante du couple" (composante tangentielle) change la position du vecteur flux.

Si la période de contrôle "Te" est très faible devant la période de rotation du vecteur flux statorique. En choisissant une séquence appropriée de vecteur tension de l'onduleur sur des intervalles de temps successifs de durée Te, on peut donc faire suivre à l'extrémité du vecteur flux ϕ_r la trajectoire désirée.

IV.2.3. Sélection de vecteur de tension :

Pour fixer l'amplitude du flux rotorique, l'extrémité du vecteur flux, doit avoir une trajectoire circulaire, le vecteur tension appliqué, doit toujours être perpendiculaire au vecteur flux, mais comme on a huit vecteurs fixé souhaité. Ceci est réalisé par des comparateurs à hystérésis, pour le flux et le couple.

Le choix du vecteur V_r ne porte pas uniquement sur l'erreur du module, mais aussi sur le sens de rotation de ϕ_r et le secteur dans le quel se trouve le vecteur flux. A cet effet, le plan complexe (α, β) fixé au stator est subdivisé en six secteurs (zones) N_i définis par :

$$(2i - 3) \frac{\pi}{6} \leq N_i \leq (2i - 1) \frac{\pi}{6} \text{ avec } i = 1, \dots, 6 \quad (\text{IV.3})$$

En plus, le vecteur tension V_r dépend de la variation souhaité pour le module de flux, mais également de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent pour le couple.

Ainsi, nous pouvons délimité généralement l'espace d'évolution de ϕ_s dans le référentiel fixe par rapport au stator, en le composant en six zones ($N=6$) symétriques par rapport au direction des vecteurs tension non nuls. La position du vecteur flux dans ces zones est déterminée a partir de ses composantes $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$. Lorsque le vecteur flux se trouve dans une zone numérotée "i" les deux vecteurs V_i et V_{i+3} , ont la composantes de flux les plus importantes. En plus leur effet sur le couple dépend de la position du vecteur flux, dans la zone. Ainsi, ils ne sont jamais appliqués.

Le contrôle du flux et de couple peut être assuré en sélectionnant l'un de quatre vecteurs non nuls où un des deux vecteurs nuls.

Le contrôle du vecteur tension V_r sélectionner, est décrit sur la figure (IV.2), et reste le même,

- . Si V_{i+1} est sélectionné alors l'amplitude du flux croit et le couple croit.
- . Si V_{i+2} est sélectionné alors l'amplitude du flux décroît et le couple croit.
- . Si V_{i-1} est sélectionné alors l'amplitude du flux croit et le couple décroît.
- . Si V_{i-2} est sélectionné alors l'amplitude du flux décroît et le couple décroît.
- . Si V_0 où V_7 est sélectionné le vecteur flux s'arrête et le couple décroît si la vitesse est positive et croit si la vitesse est négative.

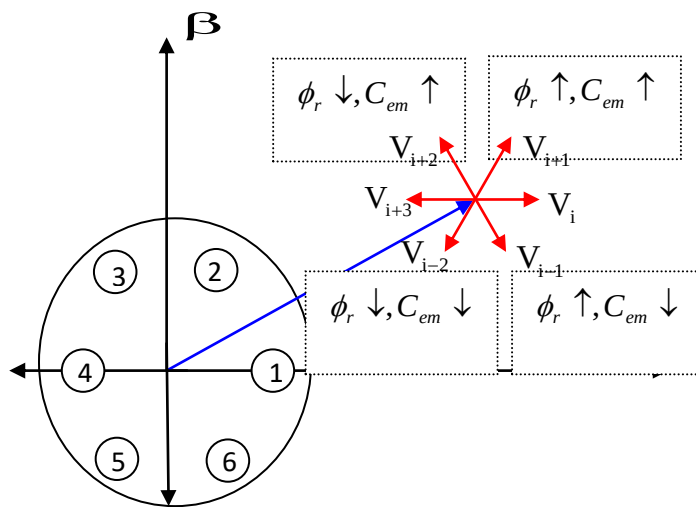


Fig. (IV.2) Sélection du vecteur de tension selon la zone $N=1$

IV.3. Description de la structure générale de la commande (DTC) pour la machine asynchrone :

La figure (IV.3) représente la structure complète du contrôle direct du couple de la machine asynchrone. C'est une commande échantillonnée dont la période d'échantillonnage T_e est très petite par rapport aux constantes de temps de la machine. Le choix de vecteur tension est effectué à chaque période d'échantillonnage [23],[24]. Les consignes d'entrées du système de contrôle sont le couple et l'amplitude du vecteur flux rotorique. Les performances du système de contrôle dépendent de la précision dans l'estimation de ces valeurs [25].

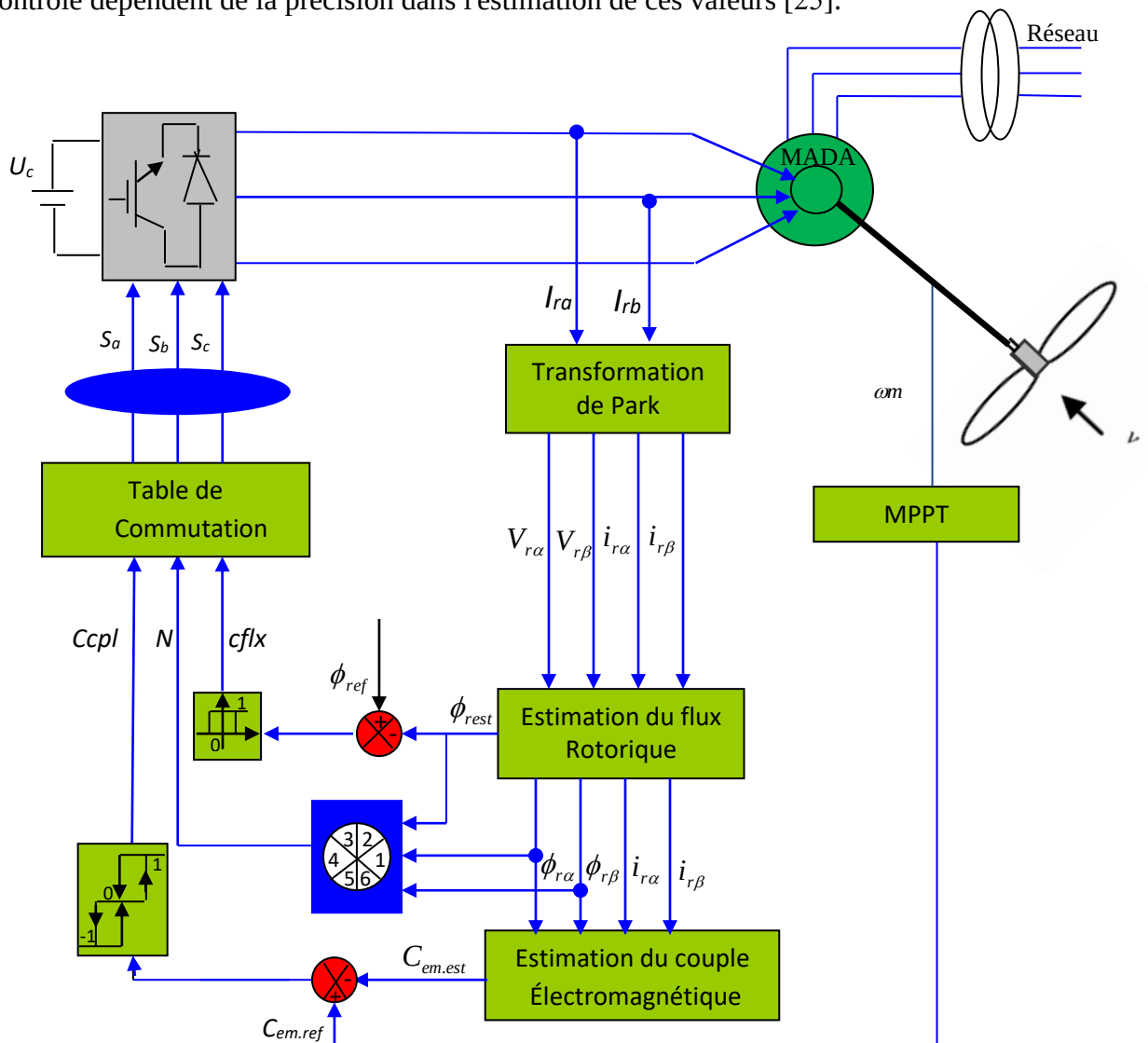


Fig. (IV.3) Schéma de la structure générale du contrôle direct du couple de la GADA intégré dans un système éolien

La structure est nettement simplifiée comparativement à la commande vectorielle puisqu'une seule transformation de référentiel est nécessaire, les boucles de Régulation proportionnelle et intégrale ont été remplacées par des régulateurs à hystérésis et aucun découplage.

IV.3.1. Estimateur du flux rotorique :

Avant d'aborder l'étude du contrôleur du flux, en définit les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux rotorique. L'estimation du flux rotorique peut être réalisée par différentes techniques, parmi ces techniques celle basée sur la mesure des grandeurs rotoriques, courants et tensions de la machine. [23],[24],[25]

A partir de l'équation (IV.2) on obtient:

$$\begin{cases} \phi_{r\alpha} = \int_0^t (V_{r\alpha} - r_r i_{r\alpha}) dt \\ \phi_{r\beta} = \int_0^t (V_{r\beta} - r_r i_{r\beta}) dt \end{cases} \quad (IV.4)$$

Ces équations représentent les étapes de calcul nécessaire à l'estimation de l'amplitude du flux rotorique. Cette technique est très simple et exige seulement la connaissance de la résistance rotorique r_s où l'effet d'une erreur sur cette dernière est négligeable à haute fréquence [23].

On obtient les composantes $V_{r\alpha}$ et $V_{r\beta}$, après l'application de la transformation de Concordia sur les tensions d'entrée mesurées V_{an} , V_{bn} et V_{cn} .

Ces tensions sont exprimées à partir de la tension d'entrée de l'onduleur U_c , et des états de commande (S_a, S_b, S_c) [23],[24] soit:

$$\begin{cases} V_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_c \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{r\beta} = \sqrt{\frac{1}{2}} U_c (S_b - S_c) \end{cases} \quad (IV.5)$$

Les courants $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$, sont également obtenus à partir des courants réels i_{ra} , i_{rb} et i_{rc} par la relation :

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a \\ i_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{rb} - i_{rc}) \end{cases} \quad (IV.6)$$

L'amplitude du flux rotorique est estimée à partir de ses composantes $\phi_{r\alpha}$ et $\phi_{r\beta}$, par :

$$\phi_r = \sqrt{\phi_{r\alpha}^2 + \phi_{r\beta}^2} \quad (IV.7)$$

L'angle α_s entre le référentielle rotorique et le vecteur flux ϕ_r est égale à [1],[4],[14].

$$\alpha_r = \arctg \frac{\phi_{r\beta}}{\phi_{r\alpha}} \quad (IV.8)$$

IV.3.2. Estimation du couple électromécanique :

Le couple électromécanique peut être estimé à partir des flux estimés, et des courants mesurés, en utilisant l'équation : [25]

$$C_{em} = p(\phi_{r\alpha} i_{r\alpha} - \phi_{r\beta} i_{r\beta}) \quad (IV.9)$$

On peut remarquer dans cette équation que l'exactitude de cette dernière dépend la qualité d'estimation du flux et de la précision de la mesure des courants.

IV.3.3. Elaboration du correcteur de flux :

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande DTC.

Comme on l'a vu, lorsque le vecteur flux se trouve dans la zone i, les vecteurs tensions V_{i+1} et V_{i-1} sont choisis pour augmenter l'amplitude du flux, et V_{i+2} ou V_{i-2} pour la diminuer. Ceci montre que le choix du vecteur tension à appliquer dépend du signe de l'erreur entre le flux de référence ϕ_{rref} et le flux estimé ϕ_r tel que: [23],[24],[25],[29]

$$\zeta_{\phi_r} = |\phi_{rref} - \phi_r|$$

Ceci explique que la sortie du correcteur de flux peut être une variable logique "cflx" :

- . cflx=1 : lorsque l'erreur de flux est positive.
- . Cflx=0 : lorsque l'erreur de flux est négative.

On ajoute une bande d'hystérésis au tour de zéro pour éviter les commutations inutiles, lorsque l'erreur de flux est très petite comme le montre la figure suivante:

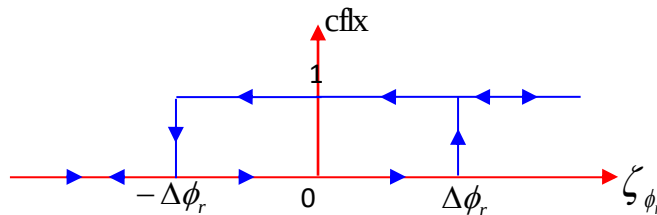


Fig. (IV.4) Fonction de sortie du correcteur de flux à deux niveaux

Avec ce type de correcteur, malgré sa simplicité, on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux, dans une couronne circulaire. La sortie de correcteur du flux, indique les dépassements supérieurs et inférieurs de l'amplitude du flux.

Les figures (IV.5 et IV.6) représentent la trajectoire du flux dans la bande centrée sur le flux de référence. Le choix de $\Delta\phi_r$ dépend de la fréquence de commutation mais aussi de la vitesse de rotation du moteur asynchrone. [23]

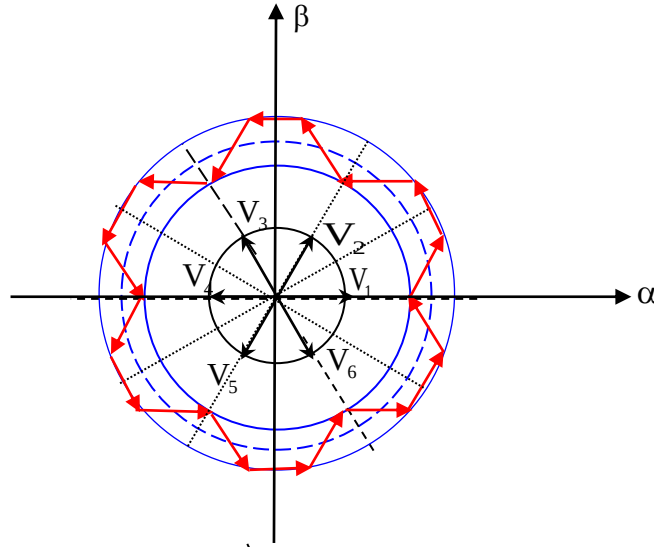


Fig. (IV.5.a) Sélection des tensions correspondant au contrôle de l'amplitude de flux rotorique

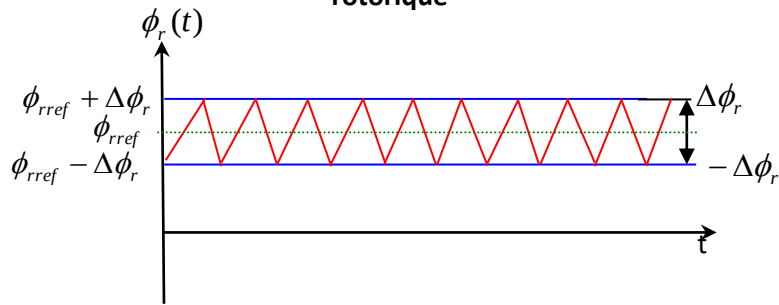


Fig. (IV.5.b) Forme d'amplitude du flux rotorique

IV.3.4. Elaboration du correcteur du couple électromagnétique :

On définit l'erreur sur le couple, noter ζ_{cem} , comme la différence entre le couple de référence et sa valeur estimée.

$$\zeta_{cem} = |C_{emref} - C_{em}| \quad (IV.10)$$

Deux types de comparateurs à hystérésis peuvent être envisagés pour contrôler le couple. Si les vecteurs tensions ne sont pas utilisés pour faire varier le couple, le correcteur est choisie de la même forme que celui du flux. En application les vecteurs tensions nuls, le couple peut croître

ou décroître L'avantage d'utiliser les vecteurs nuls est que grâce aux changements moins rapides du couple, on diminue le nombre de commutations. En plus, la nature du vecteur nul appliqué peut être choisi de la manière à réduire encore plus de nombre de commutations.

En regardant les vecteurs de tension, on constate que pour appliquer V_{i-1} après V_{i+1} ou vice versa, il faut une commutation dans deux bras différents de l'onduleur. Cette réalité est aussi valable pour appliquer V_{i-2} et V_{i+2} et vice versa. Mais il y a toujours un vecteur tension nul quand peut appliquer après un vecteur tension non nul avec une seule commutation.

- $V_{i+1} \Leftrightarrow V_{i-1}$: deux commutations;
- $V_{i+1} \Leftrightarrow V_{i-2}$: deux commutations;
- $V_1, V_3, V_5 \Leftrightarrow V_0$: une seule commutation;
- $V_2, V_4, V_6 \Leftrightarrow V_7$: Une seule commutation;

Il est évident que si on choisi un vecteur tension non nul, le couple décroît plus rapidement que si on applique un vecteur tension nul. On peut avoir besoin d'augmenter ou diminuer le couple électromagnétique de la machine mais aussi de le maintenir constant, donc un correcteur à trois niveaux est nécessaire. La figure (IV.14) montre ce type de correcteur.

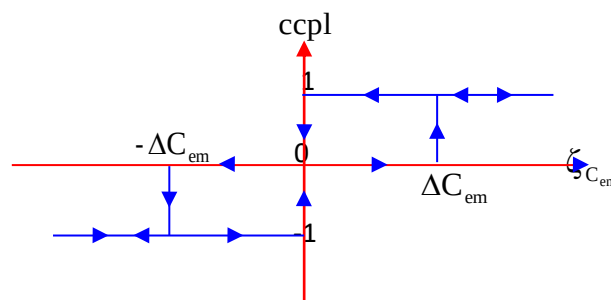


Fig. (IV.6) Fonction de sortie du correcteur du couple (hystérésis à trois niveaux)

IV.3.4.1. Effet des paramètres de réglage de système de contrôle :

Les seuls paramètres réglables dans le système de contrôle direct du couple sont les bandes d'hystérésis des deux correcteurs à hystérésis de couple et de flux. La résistance rotorique est aussi un autre paramètre à adapter pour bien estimer le flux.

IV.3.4.2. Effet de la bande à hystérésis du correcteur de flux :

Comme on peut le prévoir, lorsqu'on augmente la bande d'hystérésis du flux, la trajectoire de l'extrémité du flux rotorique est la plus éloignée de la trajectoire circulaire. En effet, lorsqu'on augmente la bande d'hystérésis de flux, le nombre de commutation du correcteur de flux diminue, ce qui explique la déformation de la trajectoire d'extrémité du flux (figure (IV.7)).

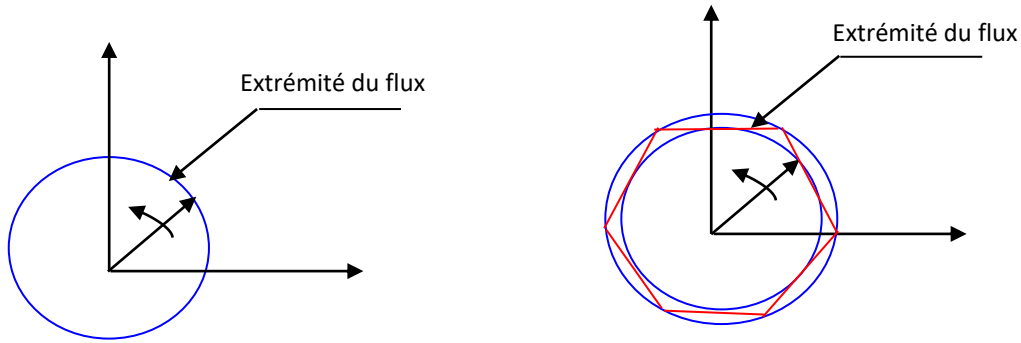


Fig. (IV.7) Les deux limites de la trajectoire d'extrémité du flux

a) : $\Delta\phi_r = 0 \Rightarrow C_{flx} = \infty$

b) : $\Delta\phi_r = 0.027\phi_s \Rightarrow C_{flx} = 6/tr$

IV.3.4.3. Effet de la bande à hystérésis du correcteur de couple :

Pour la bande hystérésis du couple, on peut envisager deux effets différents: son effet sur le couple moyen et son effet sur la fréquence de commutation du correcteur de couple et par conséquent sur la fréquence de commutation de l'onduleur de tension.

Comme on peut le voir sur la figure (IV.15), le couple moyen est toujours inférieur au couple de référence. Cette erreur est de l'ordre de $\frac{\Delta C_{em}}{2}$. Pour le cas où le couple référence est le couple nominal, cette erreur est négligeable. Mais au contraire, lorsque le couple de référence est petit l'erreur sur le couple moyen peut être important dans un système continu de contrôle de couple ce problème peut être résolu en utilisant une bande d'hystérésis proportionnelle au couple de référence. Mais dans un système échantillonné, selon la dynamique du couple, l'erreur de couple peut être amplifiée.

IV.3.5. Stratégies de commutation dans la commande DTC :

Notre objectif est de réaliser un contrôle performant aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire, en choisissant la stratégie de commutation la plus optimale en terme d'ondulation du couple et des courants, de fréquence de commutation et possibilité de fonctionnement dans deux ou quatre quadrants.

D'après le principe de la structure de la commande DTC, la sélection d'un vecteur tension adéquat, à chaque période d'échantillonnage, est faite pour maintenir le couple et le flux dans les limites des deux bandes à hystérésis. Donc la sélection est faite sur la base de l'erreur instantanée du flux rotorique et celle du couple électromagnétique.

Pour augmenter l'amplitude du vecteur flux, les vecteurs V_i , V_{i+1} et V_{i-1} peuvent être sélectionnés. Inversement la décroissance de ϕ_s peut être obtenue par les vecteurs tensions V_{i+2} , V_{i-2} et V_{i+3} .

Le vecteur tension appliqué pour contrôler le flux rotorique affecte la valeur du couple. Le tableau (IV.1) ci-dessous résume l'action combinée de chaque vecteur tension sur les amplitudes du flux rotorique et du couple électromagnétique telle que:

- . La flèche simple signifie une petite variation.
- . Deux flèches signifient une plus grande variation.

	V_{i-2}	V_{i-1}	V_i	V_{i+1}	V_{i+2}	V_{i+3}	V_0, V_7
ϕ_r	↓	↑	↑ ↑	↑	↓	↓ ↓	↓ ↑
C_{em} ($\Omega > 0$)	↓ ↓	↓ ↓	↓	↑	↑	↓	↑
C_{em} ($\Omega < 0$)	↓	↓	↑	↑ ↑	↑ ↑	↑	↑

Table (IV.1) Variation du flux et du couple due à l'application d'un vecteur tension V_i .

Un petit incrément du couple est obtenu en appliquant les vectrices tensions V_{i+1} et V_{i+2} indépendamment du sens de la vitesse du moteur. Inversement une petite décroissance du couple est obtenue par l'application V_{i-1} et V_{i-2} . Les vecteurs V_i et V_{i+3} et les vecteurs de tension nuls changent le couple en fonction du sens de rotation de la vitesse du moteur comme l'indique la table précédente.

Plusieurs tables de commutation peuvent être utilisées pour contrôler le couple et le flux rotorique. Chaque table influe sur le comportement de la machine en terme de couple, d'ondulation de courant, de fréquence de commutation et possibilités de fonctionnement dans deux ou quatre quadrants.

IV.4. Elaboration des tables de commutation:

On élabore les tables de la structure de commande, en fonction des sorties du contrôleur à hystérise du flux (ccflx), du contrôleur à hystérésis du couple (ccpl) et de la zone N du position du vecteur flux rotorique. On retrouve bien avec les tables de commande la formulation de sélection des vecteurs tension $V_{i+1}, V_{i-1}, V_{i-2}, V_{i+2}$ correspondent à deux ou à trois niveaux pour le couple.

IV.4.1. Tables de commutation pour des contrôleurs à hystérésis à trois niveaux :

Avec une stratégie basée sur les tableaux précédents on peut commander la machine seulement dans deux quadrants. Pour améliorer les performances dynamiques de la DTC à basse vitesse et autoriser le fonctionnement à quatre quadrants, il est nécessaire d'appliquer les vecteurs V_{i-1} et V_{i-2} , cette stratégie exige au flux statorique de tourner dans les deux sens de rotations [25].

Flux	couple	K=1	k =2	k =3	k =4	k =5	k=6
cflx=0	ccpl=1	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂
	ccpl=0	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇
	ccpl=-1	V ₅	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
cflx =1	ccpl=1	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₁
	ccpl=0	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀	V ₇	V ₀
	ccpl=-1	V ₆	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅

Table (IV.2) stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis

A trois niveaux (avec les vecteurs de tension nuls).

IV.5.Résultats de simulation

Dans cette section la commande DTC de la GADA de 7.5 KW (les paramètre de la GADA +turbine est présent dans la annexe) a été testée par simulation sous environnement MATLAB/SIMULINK.

Les tests ont été appliqués au système fonctionnement à vitesse du vent variable avec contrôle MPPT, Dans cet essai, un vent de vitesse variable de 5m/s jusque 10m/s appliqué sur les pales de la turbine éolienne.

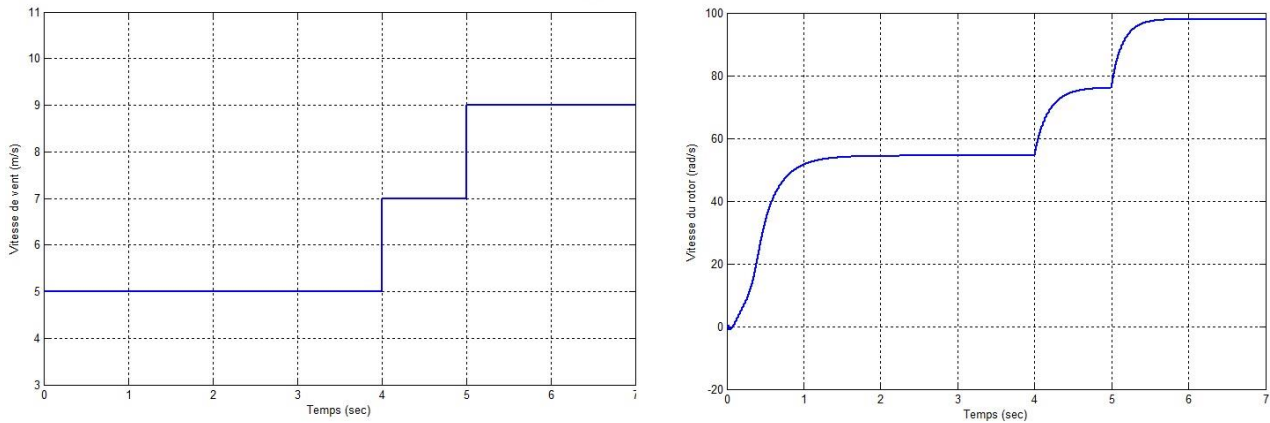


Fig. (IV.8) Vitesse de vent (m/s) / Vitesse Rotor (rad/s)

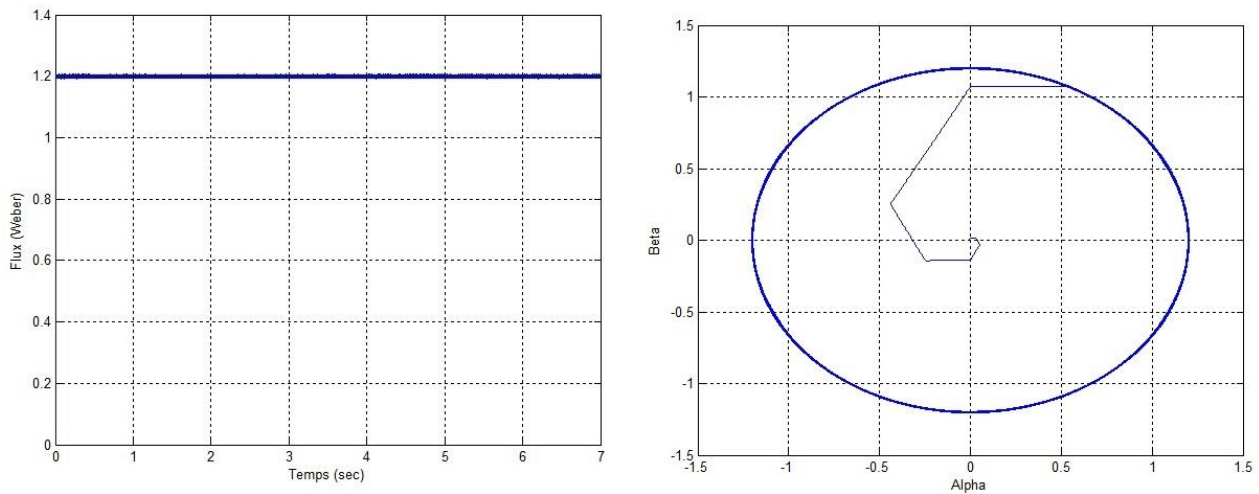


Fig. (IV.9) Module de flux rotorique / trajectoire de flux rotorique

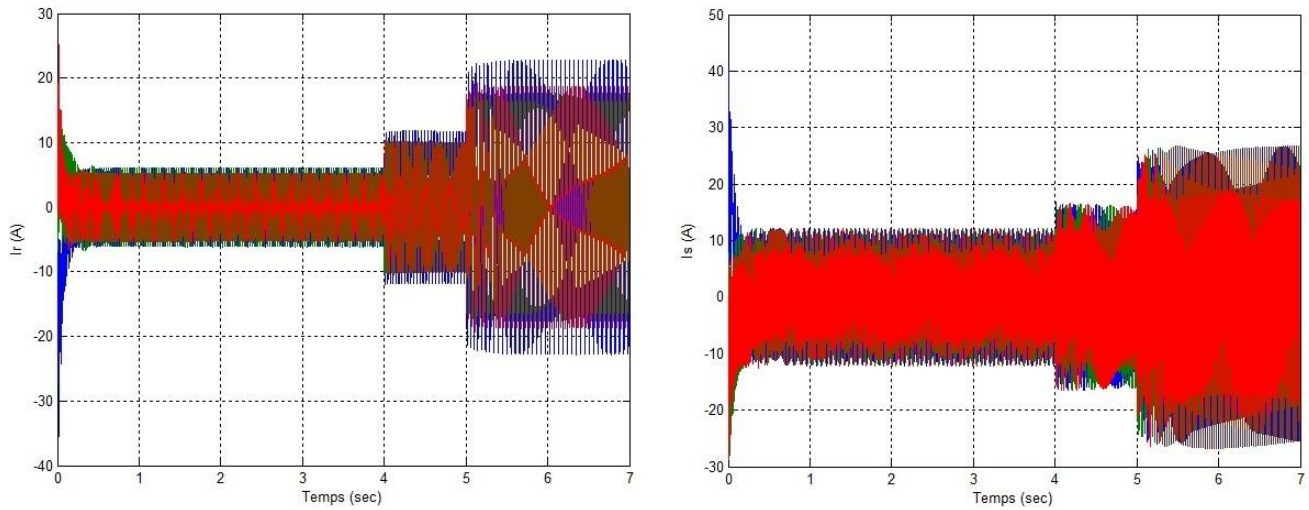


Fig. (IV.10) les courant du Stator /Rotor

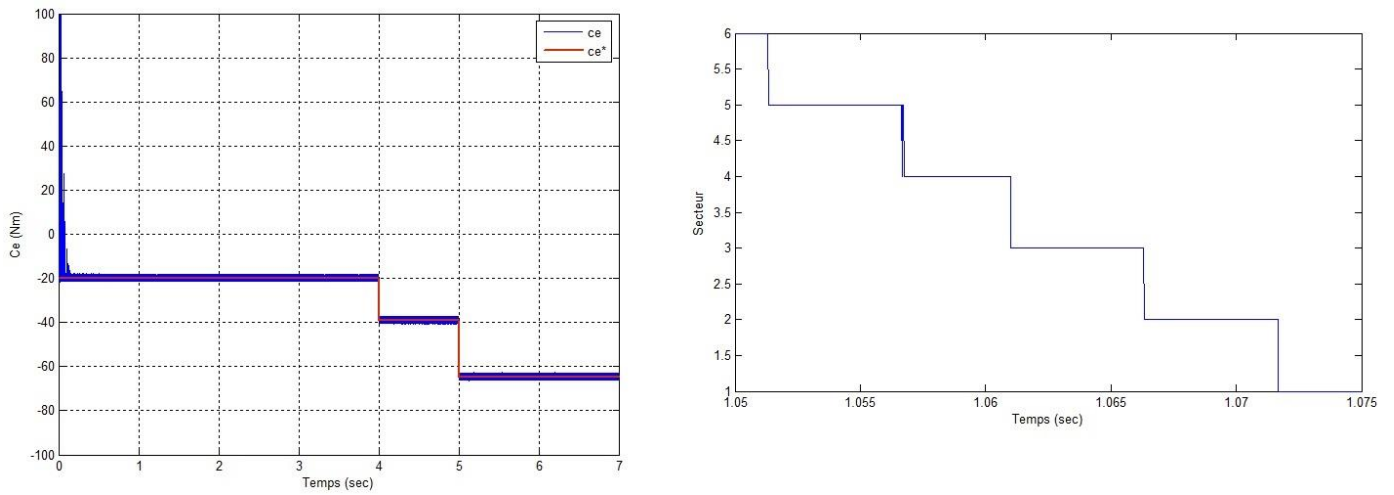


Fig. (IV.11) Couple électromagnétique/ Secteur (zoom)

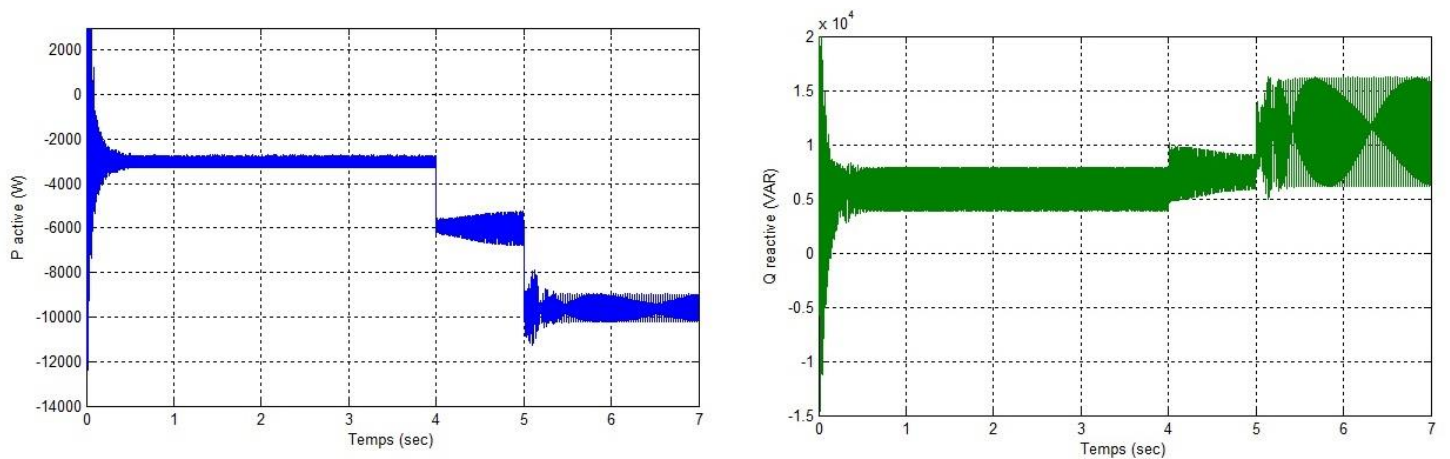


Fig. (IV.12) Puissance statorique Active / Réactive

IV.6. Interprétations des résultants :

d'après les figures (IV.8 - 12), on peut noter que :

- En régime permanent, il y a une ondulation dans le couple. Cette ondulation dépend de la fréquence de commutation de l'onduleur qui est déterminée par bande des régulateurs à hystérésis de couple et de flux.
- la vitesse de rotation de la MADA est stable dans toutes les vitesses de vent
- Le couple négatif parce que la MADA fonctionne en mode générateur et le temps de réponse très rapide, sans dépassement. Le découplage entre les deux puissances de la MADA est vérifié
- le flux rotorique suit bien les consignes avec de grandes performances dynamiques et statiques avec une valeur nominale de 1.2Wb.
- De même, les courants statorique et rotoriques répondent bien aux variations imposées sur le vent et que leurs formes sont très proches de la sinusoïde.
- La figure (..) montre l'efficacité de la commande directe du couple dans le réglage du couple électromagnétique et du flux rotorique même à vitesse du vent variable,
- En fin les résultats obtenus confirment l'efficacité de la stratégie de commande utilisée (DTC) pour le contrôle du système de conversion d'énergie éolienne à base de GADA et atteste les performances désirées.

IV.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande du système éolien en se basant sur la structure de la commande directe du couple DTC. Le résultat de la commande DTC permet d'obtenir des performances dynamiques du couple très satisfaisantes. Donc on peut dire que la commande par DTC de la GADA dans le système éolien est très compétitive et qui attire l'attention des différents chercheurs afin d'aboutir à une commande performante qui répondre aux exigences industrielles modernes.

Conclusion générale

La consommation intensive de l'énergie électrique, et le souci de préserver l'environnement ont conduit plusieurs pays à initier des programmes nationaux et internationaux destinés à produire de l'énergie électrique à partir des ressources renouvelables notamment celle de type éolien.

Cette dernière se distingue par son caractère aléatoire et intermittent qui est souvent à l'origine des sérieux problèmes liés à la stabilité du réseau électrique.

L'objectif de notre travail est d'élaborer l'étude de la commande de la machine asynchrone double alimentée par le contrôle directe de couple, pour ce faire, les principaux de ce travail être résumés comme suit :

La première partie a été consacrée à la présentation des généralités et caractéristiques sur l'énergie éolienne, ainsi que l'évolution de son exploitation au niveau mondial durant les trente dernières années.

La deuxième partie était l'étude et la modélisation des machines à double alimentation MADA connectée au réseau et fonctionnant à vitesse variable.

La troisième partie relève les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine, les différentes zones de fonctionnement et les stratégies de contrôle qui basant sur la technique MPPT afin de maximiser la puissance extraite du vent, et pour fournir une puissance optimal au réseau.

Dans la dernière partie nous avons abordé une modélisation complète du système globale de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation en utilisant les stratégies de contrôle direct du couple (DTC) qui base sur les régulateurs par hystérésis du couple et du flux.

Les résultats de simulation obtenus, nous ont permis de juger la qualité de la commande par DTC qui permet d'obtenir des performances dynamiques très satisfaisantes.

Face à ces observations et aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif éolien sont envisageables :

- 1- Une réalisation expérimentale du système éolien.
- 2- Application d'autres algorithmes de réglage de la GADA tels que contrôle directe des puissances (DPC).
- 3- Utiliser d'autres techniques de l'intelligence artificielle pour l'amélioration des Performances des stratégies de contrôle classiques DTC.

Annexe

machine à induction double alimentée :

Paramètre	Valeur numérique
Puissance nominale	7.5KW
Résistance statorique	0.474 (Ω)
Résistance rotorique	0.7614 (Ω)
Inductance mutuelle	0.107 (H)
Inductance statorique	0.12 (H)
Inductance rotorique	0.122 (H)
Nombre de paires de pôles	2
Tension du réseau utilisé	220 V
Fréquence du réseau	50 Hz

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pale	3
Diamètre d'une pale	3 m
Gain du multiplicateur	2
Inertie de l'arbre	0,5 Kg.m ²
Coefficient de frottement	0.0024 <i>N.m.s/rad</i>

Paramètres de la redresseur :

$r = 0.3 \Omega$, $l = 14e-3 \text{ H}$, $c = 2e-3 \text{ F}$.

Références Bibliographiques

- [1] H.Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers « Centre de Bordeaux »,2003 ».
- [2] S. EL Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat « Ecole Centrale de Lille »,2004.
- [3] B.Milton, G.Robin, O.Gergaud, H.ben Ahmed, « Le Génie électrique dans le vent, état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne» JCGE'03. Saint Nazaire, 2003.
- [4] A. Redha, « Modélisation et simulation de la G.A.D.A », Mémoire d'ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Batna 2004.
- [5] A. Dendouga, « Commande par mode glissant de la machine à double alimentation alimentée par un onduleur », Thèse de Magister, Université de Batna 2004.
- [6] B.Hopfenspeger et D.J.Atkinson, "Doubly-fed a.c.machines : classification and comparison", European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Gras, 2001.
- [7] N. Dujardin, C.Iweins, www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR
- [8] « Commande vectorielle et adaptative de la MADA » Mémoire d'ingénieur. Université de Batna [2002]
- [9] M. Pitrzak . David & B. Defrnel « Comparaison et Synthèse des Procédés de Commande Vectorielle», Journées d'étude groupe de nord Lille, France [1992]
- [10] Aderbal & M.Fmerdaui «La Commande Vectorielle d'une MAS Alimentée en Tension», Mémoire d'ingénieur. Université de Batna [1998]
- [11] J. Bayard & L.wes «Utilisation du Pilotage Vectorielle pour Moteur Asynchrone en traction ferroviaire » Journées d'étude –groupe de nord. Lille, France [1992]
- [12] Claude Foulard « Modélisation, contrôle vectoriel et DTC », commande des moteurs asynchrones –volume 1
- [13] S.Drid, « Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'une machine à induction double alimentée à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation: théorie et expérimentation » Thèse de doctorat en électrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.
- [14] Y. Elbia, « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [15]. Paul-Etienne V, « Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [16]. A.Boyette., « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.

- [17]. B.toual « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Thèse de magister de l'Université de Batna ,2010.
- [18]. N. laverdure, « intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » . Thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble 2005.
- [19]. Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier,Brayima Dakyo, Cristian Nichita. État de l'art dans les aérogénérateurs électriques, 2002
- [20]. CHERIF,"Modélisation de Générateur Asynchrone Double Alimentation Pour la production de l'énergie éolienne", Universitaire d'EL-Oued, 2012
- [21]. M.A.HASSAD, « Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques », thèse de magistère, Université SETIF 1, 2012
- [22]. S.Metatla , " Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une Mada", thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger 2009
- [23] Ben Hadda Nabil, « Commande Direct du Couple d'une Machine Asynchrone,». Thèse d'ingénieur, Université de Batna, 2003.
- [24] Lameche Toufik, « Développement et Implémentation par Logique Floue d'une Commande DTC d'un Moteur à Induction Alimenté par un Onduleur de Tension PWM,». Thèse de magister, Université de Sétif, 2003.
- [25] Abdelhakim Derbane, « Contrôle Direct du Couple de la Machine Asynchrone à Aimants Permanents Basé Sur la Logique Floue ou les Réseaux de Neurones,».Thèse magister, L'EMP, 2002.
- [26] H.Rezine, A. Derbane, K. Ben mansoure, « Nouvelle approche d'un contrôleur flou pour la commande directe du couple de la machine synchrone à aimants permanents,». Sans date.
- [27] Toufouti Riad, « Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone,».Thèse de magister, Université de Constantine, 2003.
- [28] Mourad Moussaoui, Smail Rebbouh, « Commande Adaptative à Modèle de Référence. Application à un Moteur Asynchrone,».Thèse d'ingénieur, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Promotion JUIN2002.
- [29] K. Merouani, A. Kheloui, « Commande Directe du Couple d'une Machine Asynchrone par PC,».Conférence Internationale ICEE' 2000.
- [30] Yen-Shim Lai and Juo-Chiun Lin AND Jennshing Jersey Wang, « Direct Torque Control Induction Motor Drives With Self-Commissioning Based On Taguchi Methodology, » .IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.15, NO.6, NOVEMBER 2003.
- [31] Mukul Chandorkar, « New Techniques for Inverter Flux Control, » .IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.37, NO.3, MAY/JUNE 2001.
- [32] Domenico Casadei, Giovanni Serra and Angelo Tani, « Implication of a direct torque control Algorithm for Inductions motors Based on Discrete Space Vector Modulation, » .IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.15, NO.4, JULY 2000.
- [33] j. faiz, S.H. Hossieni, M. Ghaneei, A. Keyhani, A. Proca, « Direct torque control of induction motors for electric propulsion systems, » .Electric Power Systems Research 51 1999, p.p. 95-101.
- [34] Jawad Faiz, Mohammad Bagher Bannae Charifian, Ali Keyhani, and Amuliu Bogda Poca, « Sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Used in Electric Vehicle, » .IEEE transactions on energy conversion. VOL. 18, NO.1, MARCH 2003.