

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

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Commande des Systèmes Electriques

THÈME

Application de l'onduleur à trois niveaux dans un système éolien à base d'une MADA avec la commande de backstepping

Préparé par : Malika afnane wissam BOUABDELLI
Lynda OULD MOKHTAR

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
M. Larbi	MCA	Président
A. Barkani	MAA	Examinateur 1
S. Belfedal	MAA	Examinateur 2
B. Belabbas	MAA	Encadreur

PROMOTION 2016 /2017

« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » [1]. Si scientifiquement l'énergie ne se crée ni ne se perd, il convient de porter toute notre attention sur les causes et effets de sa transformation en réduisant au maximum l'effet de l'entropie [2].

La nécessité de survie de l'humanité dans le long terme impose un «bon choix» de moyens et méthodes énergétiques. Les réflexions liées à ce choix doivent se préoccuper des effets de chaque action sur la biosphère et également sur la viabilité sociale, économique et écologique de chaque option [2].

Les moyens et les méthodes respectant le long terme, à savoir les énergies dites renouvelables, nouvelles ou propres ont été redécouverts et développés et sont redevenus attractifs, surtout depuis le choc pétrolier de 1973. Certains les appellent «énergies nouvelles» [2] [3]. pour y inclure éventuellement l'énergie nucléaire ou «énergies propres» pour mettre en avant qu'elles laissent peu ou pas de déchets à long terme ou n'émettent pas de gaz à effet de serre. De toute façon, on s'accorde aujourd'hui sur la dénomination commune «énergies renouvelables». On peut regrouper les Sources d'Énergie Renouvelables (SER) en cinq secteurs traditionnels : l'éolien, le solaire, l'hydraulique, la géothermique et la biomasse [2].

L'énergie éolienne porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment. L'objectif que vient s'insérer notre étude.

Nous allons nous intéressés à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, tous ceci en regardant aussi ce qui ralentit leur développement afin de pouvoir envisager des solutions permettant de faciliter l'insertion de tel dispositif dans la production électrique [4].

L'énergie éolienne connaît depuis quelque années un intérêt croissant en Algérie et à l'international [5]. Renouvelable, mature et compétitive, cette énergie d'avenir a un rôle majeur à jouer pour répondre aux défis climatiques actuels et futurs [6].

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de Machines Asynchrones À Double Alimentation (MADA) [4]. L'avantage que présente ce type de génératrice est qu'elles permettent une production d'énergie électrique et ce à vitesse variable, ce qui nous amène à dire que ces génératrices nous permettent une meilleur exploitation des ressources éolienne sous des conditions de vent différentes [4].

La plus part des éoliennes sont contrôlées de sorte à avoir en permanence une puissance produite maximale et ce en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum appelé MPPT pour une plage de fonctionnement de notre machine intégrant à la fois le mode hypo et hyper- synchrone [7].

Dans ce mémoire, nous nous proposons de présenter la commande indirecte sans boucle de

Introduction générale

puissance d'une MADA connectée à une turbine qui devra prendre en charge la régulation de vitesse mécanique qui lui sera appliquées de sorte à avoir en sortie le maximum de puissance. La commande de notre génératrice intégrera des régulateurs PI classique et avancer de type backstepping. Notre mémoire se déroulera comme suit :

Le premier chapitre mettra en relief l'état de l'art des éoliennes en présentant les quelques projets de recherche, quelques orientation sur le développement avenir de ce secteur seront présentés.

Le second chapitre traitera exclusivement la turbine, par la présentation de sa modélisation qui tiendra compte à la fois des vitesses du vent variable ainsi que l'angle de calage des pâles.

Le troisième chapitre mettra en évidence la modélisation et la commande des puissances de la MADA assuré par le régulateur classique PI. Puis l'association de cette dernière avec la turbine et l'onduleur a deux niveaux.

Le quatrième chapitre prendra en charge la présentation et la modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux dans le but d'alimenter la MADA côté rotor.

Le cinquième chapitre est consacré a l'application d'une nouvelle commande robuste et performante appelé backstepping pour contrôler les puissances de la MADA. Cette dernière est connectée avec l'onduleur à trois niveaux [7].

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

1.1. Introduction :

L'intérêt pour l'usage des énergies renouvelables augmente, car les populations sont de plus en plus concernées par les problèmes environnementaux. Parmi les énergies renouvelables, on trouve l'énergie éolienne qui est actuellement largement utilisée.

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques: l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, génératrice, permet de générer le courant électrique [8][9].

Bon nombre de configurations existent aujourd'hui représentant la machine asynchrone double alimentation (MADA) qui cette dernière est utilisée par une grande partie des éoliennes, elle utilise divers types de convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre, on traite une présentation générale sur l'énergie éolienne et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes.

1.2. Les énergies renouvelables :

Le monde évolue et avec lui des caractéristiques comme l'augmentation de la population, de l'activité industrielle et le changement du style de vie sont indiscutables. La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse depuis 40 ans et rien ne laisse présager un ralentissement de cette croissance, surtout dans les pays en voie de développement.

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale qui provoque un changement climatique irréversible [10] [11]. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement. Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années la figure (I.1) le montre.

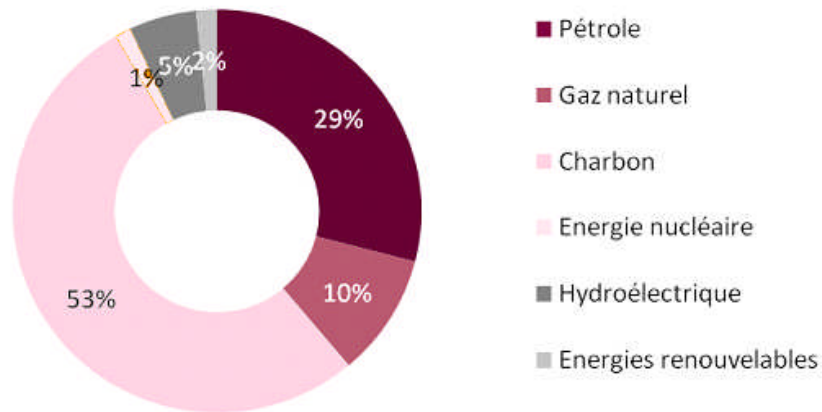


Figure I.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.

I.3. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

I.3.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice Figure (I.2).

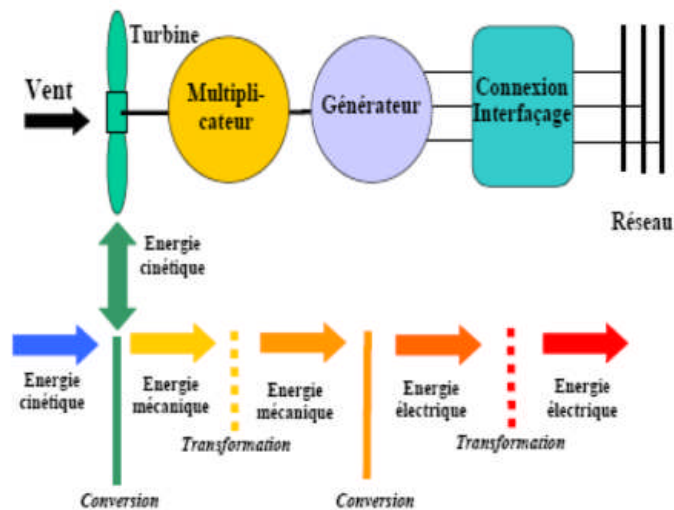


Figure I.2: Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

I.3.2. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

Depuis environ une décennie le développement de l'énergie éolienne se poursuit à un rythme soutenu sur l'ensemble du globe. On comptabilisait fin 2010 pas moins de 203 GW de puissance éolienne installée dans le monde, contre 24.3 GW à la fin de l'année 2001 comme le montre l'histogramme de la figure (I.3) [12].

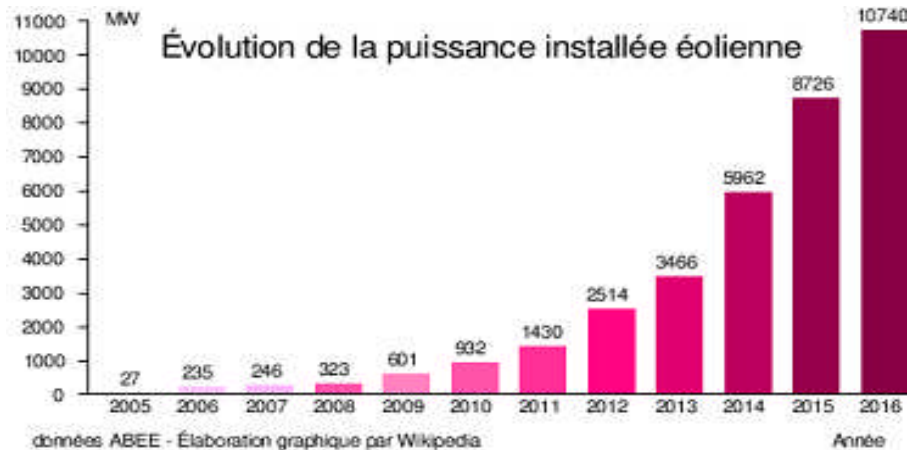


Figure I.3: Capacité totale installée (MW).

I.4. Différents types d'éolienne :

I.4.1. Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [8] [13] et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts[14].

Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal[15] [16].

I.4.2. Les éoliennes à axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des dynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de

pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3. Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères.

Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [14]

I.4.3. Principales composantes des éoliennes

L'éolienne à axe horizontal Figure (I.4), étant le sujet de notre étude, sera décrit en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [16] [17].

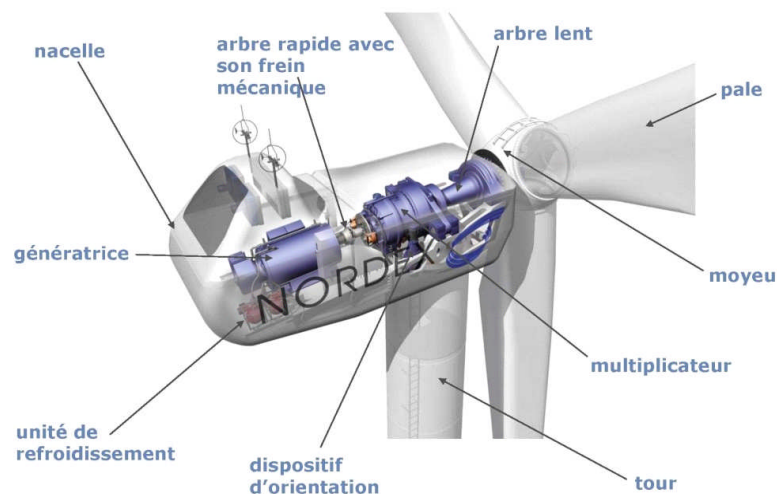


Figure I.4: Principales composantes de l'éolienne

- ❖ **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
- ❖ **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- ❖ **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
- ❖ **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- ❖ **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.

- ❖ **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- ❖ **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- ❖ **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- ❖ **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- ❖ **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- ❖ **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- ❖ Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

1.5. Les éoliennes connectées au réseau

Aujourd'hui, on peut recenser deux types de famille d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées et les éoliennes à vitesse variable [16].

1.5.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice figure (I.5).[16].

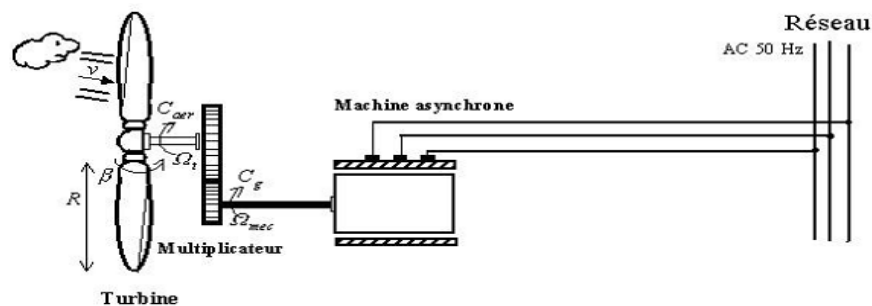


Figure I.5: Éolienne directement connectée au réseau.

I.5.2. Les éoliennes à vitesse variable

La configuration de la figure (I.6.a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure (I.6.b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

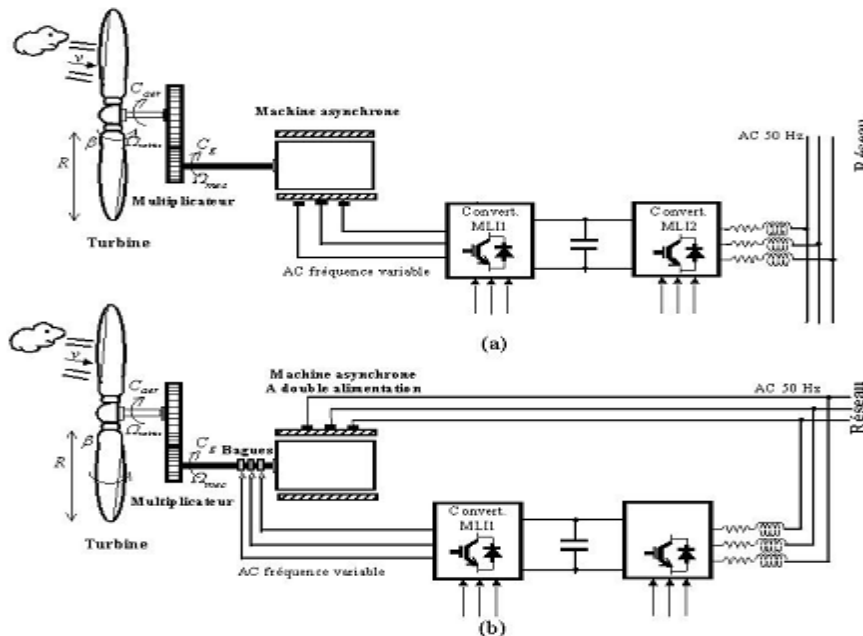


Figure I.6: Éoliennes à vitesse variable.

I.5.3. Intérêt de la vitesse variable

Suivant la figure (I.7), pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ($\Omega_{réf}$) calculée pour maximiser la puissance extraite.

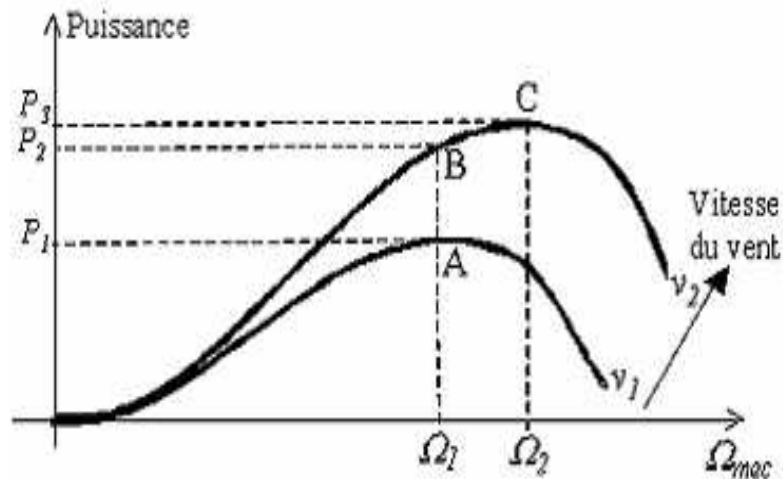


Figure I.7: Caractéristique de la puissance générée.

I.6. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

I.6.1. Avantages de l'énergie éolienne

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- ❖ Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles.
- ❖ 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.
- ❖ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ❖ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- ❖ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement.
- ❖ Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

I.6.2. Les inconvénients :

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

- ❖ L'impact visuel. Ca 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.
- ❖ L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- ❖ La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- ❖ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie

1.7. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- ❖ Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;
- ❖ L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- ❖ Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome).

Sur ce et à travers nos lectures il est à noter que dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement

1.7.1. Différentes topologies de la MADA et le choix de la meilleure structure

Pour subvenir à nos besoins et afin d'atteindre notre but, notre recherche s'est restreinte aux topologies utilisant des convertisseurs bidirectionnels. Nous avons ainsi, pu distinguer plusieurs variantes se basant sur des architectures différentes utilisant toutes une MADA pour la conversion électromécanique

La structure à **énergie rotorique dissipée** présente un mauvais rendement. En effet, si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance (pertes par effet joule) ; ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance.

La structure de **Kramer** a remplacé la précédente dans le but de réduire les pertes d'énergie par effet joule. Mais l'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau), donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme.

Cette structure est alors abandonnée au profit de la structure de **Scherbius avec cyclo convertisseur**. Mais son utilisation génère des perturbations harmoniques importantes qui

nuisent aussi au facteur de puissance du dispositif, malgré son avantage par rapport à la précédente

On fait alors appel à la structure de **Scherbius avec convertisseur MLI**. Cette structure, de par ses qualités est la meilleure et la plus utilisée dans la plupart des éoliennes à vitesse variable basées sur la MADA elle utilise deux ponts triphasés à IGBT peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau

Partant de ce constat, nous avons retenu la structure de **Scherbius avec convertisseur MLI** pour le reste de notre étude.

1.7.2. Modes de fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

Malgré la présence des contacts glissants, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau, mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau.

L'équation (I.1) nous permet de constaté que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constant, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g .

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (\text{I.1})$$

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

I.7.2.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :

La figure (I.8) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joules dans le rotor[8],[18].

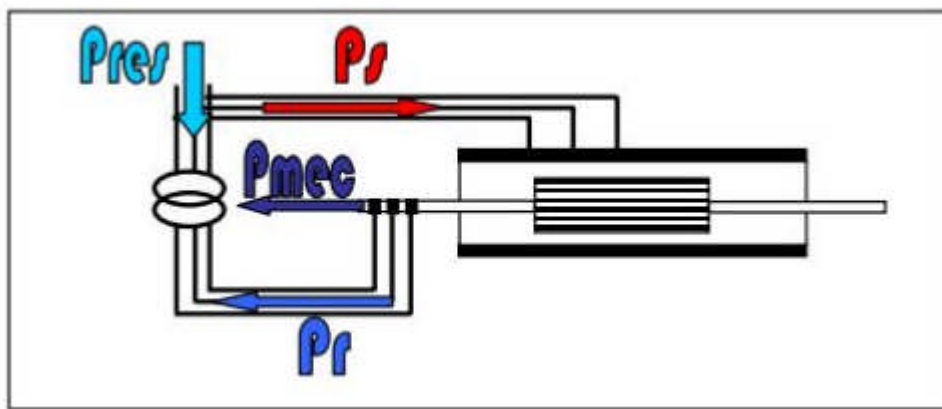


Figure I.8. Fonctionnement hypo-synchrone de la MADA

I.7.2.2. Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

La figure (I.9) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

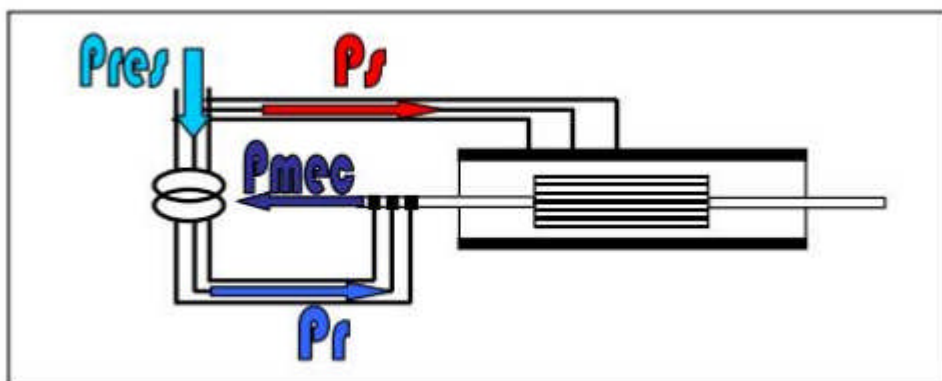


Figure I.9. Fonctionnement hyper-synchrone de la MADA

I.7.2.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone :

La figure (I.10) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [8] [18] [19].

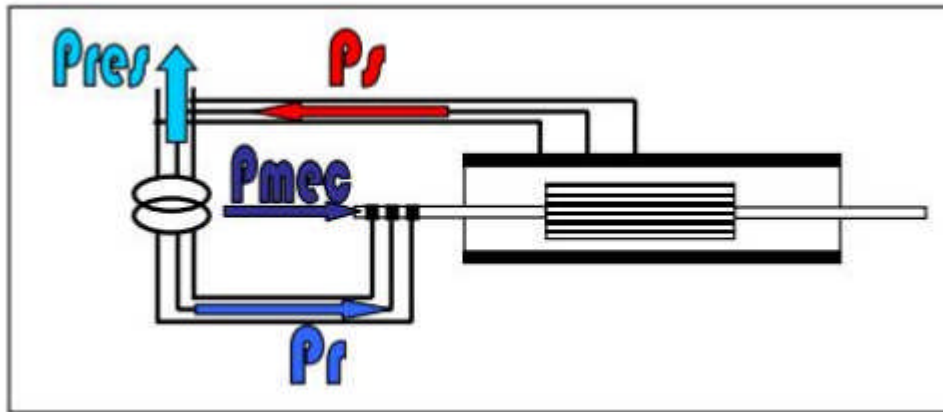


Figure I.10. Fonctionnement hypo-synchrone de la GADA

I.7.2.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone :

La figure (I.11) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes joule dans le rotor [8] [18] [19].

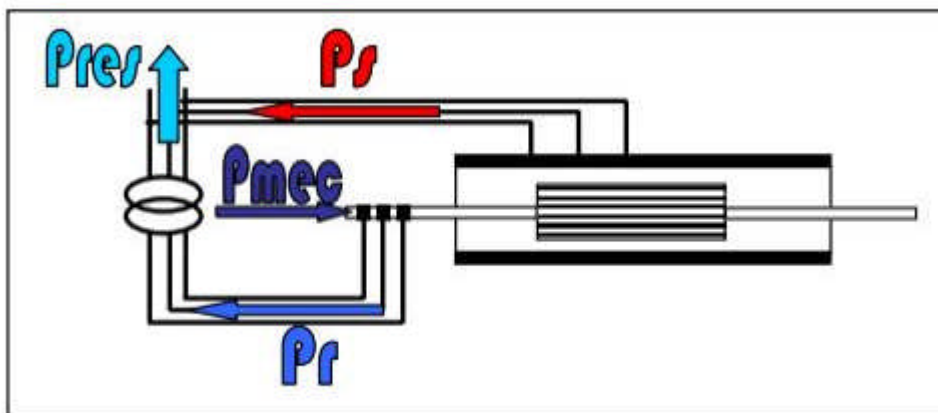


Figure I.11. Fonctionnement hyper-synchrone de la GADA

I.8. Conclusion

Ce chapitre représente un état de l'art sur les systèmes de conversion éolien qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale les différentes structures existantes et les composantes principales des éoliennes.

Après nous avons examiné les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale.

La structure à vitesse variable à base d'une machine asynchrone en double alimentation a attiré notre attention vu les avantages qu'elle présente et qui peuvent être encore améliorés si on l'associe à une turbine à calage variable des pales, c'est la raison pour laquelle nous allons consacrer le reste de ce mémoire pour l'étude de cette structure.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans le chapitre suivant à la conception et la simulation d'un modèle de la turbine éolienne

II.1. INTRODUCTION

Dans le deuxième chapitre, nous avons proposé le concept de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend des paramètres de construction définissant son potentiel. Dans ce chapitre. Nous établissons un modèle de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne insistant notamment sur le caractère multiphasique (prise en compte des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques)

Dans ce chapitre du mémoire, on va essayer d'entamer les points suivants

- Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz).
- Différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.
- Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne
- Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable.
- Technique d'extraction du maximum de puissance
- Résultats de simulation de la turbine.

II.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

II.2.1. Loi de Betz

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique. 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. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site[14].

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz [8] [16] [20] [21] [22]. Il suppose que les pales soient placées dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 .

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.1})$$

Ainsi, la masse de l'air en mouvement de densité ρ (elle varie avec la pression de l'air et la température) traversant la surface S balayée par les pales de l'éolienne comme présenté à la figure II.1 est donnée par:

$$m = \frac{\rho.S.(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

Telle que $S = \pi.R^2$ avec R étant le rayon du rotor.

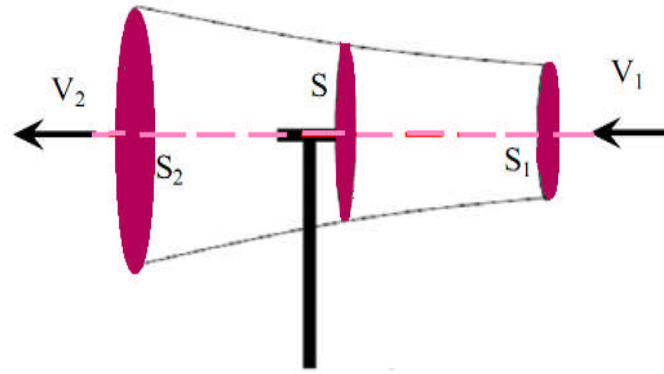


Figure II.1: Principe de la théorie de Betz

La puissance extraite du vent par l'éolienne P_m est égale à la masse multipliée par le carré de la diminution de la vitesse (selon la seconde loi de Newton) :

$$P_m = m \cdot \left(\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \right) \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant m par son expression dans (II.2):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot \left(\frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \right) \quad (\text{II.4})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors:

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$\frac{P_m}{P_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right)}{2} \quad (\text{II.6})$$

Le ratio $\frac{P_m}{P_v}$ est appelé coefficient de puissance (C_p).

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (II.6) présenté dans la figure (II.2), en traçant la courbe de $\frac{P_m}{P_v}$ en fonction de $\frac{V_2}{V_1}$. Nous pouvons constater aisément que la fonction atteint son maximum pour $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$, la valeur maximale pour la puissance extractible du vent ne dépasse pas la valeur maximale de $16/27$ soit 0,59 de la puissance totale.

Ceci a été dérivé la première fois par A. Betz, c'est pourquoi on l'appelle le " facteur de Betz " ou " limite de Betz " [23]. Cette valeur est la valeur théorique maximale du coefficient

de puissance, donc, l'efficacité théorique maximale qu'un convertisseur d'énergie éolienne peut avoir est 59,3%. Il est bien de mentionner que cette valeur du coefficient de puissance a été obtenue pour un idéal convertisseur de flux sans frottement.

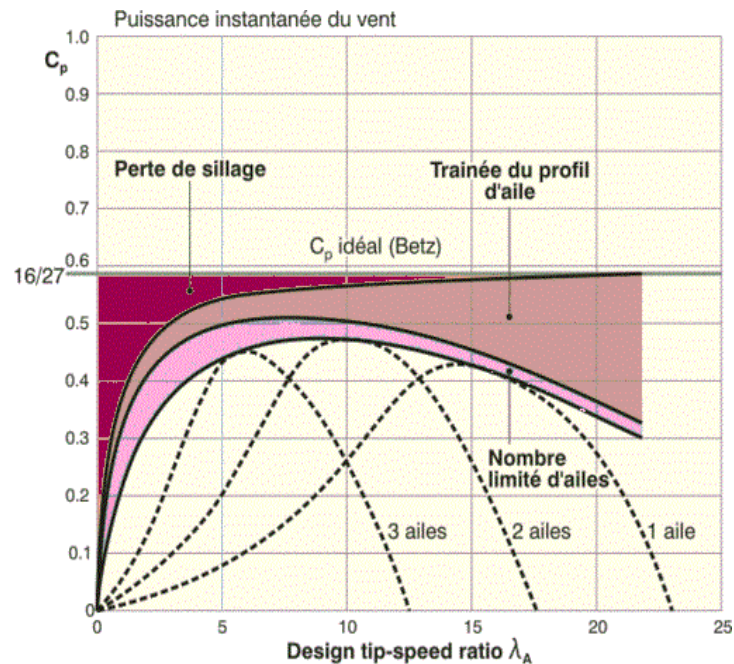


Figure II.2: Coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse du vent.

II.3. Les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n . Cette dernière est obtenue à partir d'une vitesse du vent V_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale de l'éolienne [8].

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre (4) zones figure (II.3) [19] [24].

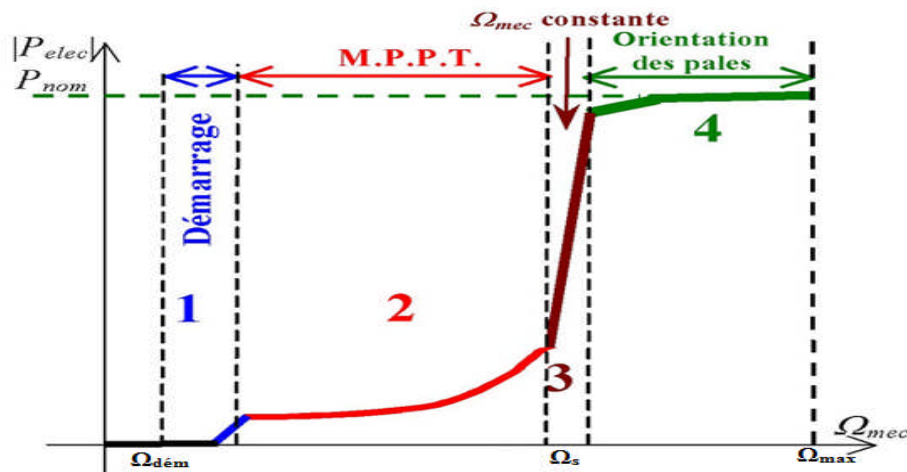


Figure II.3: Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance.

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse de démarrage $\Omega_{dém}$. (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 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, 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. Au-delà de la vitesse Ω_{max} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

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.

II.4. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice:

II.4.1. Système à décrochage aérodynamique « Stall »

Un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "Stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , Figure (II.4).

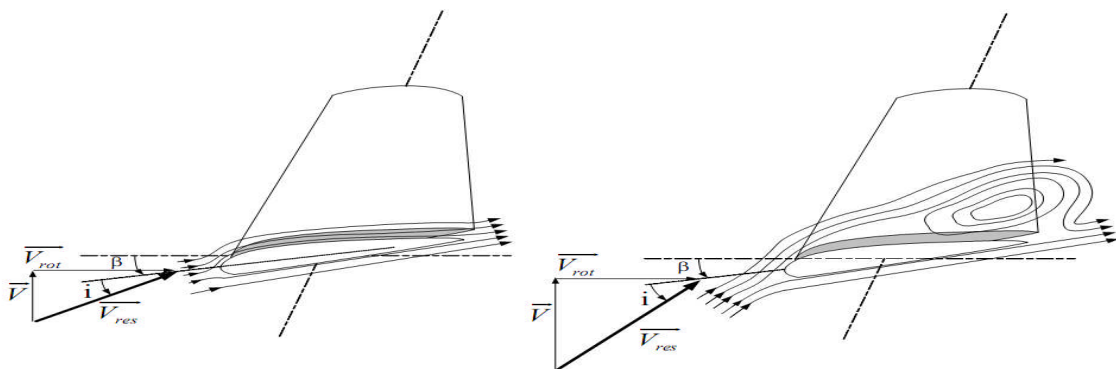


Figure II.4: Flux d'air sur un profil de pale " Stall ".

II.4.2. Système à pas variable ou à calage variable ou système « pitch »

Sur une éolienne contrôlée à calage variable, le contrôleur électronique vérifie la puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage (Le calage des pales [21]) qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, Figure (II.5).

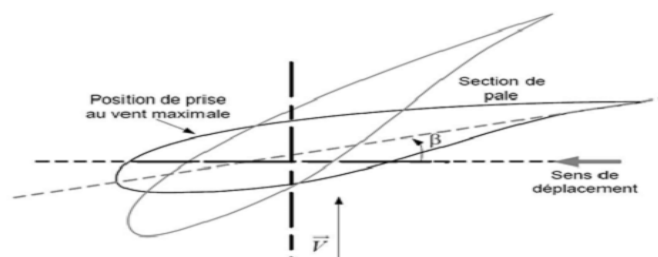


Figure II.5: Variation de l'angle de calage d'une pale.

II.5. Modélisation de la turbine

Le dispositif, que nous étudions ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G figure (II.6).

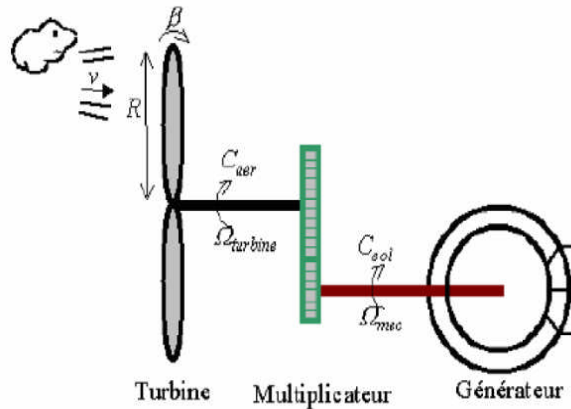


Figure II.6: Schéma de la turbine éolienne.

II.5.1. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (II.2), (II.5) et (II.6), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [8] [21]:

$$P_{aéro} = \frac{P_m}{V_1} \cdot P_v = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.7)$$

Avec:

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_1} \quad (II.8)$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} \cdot C_p \left(\frac{R \cdot \Omega_{mec}}{G \cdot V_1} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (II.9)$$

Avec:

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

β : Angle d'inclinaison des pales [°].

ρ : Densité de l'air.

R : Longueur de la pale.

V_1 : Vitesse du vent.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

G : Rapport du multiplicateur.

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.10})$$

II.5.2. Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. La modélisation du couple éolien va donc dépendre essentiellement de la prise en compte de la spécificité du coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ puisqu'il dépend grandement du type et de la caractéristique de la turbine. Plusieurs expressions du coefficient de puissance ont été proposées dans la littérature [20], ou par des constructeurs de turbines éoliennes.

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés. L'expression de coefficient de puissance que nous allons utiliser dans notre étude est donnée par [20]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \lambda_i \quad (\text{II.11})$$

Dans cette formule, le paramètre λ_i dépend également de λ et β

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II.12})$$

II.5.2.1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice Figure (II.11). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (\text{II.13})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.14})$$

II.5.2.2. Équation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [24].

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \tag{II.15}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{II.16}$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{II.17}$$

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

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{II.18}$$

Avec:

$$f = \frac{f_{\text{turbine}}}{G^2} + f_g \tag{II.19}$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément du GIC (Graphe

Informationnel causal) et est représenté par la figure (II.7).

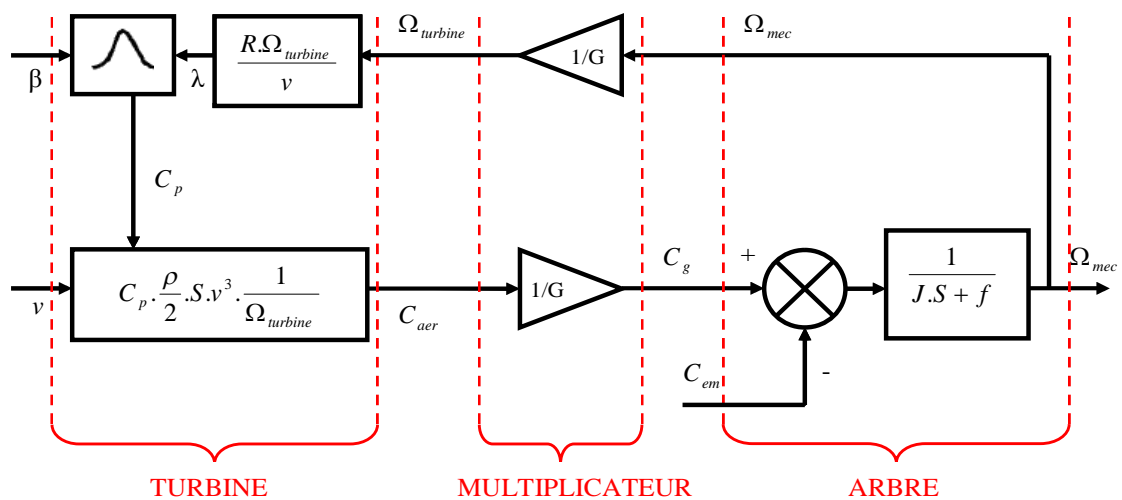


Figure II.7: Schéma bloc du modèle de la turbine.

II.6. Technique d'extraction du maximum de puissance

II.6.1. Bilan de puissance

L'équation (II.7) quantifie la puissance captée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . En régime permanent, la puissance aérodynamique $P_{aér}$ diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique figure (II.8).

$$P_{elec} = P_{aér} - Pertes \quad (II.20)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice.

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.21)$$

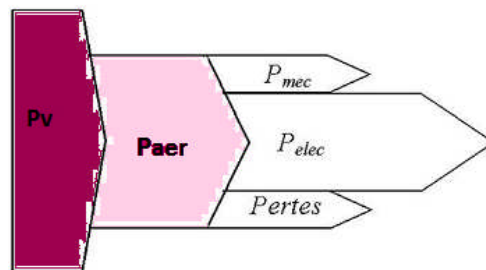


Figure II.8: Diagramme de conversion de puissance.

Dans cette partie, nous présentons l'un des différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique mécanique. Ce principe est connu (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 cde. A travers la bibliographie nous avons distingué deux familles de structures de commande pour la maximisation de la puissance extraite [24]

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

Dans notre mémoire, nous sommes intéressés au contrôle le couple électromagnétique par asservissement de la vitesse mécanique en utilisant le simple régulateur classique PI.

II.6.2. Maximisation de la puissance extraite

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux.

$$C_{em} = C_{em\ ref} \quad (II.22)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

La vitesse est influencée par l'application de trois couples : Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant.

$$\frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (C_g - f \cdot \Omega_{\text{mec}} - C_{\text{mec}}) \quad (\text{II.23})$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence

Le couple électromagnétique de référence $C_{\text{em.ref}}$ permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivant :

$$C_{\text{em.ref}} = \text{PI}(\Omega_{\text{ref}} - \Omega_{\text{mec}}) \quad (\text{II.24})$$

PI : est le régulateur de vitesse ;

Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{\text{turbine.ref}}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{\text{ref}} = G \cdot (\Omega_{\text{turbine.ref}}) \quad (\text{II.25})$$

Elle est obtenue à partir de l'inversion de l'équation (II.8):

$$\Omega_{\text{turbine.ref}} = \frac{\lambda_{Cp \text{ max}} \cdot V_1}{R} \quad (\text{II.26})$$

II.6.3. Conception du correcteur de vitesse

L'action de correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches:

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

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs présenté dans la figure (II.9).

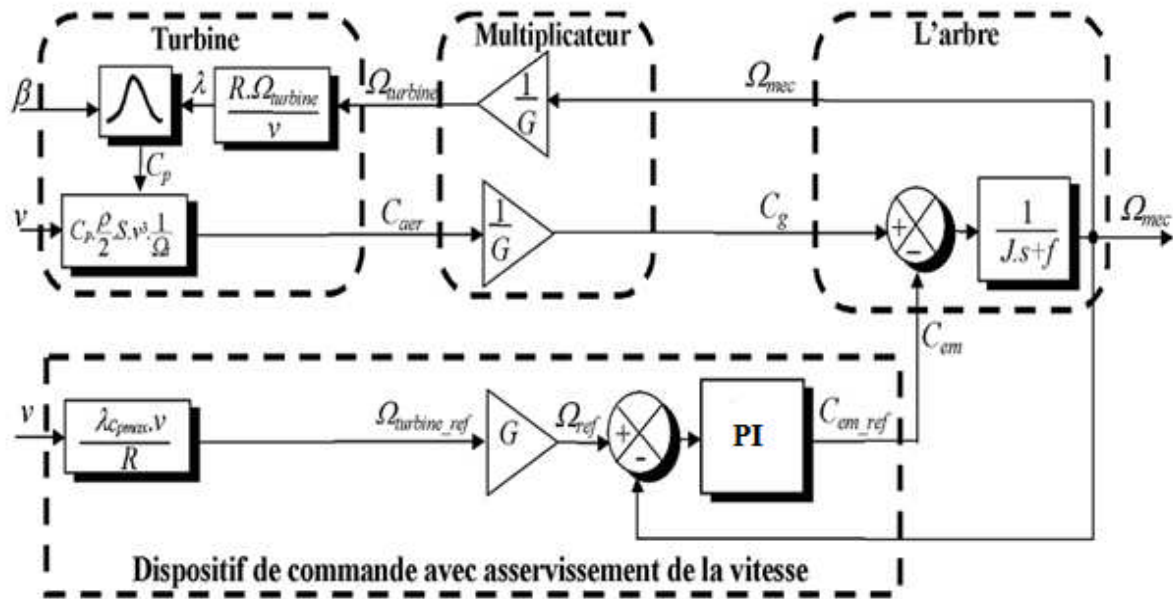


Figure II.9: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.

Différentes technologies de correcteur peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse. Dans l'annexe (B) nous détaillons le type de régulateur de correcteur proportionnel intégral (PI).

II.7. Résultats de simulation

La figure (II.10) montre le modèle de la turbine dans la zone 2 (M.P.P.T) de fonctionnement de l'éolienne. Ainsi que la simulation du fonctionnement a été réalisée par le logiciel Matlab/Simulink pendant une durée égale à 1.5s.

La figure (II.11) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne dont la valeur moyenne est autour de (6.5m/s). Cette vitesse est estimée en l'Algérie et en particulier dans le sud et l'ouest.

La figure (II.12) montre l'allure de la vitesse mécanique obtenue par le profil du vent représenté sur la figure (II.11). On constate que la vitesse mécanique suit à chaque instant sa valeur de référence.

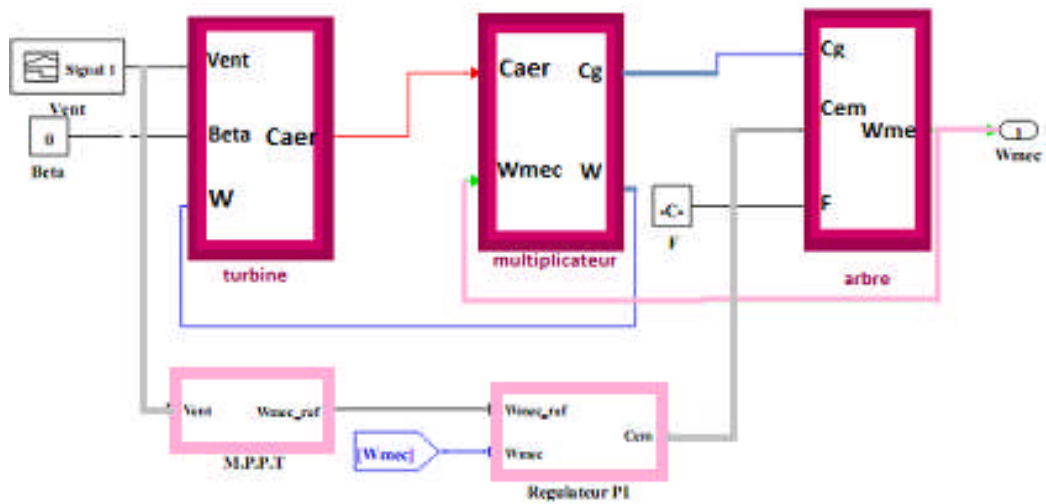


Figure II.10: Modèle de la turbine dans la zone 2 (M.P.P.T).

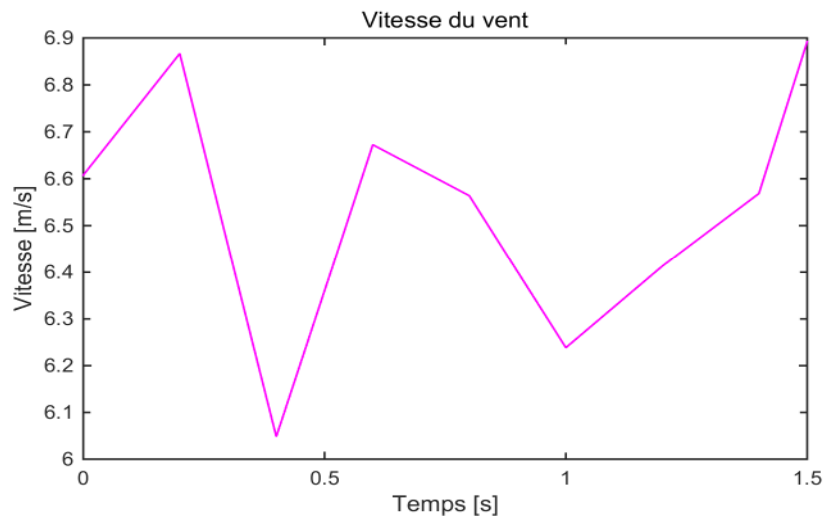


Figure II.11: L'allure de la vitesse du vent.

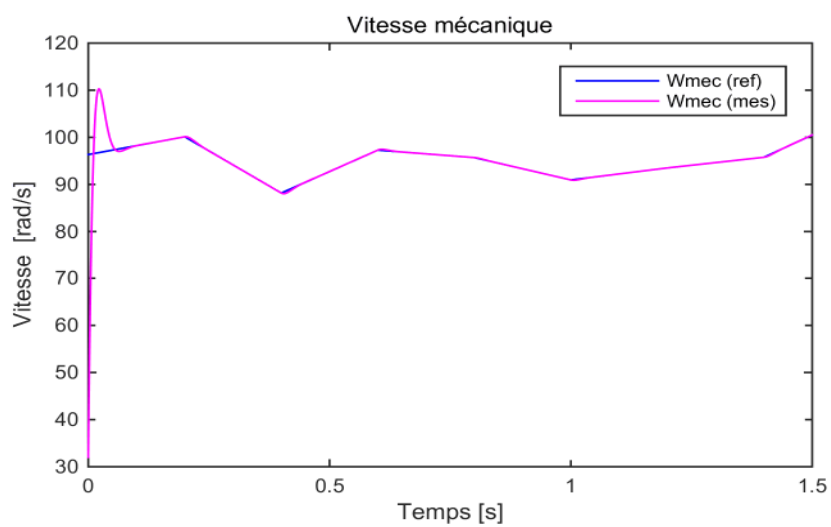


Figure II.12: Allure de vitesse Mécanique

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit en premier lieu la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz), la régulation mécanique de la puissance d'une éolienne a été décrite. Par la suite un modèle mathématique de la turbine a été établi par sa simulation.

Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

Dans le prochain chapitre, nous allons étudier la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

III.1 .Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) très utilisée elle occupe un large domaine d'application. La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de puissance. Le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation. On présentera sa modélisation dans le repère de Park qui permet la simplification du modèle avec ses deux alimentations à fréquences variables. A la fin on expose les résultats de la simulation.

III.2. Description général de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles

La MADA a une double accessibilité au stator et au rotor. Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative". Sur la figure (III.1) suivante nous apercevons sa structure

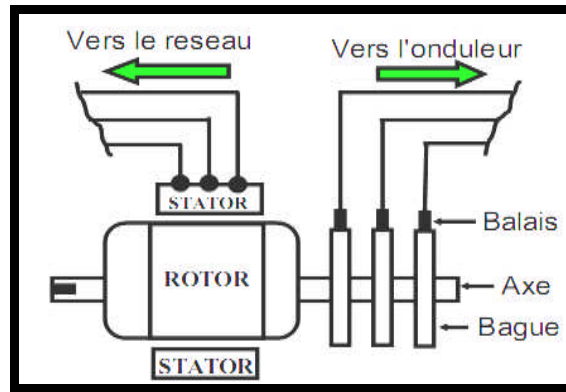


Figure III.1 : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.

III.3. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients que présente la machine asynchrone à double alimentation

III.3.1. Avantages de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente plusieurs avantages dont on peut citer :

- ❖ Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo en hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- ❖ La mesure des courants au stator et rotor, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ❖ Le partage des fréquences entre le stator et le rotor en effet dans le cas d'une double alimentation
- ❖ En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse ce fonctionnement présenté comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée.
- ❖ La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [9]

III.3.2. Inconvénients de la MADA

- ❖ Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais [9].
- ❖ La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance.
- ❖ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium donnent maintenant un petit avantage à la MADA [9].

III.4. Modélisation de la MADA

La modélisation des machines électriques consiste en élaboration des modèles mathématique qui permettent de prédire le comportement de la machine dans différents régimes de fonctionnement, en prévoyant ainsi les points qui risquent de provoquer des perturbations.

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$, et aussi trois bobines rotoriques identiques et similaires à celles du stator, Figure (III.2)

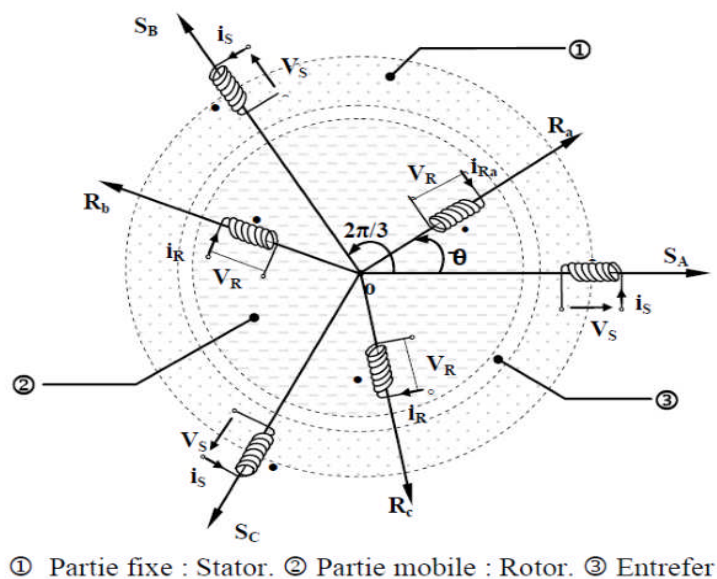


Figure III.2 : Représentation spatiale de la MADA.

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d-q) donné par la transformation de Park est alors utilisé.

III.4.1 Hypothèses simplificatrices

- ❖ L'entrefer constant.
- ❖ L'effet des encoches négligé.
- ❖ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- ❖ L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- ❖ Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- ❖ Les Pertes ferromagnétiques négligeables.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

III.4.2. Modèle mathématique de la MADA

III.4.2.1. Équation électrique :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{so} = R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \end{cases} \quad (III.1)$$

$$\text{Ou : } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (III.2)$$

De façon analogue, la transformation des grandeurs rotoriques conduit au système :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \\ V_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \end{cases} \quad (III.3)$$

$$\text{Ou : } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (III.4)$$

III.4.2.2. Équation magnétique :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{so} = L_{so} i_{so} \end{cases} \quad (III.5)$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \\ \Phi_{ro} = L_{ro} i_{ro} \end{cases} \quad (III.6)$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$L_{ro} = l_r + 2M_r$: Inductance homopolaire rotorique.

Quand les sommes des composantes (a,b,c) sont nulles, la troisième équation toujours vérifiée car identiquement nulle.

Les équations de Park. Statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (III.7)$$

Les flux sont donnés dans le système :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (III.8)$$

III.4.2.3. Équation des puissances et du couple

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) \quad (III.9)$$

III.4.2.4. Équation mécanique

Le principe fondamental de la dynamique nous permet d'écrire :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_{mec} \quad (III.10)$$

$$\text{Avec } \Omega_{mec} = \frac{\omega}{P}$$

III.4.3. Mise sous forme d'équation d'état

Pour une bonne représentation de la machine asynchrone à double alimentation, nous considérons comme variable d'états les flux statoriques (Φ_{sd}, Φ_{sq}), les courants rotoriques (I_{rd}, I_{rq}) et la vitesse de rotation ω .

Le système d'équation présentant la machine dans le repère (d-q) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme ω_s à l'aide des expressions de système d'équation (III.7) (III.8) et (III.10) Nous obtenons le modèle de la machine asynchrone à double alimentation suivant.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d\Phi_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \Phi_{sd} + \omega_s \Phi_{sq} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + V_{sd} \\
 \frac{d\Phi_{sq}}{dt} = -\omega_s \Phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} \Phi_{sq} + \frac{R_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} + V_{sq} \\
 \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{sd} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{sq} - \left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2} \right] i_{rd} + (\omega_s - \omega) i_{rq} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{sd} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rd} \\
 \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \Phi_{sd} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \Phi_{sq} - (\omega_s - \omega) i_{rd} - \left[\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2} \right] i_{rq} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{sq} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rq} \\
 \frac{d\omega}{dt} = \frac{P^2 M_{sr}}{L_s J} (\Phi_{sq} i_{rd} - \Phi_{sd} i_{rq}) - \frac{P}{J} C_r - \frac{f}{J} \omega
 \end{array} \right. \quad (III.11)$$

Où σ est le coefficient de dispersion de Blondel : $(\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_s})$

III.5. Commande vectorielle

III.5.1. Description de la commande vectorielle

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Où bien, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui de la machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit, plusieurs entraînements à courant continu sont remplacés par des machines à courant alternatif, ce qui permet un réglage de vitesse plus performant de point de vue rapidité et précision.

L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser des performances meilleures pour les applications de la production d'énergie dans une gamme de vitesse limitée [25] et constitue actuellement un domaine de recherche.

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle) dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle en puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Pour établir cette commande, on considère l'hypothèse simplificatrice que les enroulements statoriques et rotoriques de la machine sont supposés triphasés équilibrés, donc, toutes les composantes homopolaires sont nulles.

III.5.2. Modèle de la MADA à flux statorique orienté

Dans ce qui suit nous allons supposer que l'axe «d» du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [20].

Nous rappelons le système d'équations différentielles électrique et magnétique décrivant la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant qui est donné dans les systèmes d'équation (III. 7) et (III. 8).

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine asynchrone à double alimentation. On oriente le repère (d,q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique Φ_s .

Ainsi :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (III.12)$$

Les systèmes d'équation (III. 8) et (III. 9) peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (III.13)$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante [8] [20]

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_s \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (III.14)$$

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

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = -P \frac{M_{sr}}{L_s} \Phi_s i_{rq} \quad (\text{III.16})$$

Cette relation rappelle la relation du couple électromagnétique de la MCC à excitation séparée donc le fonctionnement de la MADA est similaire à celui de la MCC (Machine à Courant Continu).

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique Φ_s constant. Cette considération associée à l'équation (III.17) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique i_{rq} en quadrature.

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique de d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive. Un tel modèle peut être élaboré en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques.

III.5.3. Expressions des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \\ Q = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

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

$$\begin{cases} P = v_s i_{sq} \\ Q = v_s i_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Les puissances active P et réactive Q sont donc en fonction des courants statoriques i_{sd} et i_{sq} respectivement, sur lesquels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve :

$$\begin{cases} P = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} \\ Q = -\frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Il ressort de l'expression (III.21) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe «q», et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe «d» à une constante près $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ imposée par le réseau [20].

III.5.4. Expressions des tensions rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine. En remplaçant dans l'équation des flux les courants statoriques par l'expression (III.20), on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques, on trouve :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques déphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.23)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, il est possible d'établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. En examinant les équations (III.21) et (III.23), on peut imaginer le schéma bloc de la MADA qui est le système à réguler ; comportant en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives engendrées Figure (III.3)

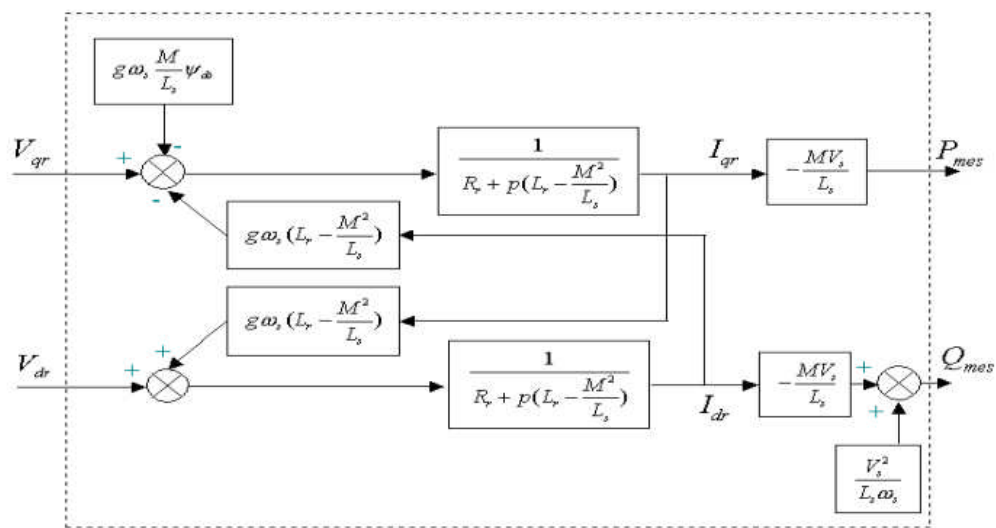


Figure III.3 : Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

Avec :

V_{rd} et V_{rq} : Les composantes déphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'expression $\left(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Son influence entre les deux axes reste minimale. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. Le terme $g \frac{M_{sr} V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car il entraîne une erreur de traînage.

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactives statoriques. Il montre

également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe «q» rotorique et la puissance active pour l'axe «d» rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal [26] [27]

Ainsi, il existe deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [28] :

- ❖ La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode est appelée **méthode directe**, car les régulateurs de puissances contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- ❖ La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode, appelée **méthode indirecte**.

L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple. Cependant, elle présente plus de perturbations entre les deux puissances. La méthode indirecte quant à elle, a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ; ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants, Et c'est sur ce que notre travail se suivra.

III.6. Commande indirecte sans boucle de puissance

On utilise la commande indirecte sans boucle de puissance dans le souci de garantir une bonne stabilité. Nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine [27] [28] [29].

On établit alors le système de régulation donné par la figure (III.4)

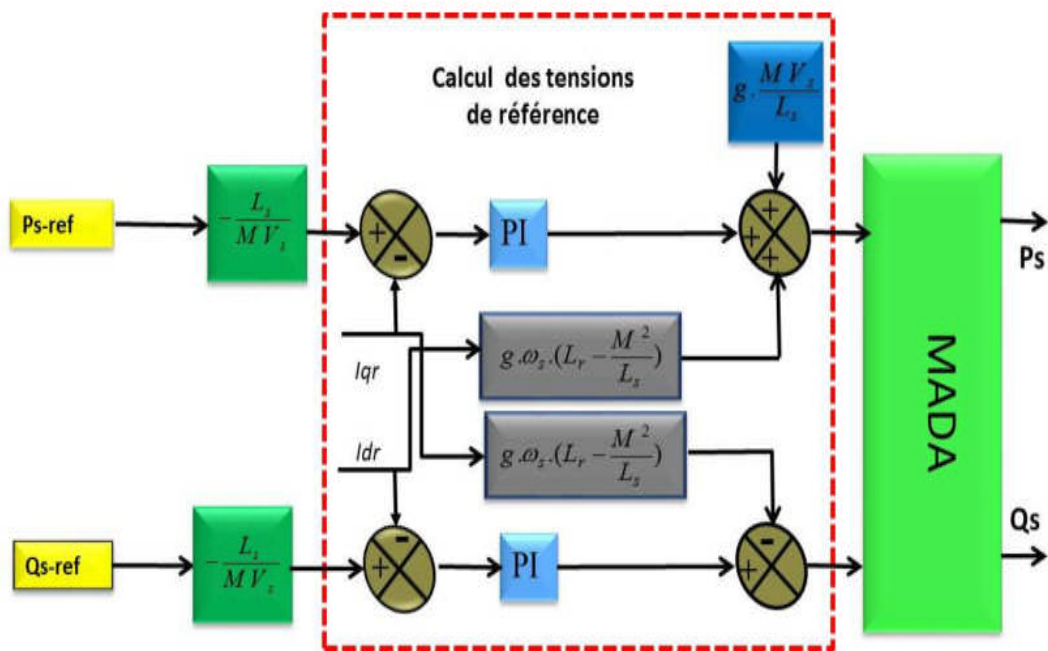


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance.

III.7. Convertisseur MLI :

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu alternatif permettent de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

L'onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistors ou à thyristors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux [25].

La tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur.

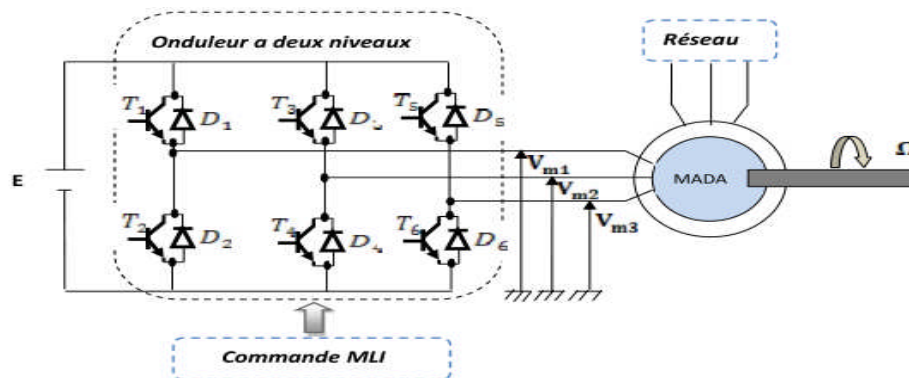


Figure.III.5. Schéma électrique de la liaison de rotor via un convertisseur MLI

III.7.1. Onduleur à deux niveaux :

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture.

Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfait

III.7.2. Résultat de simulation et interprétation :

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, alimentée directement par une source de tension triphasée parfaite au niveau de circuit statorique, d'une fréquence du réseau qui est 50Hz et de valeur efficace de 220V, et l'autre au niveau du rotor. Ce dernier est lié à un onduleur classique à deux niveaux.

La commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, nous a permis de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple.

Les figures III.6. (a) et (b) montrent les allures de la puissance active et réactive avec leurs références respectivement. Elles nous ont permis de montrer les grandes performances et la bonne poursuite des allures de puissance (active et réactive).

A partir de la figure (III.7), nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature nulle, ceci confirme le découplage parfait entre le flux et couple.

Les figures (III.8) et (III.9) montrent les courants rotorique suivent l'axe (d) et (q) respectivement on constate que ces courants suivent leurs référence avec succès. Le courant rotorique suivant l'axe (d) est l'image de la puissance réactive et le courant rotorique suivant l'axe (q) à la même image que la puissance active et du couple électromagnétique présenté sur figure (III.10).

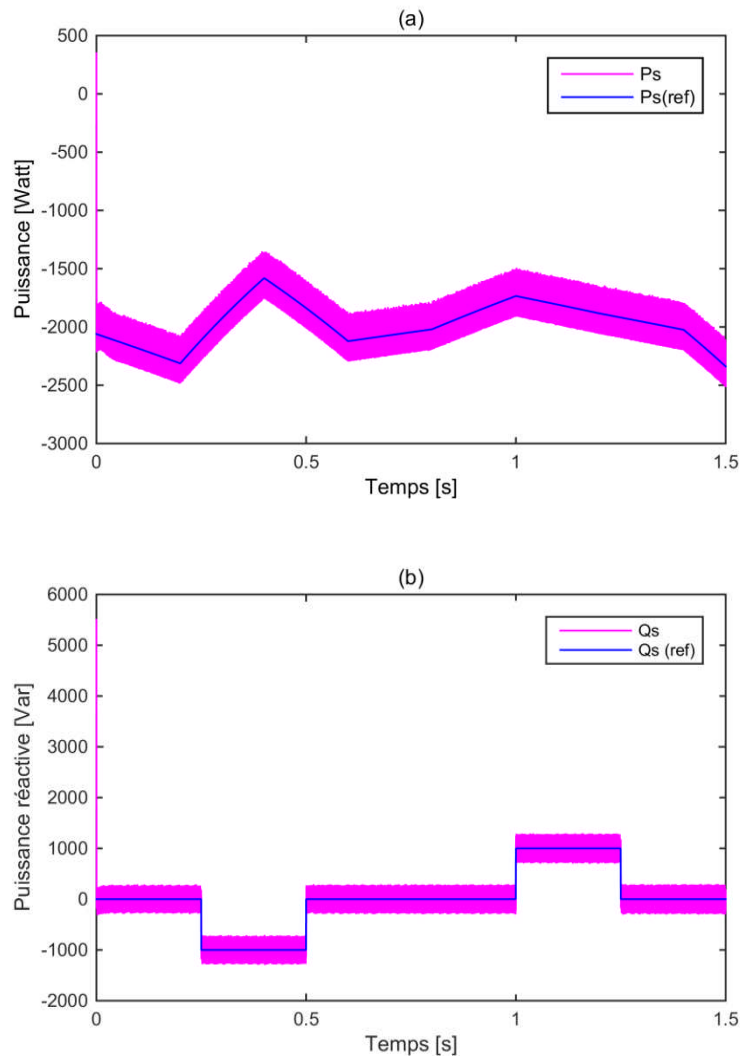


Figure III.6 : Les puissances : (a) active, (b) réactive.

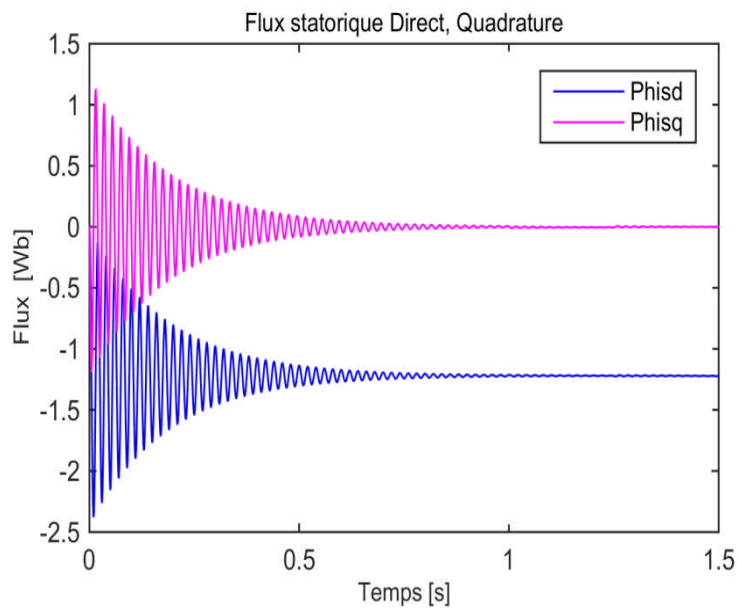


Figure III.7 : Le flux statorique selon l'axe d et q la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

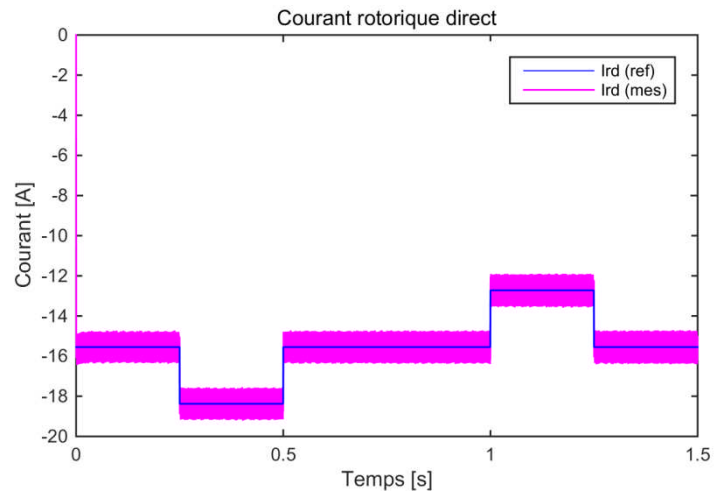


Figure III.8 : Le courant rotorique selon l'axe d pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

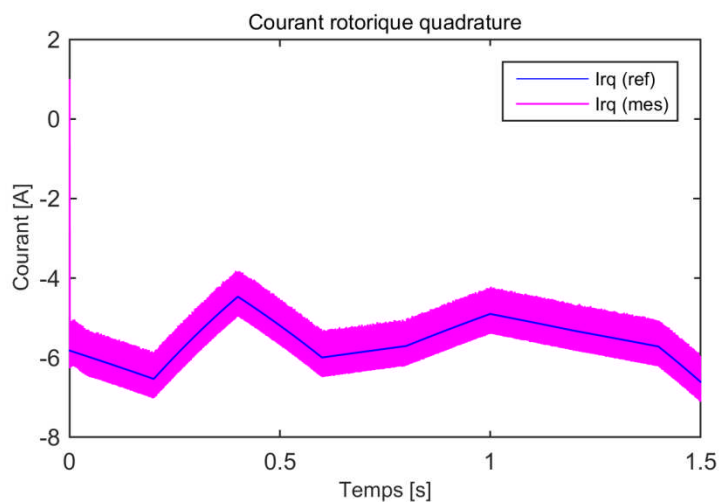


Figure III.9 : Le courant rotorique selon l'axe q pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

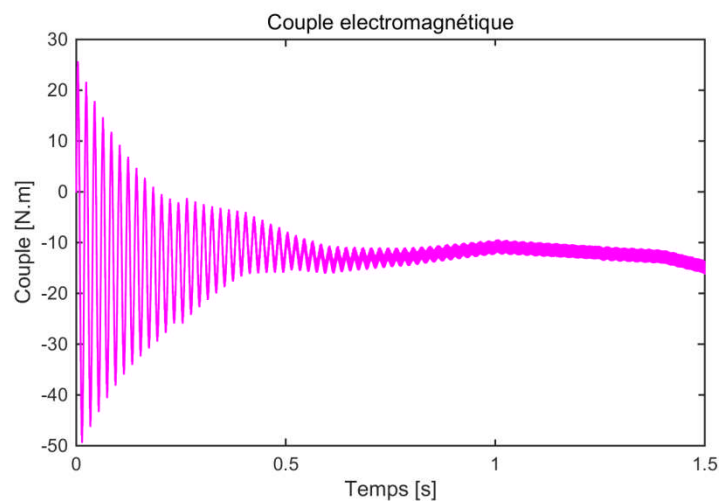


Figure III.10 : Couple électromagnétique pour la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a étudié le principe de la commande vectorielle indirect sans boucle de puissance.

D'après les résultats de simulation et à travers cette commande on arrive à conclure que la MADA commandée est similaire à une machine à induction.

Pour améliorer les performances obtenues par le PI classique, une autre technique de commande sera présentée et utilisée, à savoir la commande de backstepping.

Dans prochain chapitre on va la présentation et la modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux dans le but d'alimenter la MADA côté rotor.

IV.1. Introduction

Durant ces dernières années, les convertisseurs de puissance multi-niveaux sont largement utilisés et commercialisés dans divers domaines industriels de haute tension et de forte puissance dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. Ils constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions.

En effet il existe plusieurs structures de ces convertisseurs à savoir : les onduleurs à cellules imbriquées, à diodes flottantes et ceux à structure NPC. Cette dernière, permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge grâce à sa topologie. Ainsi, elle permet de générer non seulement une tension la plus sinusoïdale possible, mais aussi d'améliorer le taux d'harmoniques grâce au nombre élevé de niveaux de tension offert par la structure de ce type de convertisseur [30]

Nous allons présenter dans ce chapitre, l'étude d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structures NPC, en citant les stratégies de commande. Un travail de simulation dans un environnement Matlab/Simulink est effectué.

IV.2. Onduleur triphasé à trois niveaux type NPC

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source de tension continue en une énergie de tension alternative.

Les onduleurs sont constitués en grande partie par des interrupteurs. Ces derniers sont soumis, dans la majorité des cas, à de fortes contraintes thermiques puisqu'ils sont appelés à bloquer la pleine tension imposée par la source continue, étant donné que le phénomène est répétitif, le rendement et la durée de vie des composants sont réellement affectés [31] [32].

La structure des onduleurs trois-niveaux et plus, permettent de pallier cette problématique. L'utilisation de ce type d'architecture aide à la limitation des contraintes en tension subies par les interrupteurs en fractionnant la tension continue à l'entrée d'onduleur. L'association d'une architecture de type multi-niveau à une commande judicieuse des interrupteurs de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques et par conséquent, d'améliorer le contenu spectral des signaux de sortie (tension et courant). Toutefois, le choix d'un nombre élevé de niveaux et par suite l'utilisation de plus de composants rendra le

système plus encombrant donc la structure trois-niveaux semble la mieux adaptée aux exigences spécifiées [33].

Même par rapport à la structure classique, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement inférieur. La tension aux bornes de chaque interrupteur est divisée par deux et la fréquence de hachage est plus basse [30].

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure (IV.1). Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut E, dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $E/2$ à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4 pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu [34].

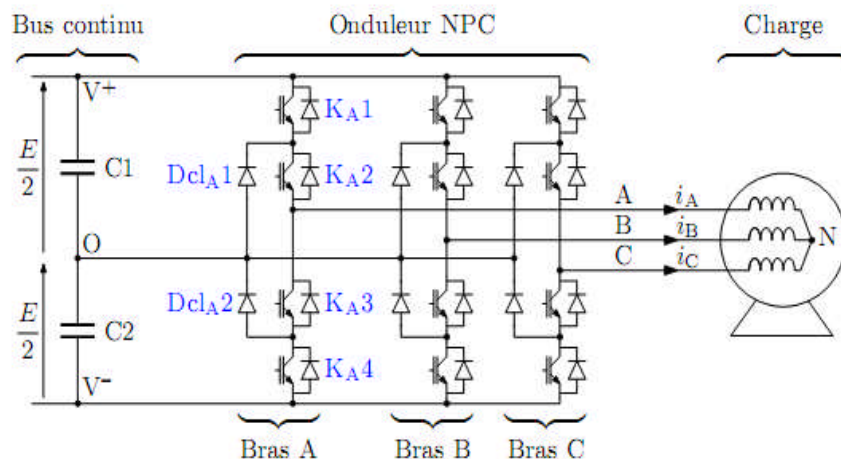


Figure IV.1 : Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à type NPC.

Pour des raisons de simplicité, nous limiterons l'étude à un bras d'onduleur NPC de trois niveaux, l'objectif visé est de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs statiques, et de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Pour un convertisseur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions. Et en particulier pour le NPC à trois niveaux on a trois séquences de fonctionnement:

- **Séquences 1** : Génération du niveau maximum.

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont passants et K3, K4 sont bloqués comme le montre la figure (IV.2-a). La tension de sortie V_{a0} est $V_{a0} = +\frac{1}{2}E$. La tension inverse

appliquée aux interrupteurs k3, k4 vaut: $V_{k3} = V_{k4} = +\frac{1}{2}E$

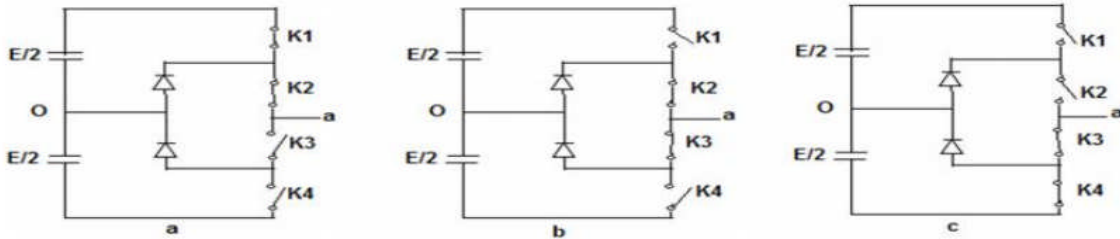


Figure IV.2 : Séquence de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux type NPC.

➤ **Séquences 2** : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point O à travers l'une des diodes de maintien, comme le montre la figure (IV.2-b). La tension de sortie V_{a0} est donc nulle, $V_{a0} = 0$. La tension inverse appliquée aux

interrupteurs K1, K4 vaut: $V_{k1} = V_{k4} = +\frac{1}{2}E$

➤ **Séquences 3**: Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants comme le montre la figure (IV.2-c). La tension de sortie V_{a0} est $V_{a0} = -\frac{1}{2}E$. Et La tension inverse appliquée

aux interrupteurs K1, K2 vaut $V_{k1} = V_{k2} = +\frac{1}{2}E$ Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (2).

K1	K2	K3	K4	Va0
1	1	0	0	E/2
0	1	1	0	0
0	0	1	1	-E/2

Tableau IV. 1 : États possibles de l'onduleur à 3 niveaux NPC.

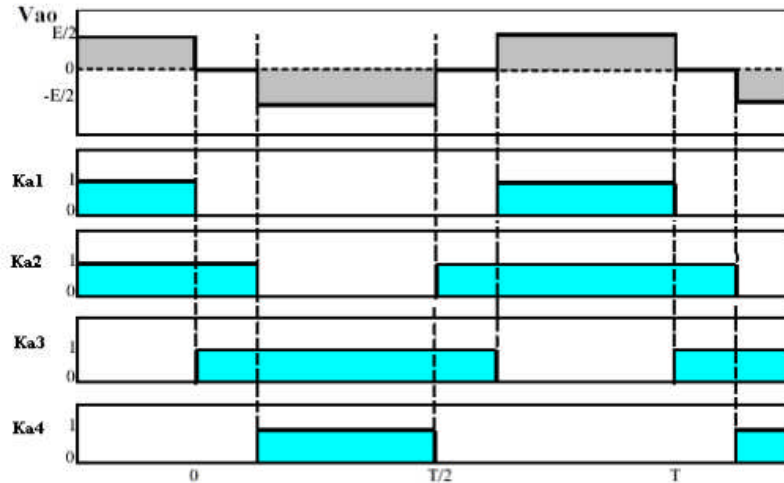


Figure IV. 1: Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux.

La figure (IV.3) montre que les interrupteurs dans l'onduleur NPC à trois niveaux ont un temps de conduction minimal et une tension à supporter à l'état bloqué aussi minimale.

IV.3. Model de l'onduleur à trois niveaux

IV.3.1 Différentes configuration d'un bras d'onduleur

L'analyse topologique d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux montre qu'il existe cinq configurations possibles pour ce dernier, cette topologie est illustrée dans figure (IV.4)

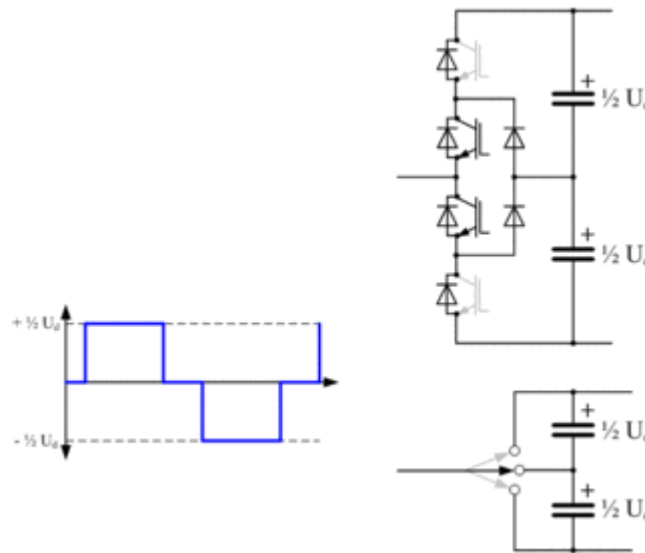


Figure IV. 2: Différentes configuration d'un bras d'onduleur.

➤ **Première configuration E0:**

Tous les interrupteurs sont ouverts : $V_1=0$.

➤ **Deuxième configuration E1:**

Les interrupteurs KA1 et KA2 sont fermé : $V_1=E/2$.

➤ **Troisième configuration E2:**

Les interrupteurs DclA1 et KA2 sont fermé : $V_1=0$.

➤ **Quatrième configuration E3:**

Les interrupteurs KA3 et KA4 sont fermé : $V_1=-E/2$.

➤ **Cinquième configuration E4:**

Les interrupteurs DclA2 et KA3 sont fermé : $V_1=0$.

IV.3.2. Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes (grandeurs électriques).

Supposons que :

- ❖ La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est faible (négligeable devant U_c).
- ❖ La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé, alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0 \end{cases} \quad (IV.1)$$

Avec :

V_A, V_B, V_C Les tensions alternatives simples à la sortie de l'onduleur.

i_1, i_2, i_3 : Les courants à la sortie de l'onduleur.

Pour éviter une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Avec B_{ks} la commande du transistor T_{ks} du bras k.

IV.3.2. Fonction de connexion d'un onduleur à trois niveaux

On commence par définir la fonction de connexion F_{ki} de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. La structure d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC est montré sur la figure (IV.1)

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Avec, $k=1,2$ ou 3 , représente le numéro du bras

On définit la fonction de connexion F_{km}^b du demi-bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} - F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} - F_{k4} \end{cases} \quad (IV.4)$$

On désigne par: $m=1$: le demi-bras du haut et $m=0$: le demi-bras du bas.

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b \times U_{c1} - F_{10}^b \times U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^b \times U_{c1} - F_{20}^b \times U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^b \times U_{c1} - F_{30}^b \times U_{c2} \end{cases} \quad (IV.5)$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \times U_{c2} \right. \dots \quad (IV.6)$$

Les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} sont exprimés en fonction des courants de charge i_1, i_2 et i_3 par

les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad (IV.7)$$

D'où :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (IV.8)$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant i_{d1} était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et i_{d2} le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas. Le courant i_{d0} est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11}.F_{13}.i_1 + F_{21}.F_{23}.i_2 + F_{31}.F_{33}.i_3 \quad (IV.9)$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, cette relation devient:

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b).i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b).i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b).i_3 \quad (IV.10)$$

IV.4. La modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

Un signal à modulation de largeur d'impulsion (PWM) est une méthode qui permet de générer un signal analogique en utilisant une source numérique. Un signal PWM est constitué de deux composantes principales qui définissent son comportement : un rapport cyclique et une fréquence. Le rapport cyclique décrit la durée pendant laquelle le signal est à l'état haut (actif) en pourcentage de la durée d'un cycle complet. La fréquence détermine la vitesse à laquelle le PWM effectue un cycle (par exemple, 1000 Hz serait 1000 cycles par seconde) et par conséquent à quelle vitesse il passe de l'état haut à l'état bas et vice versa. En changeant l'état d'un signal numérique suffisamment rapidement, et avec un certain rapport cyclique, la sortie donnera l'apparence de se comporter comme un signal analogique à tension constante lorsqu'elle alimente des périphériques.

Les signaux PWM sont utilisés dans une grande gamme d'applications de contrôle. Ils sont principalement utilisés pour contrôler des moteurs CC mais peuvent également servir à contrôler des vannes, des pompes, des systèmes hydrauliques et d'autres pièces mécaniques. La fréquence nécessaire pour le signal PWM dépend de l'application et du temps de réponse du système alimenté.

Il existe plusieurs techniques de commande des redresseurs à MLI, qui varient de la simplicité et la médiocrité de performances à la complexité et la robustesse (contrôle de l'angle de puissance du redresseur, commande à hystérésis de courant, commande par comparaison de rampe...). Grâce à ses trois régulateurs (Deux pour les composantes du courant et un pour la tension continue),

IV.5. Les résultats de simulation

Le schéma de fonctionnement de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC est représenté dans la figure (IV.5). La simulation du fonctionnement a été réalisée à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK.

La figure (IV.6) montre l'allure de la tension simple V_A de l'onduleur à trois niveaux.

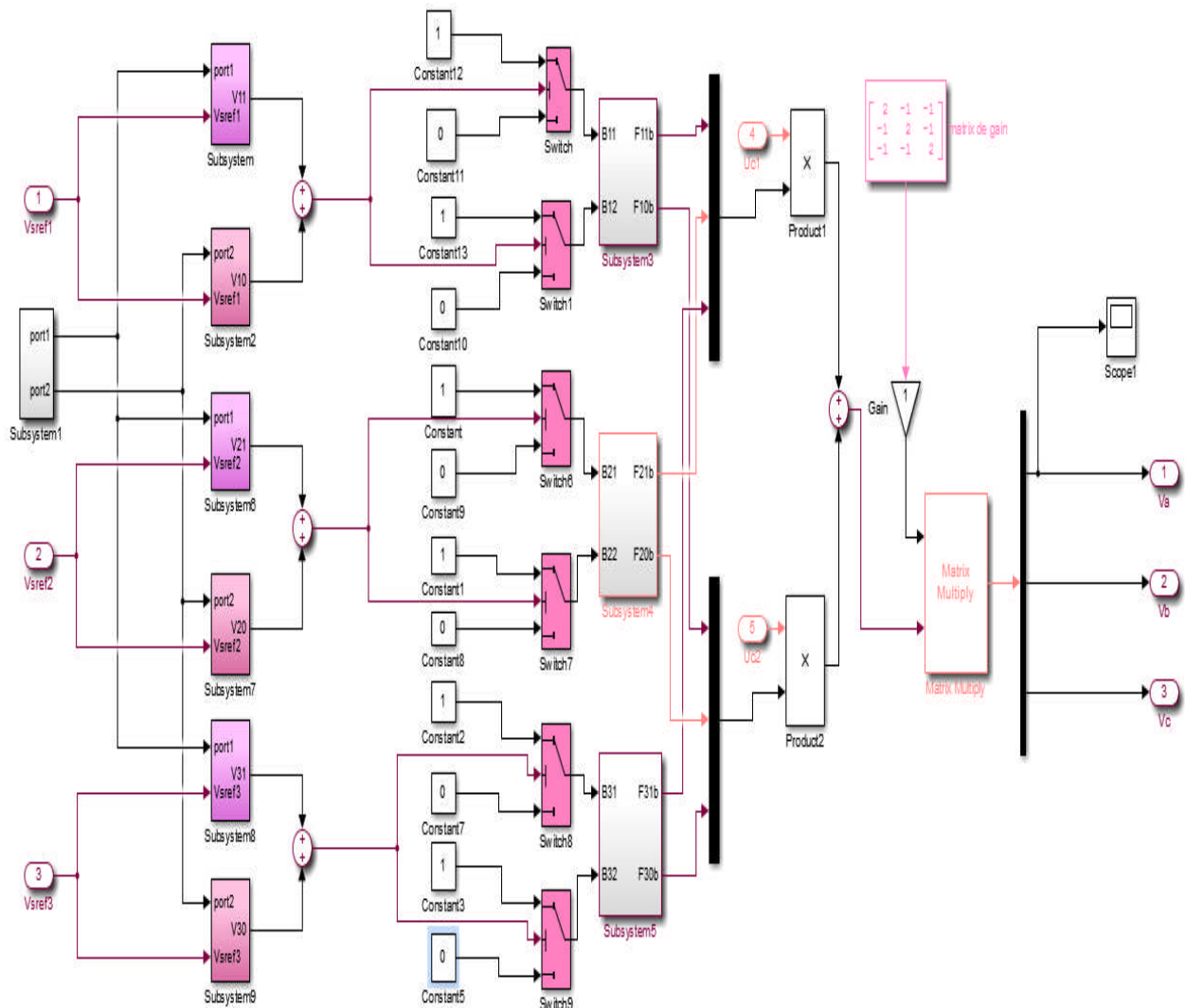


Figure IV.5 : Simulation de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK.

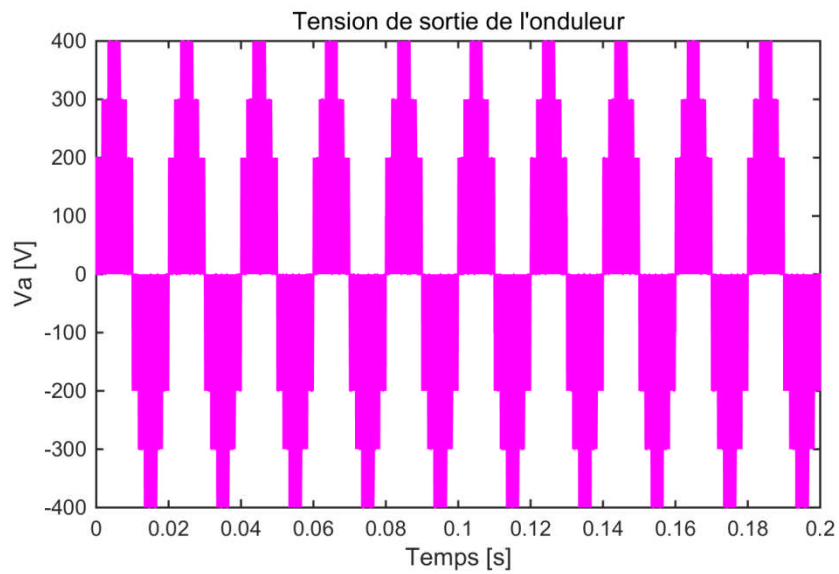


Figure IV.6 : Tension de sortie de l'onduleur triphasé à trois niveaux

IV.6. Conclusion

On a vu dans ce chapitre l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux à structure NPC et on a discuté sur les différentes séquences et la configuration d'un seul bras et aussi présenté les fonctions de connexion

L'objectif principal du chapitre suivant est l'application d'une commande non linéaire pour étudier les performances de la (MADA) et afin d'éliminer l'erreur statique due à la charge

V.1. Introduction :

Toujours on recherche une solution optimale pour améliorer les performances pour le système dynamique utilisé, les techniques de commande sont demandées le but de résoudre le problème des variations paramétriques, avec une erreur statique nulle, une réponse rapide, parmi ces techniques, on trouve la commande de backstepping, un certain nombre d'ouvrages traitant cette nouvelle approche sont apparus [35],[36],[37],[38],[39]. Des applications à des procédés ont aussi été présentées dans la littérature [46]. Cette technique est basée sur l'utilisation des fonctions de Lyapunov, ce qui facilite l'étude de la stabilité.

Ce chapitre présente un bref aperçu sur la théorie de commande de backstepping de la MADA. Dans ce cadre, nous présentons en premier lieu un rappel théorique sur la commande des systèmes à structure variable.

Nous présentons des notions de bases sur la stabilité des systèmes non linéaires, nous abordons ensuite la conception de l'algorithme de commande avec ses différentes étapes. Nous entamons après l'application de la commande sur la MADA.

L'objectif principal apporté à ce type de commande est le réglage de la puissance active et réactive d'une manière découplée.

Nous montrons enfin les avantages apportés par ce type de réglage, tout en exposant les résultats de simulation.

V.2. Généralités sur la théorie du contrôle par backstepping :

V.2.1. Historique du backstepping

La technique du backstepping a fait son apparition dans les années 1990 elle a été développée par Kanellakopoulos et al. (1991) [35] et inspiré par les travaux de Feurer et Morse (1978) [11] d'une part et Tsinias (1989) [41] et Kokotovic et Sussmann (1989) [42] d'autre part. Elle offre une méthode systématique pour effectuer le design d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires. Le mot backstepping est particulièrement justifié par le processus récursif intrinsèque à la synthèse. Il permet d'effectuer une synthèse constructive d'une loi de commande pour les systèmes non linéaires triangulaires en adoptant la théorie de Lyapunov [43]. L'idée consiste à choisir une fonction de Lyapunov définie positive et que sa dérivée soit toujours négative.

L'historique du backstepping est résumé dans Krstic et l'approche y est largement approfondie.[39]

V.2.2. Concept de la commande du backstepping

La plupart des techniques de commande non linéaire sont basées sur la théorie de la stabilité de Lyapunov. L'objectif est de trouver une loi de commande qui rend la dérivée d'une fonction de Lyapunov, choisie a priori, définie ou semi-définie négative. La principale difficulté réside alors dans le choix d'une fonction de Lyapunov convenable. La technique du backstepping surmonte cette difficulté en construisant progressivement une fonction de Lyapunov adaptée au système, et permet de déduire la commande qui rend la dérivée de cette fonction définie négative. Cette technique s'applique à la classe de système dite en strict feedback[22]

La méthode du backstepping commence en définissant une fonction d'énergie qui intègre l'écart entre les sorties régulées du système et les objectifs de commande. Le principe est alors de construire à chaque étape un écart entre l'état courant du système et une commande virtuel qui garantirait, s'il pouvait être appliqué tel quel, la non-positivité de la dérivée de la fonction de Lyapunov. A la fin de chaque étape, la fonction d'énergie est complétée par cet écart, afin d'en assurer la convergence vers zéro. Le processus s'achève lorsque le vecteur de commande du système apparaît : la commande virtuel défini au dernier pas est alors une commande réelle, garantissant la convergence des états du système vers zéro, et l'équilibre des sorties régulées autour des objectifs de commande [39].

La méthode de linéarisation par bouclage de retour élimine toutes les non linéarités du système, la technique du backstepping donne plus de flexibilité au concepteur en exploitant les " bonnes " non linéarités, tandis que les " mauvaises " non linéarités ou les non linéarités déstabilisantes sont dominées en ajoutant des amortissements non linéaires. Ainsi, une robustesse additionnelle est obtenue [44].

V.3. Notions de bases sur la stabilité des systèmes non linéaires

V.3.1. Systèmes non linéaires

Les systèmes non linéaires, par opposition aux systèmes linéaires, sont des systèmes physiques régis par des équations différentielles à coefficients variables [45]

V.3.2. Équilibre

Physiquement, un système est en équilibre lorsqu'il conserve son état de stabilité en absence de forces extérieures. Mathématiquement, cela signifie que la dérivée \dot{X} de la fonction X de son état est nulle

$$\square = 0 \quad (\text{V.1})$$

V.3.3 Plan de phase

Pour comprendre le comportement d'un système non linéaire, on utilise souvent une représentation de ses trajectoires dans l'espace de phase. Ces trajectoires sont un ensemble de courbes qui représentent l'évolution de l'état du système dans le temps.

L'obtention de ces trajectoires passe toutefois par la résolution de l'équation différentielle qui le régit, ce qui semble une tâche difficile. C'est pourquoi, les outils permettant l'analyse du comportement du système sans résoudre les équations qui le décrivent, ont connu un grand succès.

V.3.4. Stabilité (Selon l'intuition)

On dit qu'un système est stable lorsqu'il revient à son état d'équilibre (se déplace vers sa position d'équilibre); par contre, si on l'excite par une impulsion et qu'il s'éloigne de sa position d'équilibre, on dit qu'il est instable

V.3.5. Stabilité (Selon Lyapunov)

Soit un système dont l'état est défini par le vecteur x qui possède la position d'équilibre x^* , écarté de cette position et abandonné à lui-même au temps $t=t_0$ avec les conditions initiales $x(t_0)$, le système aura comme état $x(t)$. On dit que la position d'équilibre du système est stable, si pour tout $\epsilon > 0$, il existe $\sigma(\epsilon) > 0$ tel que

$$\|x(t) - x^*\|^2 < \sigma \quad (\text{V.2})$$

Après un certain temps t et pour toutes les valeurs $t > t_0$

$$\|x(t) - x^*\|^2 < \epsilon \quad (\text{V.3})$$

Pour que le système soit stable : l'état doit tendre effectivement vers x^* , on dit que le système est stable asymptotiquement, dans cas où les états n'atteignent pas x^* mais restent à l'intérieur d'un certain cercle de rayon ϵ , on dit que le système a une stabilité simple, Figure (V.1)

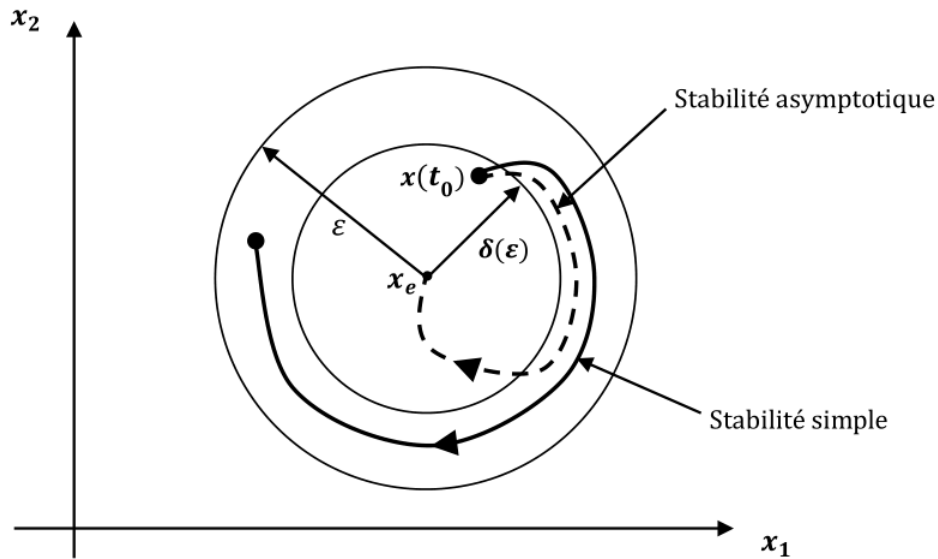


Figure V.1 : Types de stabilité selon Lyapunov

V.4. Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes

Les systèmes non linéaires sont des systèmes très complexes et pour étudier leur stabilité, on a besoin d'approches. L'approche de Lyapunov est la plus utilisée pour étudier leur stabilité. Pour cela, on distingue deux méthodes d'analyse de Lyapunov à savoir

- ❖ La méthode de linéarisation.
- ❖ La méthode directe.

La première concerne la stabilité locale autour d'un point d'équilibre. Par contre, la deuxième détermine la stabilité des systèmes en construisant une fonction scalaire des états du système dont on examinera la variation temporelle. On s'intéresse à la méthode directe de Lyapunov car la commande par backstepping est basée sur cette méthode [45].

V.5. Synthèse de la commande par la méthode backstepping

En général, il existe deux concepts pour l'application de la méthode directe de Lyapunov pour la synthèse d'une commande stable :

1^{er} concept : on suppose que la loi de commande existe et on cherche la fonction de Lyapunov.

2^{ème} concept : on fait un choix sur la fonction de Lyapunov $V(x)$, et on cherche la loi de commande qui rend cette fonction de Lyapunov réelle.

Dans la plupart des cas, la recherche de la fonction de Lyapunov pour la détermination de la stabilité des systèmes est très difficile. Dans ce qui suit, on va présenter la notion de « Backstepping » qui nous offre une solution à ce problème

Afin d'illustrer le principe de la méthode backstepping, on considère le cas des systèmes non linéaires de la forme[39]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) - g_0(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) - g_0(x_1, x_2)x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) - g_0(x_1, \dots, x_n)u \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

Avec $x_1 = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^n$

On désire faire suivre à la sortie $y = x$ le signal de référence y_{ref} supposée connue. Le système étant d'ordre n , la conception s'effectue en n étapes.

On commence par la première équation du système (V.4) où x_2 sera considérée comme une commande virtuelle intermédiaire. On définit la première référence désirée du sous système x_2 qui doit suivre la référence définie y_{ref} telle que :

Étape 1 : Réglage de la variable x_1

$$(x_1)_d = y_{ref} = \alpha_0 \quad (\text{V.5})$$

Où $(x_1)_d$ est l'état désiré

La première variable d'erreur du sous système est défini par :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (\text{V.6})$$

$$\frac{de_1}{dx} = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \frac{d\alpha_0}{dx} \quad (\text{V.7})$$

Pour un tel sous système, nous choisissons d'abord la fonction de Lyapunov V_1 sous une forme quadratique

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{V.8})$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\frac{dV_1}{dx} = e_1 \cdot \frac{de_1}{dx}$$

$$\frac{dv_1}{dx} = e_1 \cdot \left[f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \frac{d\alpha_0}{dx} \right] \quad (\text{V.9})$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système, il faut d'après Lyapunov, que $\frac{dv_1}{dx}$ soit négative.

Pour cela on choisit $\frac{dv_1}{dx}$ sous la forme :

$$\frac{dv_1}{dx} = -k_1 \cdot e_1^2 \leq 0 \quad (\text{V.10})$$

Où $k_1 > 0$ est un paramètre constant. En substituant (V.9) dans (V.8) on trouve :

$$\frac{dv_1}{dx} = e_1 \cdot \left[f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \frac{d\alpha_0}{dx} \right] = -k_1 \cdot e_1^2 \leq 0 \quad (\text{V.11})$$

Cela donne la commande virtuelle x_2

$$x_2 = \frac{1}{g_0(x_1)} \cdot \left[-k_1 \cdot e_1 + \frac{d\alpha_0}{dx} - f_1(x_1) \right] \quad (\text{V.12})$$

D'où la stabilité asymptotique à l'origine.

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée x_{2ref} du sous système suivant.

Étape 2 : Réglage de la variable x_2

On considère les deux premières équations du système définie en (V.4)

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) - g_0(x_1)x_2$$

$$\dot{x}_2 = f_1(x_1, x_2) - g_0(x_1, x_2)x_3 \quad (\text{V.13})$$

Où la nouvelle référence désirée α_1 sera la variable de commande pour le sous système précédent x_{2ref} ref tel que :

$$x_{2ref} = \alpha_1 \quad (\text{V.14})$$

Et la nouvelle variable d'erreur :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{V.15})$$

De la même manière, on définit la fonction de Lyapunov pour assurer la stabilité du sous système suivant :

$$x_2 = f_1(x_1, x_2) - g_0(x_1, x_2)x_3 \quad (\text{V.16})$$

Ces fonctions dépendent forcément des états précédents du sous système définie par :

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2}e_2^2$$

$$v_2 = \frac{1}{2} \left[e_1^2 + e_2^2 \right] \quad (\text{V.17})$$

Cette dernière a pour dérivée :

$$\frac{dv_2}{dx} = \frac{dv_1}{dx} + e_1 \cdot \frac{de_1}{dx}$$

$$\frac{dv_2}{dx} = -k_1 \cdot e_1^2 + e_2 \cdot \left[f_1(x_1, x_2) + g_0(x_1, x_2)x_3 - \frac{d\alpha_1}{dx} \right] \quad (\text{V.18})$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système, il faut que $\frac{dv_2}{dx}$ soit négative. Pour cela on

choisit $\frac{dv_2}{dx}$ sous la forme :

$$\frac{dv_2}{dx} = -k_1 \cdot e_1^2 - k_2 \cdot e_2^2 \leq 0 \quad (\text{V.19})$$

Où $k_2 \succ 0$ est un paramètre constant. En substituant (V.18) dans (V.17) on trouve :

$$\frac{dv_2}{dx} = -k_1 \cdot e_1^2 + e_2 \left[f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \frac{d\alpha_1}{dx} \right] = -k_1 \cdot e_1^2 - k_2 \cdot e_2^2 \quad (\text{V.20})$$

Cela donne la commande virtuelle x_3

$$x_3 = \frac{1}{g_0(x_1, x_2)} \cdot \left[-k_2 \cdot e_2 - f_1(x_1, x_2) + \frac{d\alpha_1}{dx} \right] \quad (\text{V.21})$$

Avec

$$\frac{d\alpha_1}{dx} = \frac{g_0(x_1) \left[-k_1 \frac{de_1}{dx} + \frac{d^2\alpha_0}{dx^2} e_2 - \frac{df_1(x_1)}{dx} \right] - \left[-k_1 \cdot e_1 + \frac{d\alpha_0}{dx} - \frac{df_1(x_1)}{dx} \right] \frac{dg_0(x_1)}{dx}}{g_0^2(x_1)} \quad (\text{V.22})$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée x_{3ref} du sous système suivant.

On pose $x_{3ref} = \alpha_2$ et on continue jusqu'à la dernière expression du sous système (V.4)

Où on atteindra le calcul de la loi de commande réelle.

Nième étape : Réglage de la variable n nième

Le système (V.4) est maintenant considéré dans sa globalité. De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera :

$$(x_n)_d = \alpha_{n-1} \quad (\text{V.23})$$

Sa dérivée est :

$$\frac{de_n}{dx} = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \frac{d\alpha_{n-1}}{dx} \quad (\text{V.24})$$

$$\frac{de_n}{dx} = f_1(x_1, \dots, x_n) + g_0(x_1, \dots, x_n)u - \frac{d\alpha_{n-1}}{dx}$$

Avec la fonction de Lyapunov augmentée :

$$\begin{aligned} v_n &= v_1 + \dots + \frac{1}{2} e_n^2 \\ v_n &= \frac{1}{2} [e_1^2 + \dots + e_n^2] \end{aligned} \quad (\text{V.25})$$

La dérivée deviant

$$\begin{aligned} \frac{dv_n}{dx} &= \frac{dv_1}{dx} + \dots + e_n \cdot \frac{de_n}{dx} \\ \frac{dv_n}{dx} &= -k_1 e_1^2 + \dots + e_n \left[f_n(x_1, \dots, x_n) + g_0(x_1, \dots, x_n)u - \frac{d\alpha_{n-1}}{dx} \right]. \end{aligned} \quad (\text{V.26})$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande réelle u qui permet

d'atteindre les objectifs de conception pour le système global qui contrairement aux lois x_i qui sont des lois virtuelles. Un bon choix de celle-ci doit satisfaire :

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_n(x_1, \dots, x_n) - \frac{d\alpha_{n-1}}{dx} = -k_n \cdot e_n^2 \quad (\text{V.27})$$

$$k_2 \succ 0$$

Où est un paramètre de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_n(x_1, \dots, x_n)} \left[-k_n \cdot e_n + \frac{d\alpha_{n-1}}{dx} - f_n(x_1, \dots, x_n) \right] \quad (\text{V.28})$$

Ce qui garanti la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov augmentée

$$\frac{dv_n}{dx} = -k_1 e_1^2 - \dots - k_n e_n^2 \leq 0 \quad (\text{V.29})$$

Nous avons ainsi défini la méthodologie de la commande backstepping que nous allons mettre en application sur la MADA

V.6. Application de la commande de backstepping sur la MADA

Dans cette dernière partie nous allons nous consacrer sur l'application de la méthode du backstepping à la GADA et nous établirons les expressions de valeur de commande en s'appuyant sur le modèle qui a été calculé par le principe d'orientation du flux statorique.

V.6.1. Pour la commande indirecte sans boucle de puissance

Les premières variables d'erreur de poursuite du système sont définies par :

$$e_1 = i_{rq}^* - i_{rq} \quad (\text{V.30})$$

$$e_2 = i_{rd}^* - i_{rd} \quad (\text{V.31})$$

Leur dérivée devient

$$\frac{de_1}{dx} = \frac{di_{rq}^*}{dx} - \frac{di_{rq}}{dx} \quad (\text{V.32})$$

$$\frac{de_2}{dx} = \frac{di_{rd}^*}{dx} - \frac{di_{rd}}{dx} \quad (\text{V.33})$$

Avec la fonction Lyapunov

$$v = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (\text{V.34})$$

Sa dérivée est

$$\frac{dv}{dx} = e_1 \cdot \frac{de_1}{dx} + e_2 \cdot \frac{de_2}{dx} \quad (\text{V.35})$$

En remplaçant la dernière expression

$$\frac{dv}{dx} = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \quad (\text{V.36})$$

$$\frac{de_1}{dx} = \frac{di_{rq}^*}{dx} - \frac{1}{\delta L_r} (v_{rq} - R_r i_{rq}) = -k_1 e_1 \quad (\text{V.37})$$

$$\frac{de_2}{dx} = \frac{di_{rd}^*}{dx} - \frac{1}{\delta L_r} (v_{rd} - R_r i_{rd}) = -k_2 e_2 \quad (\text{V.38})$$

Avec $k_1 = k_2 = 100000$.

$$v_{dr} = \left[\left(\frac{di_{rd}^*}{dx} + k_2 e_2 \right) \cdot \delta \cdot L_r \right] + R_r \cdot i_{dr} \quad (\text{V.39})$$

$$v_{qr} = \left[\left(\frac{di_{rq}^*}{dx} + k_1 e_1 \right) \cdot \delta \cdot L_r \right] + R_r \cdot i_{qr} \quad (\text{V.40})$$

Le schéma bloc de la commande par backstepping est illustré par la figure ci-dessous

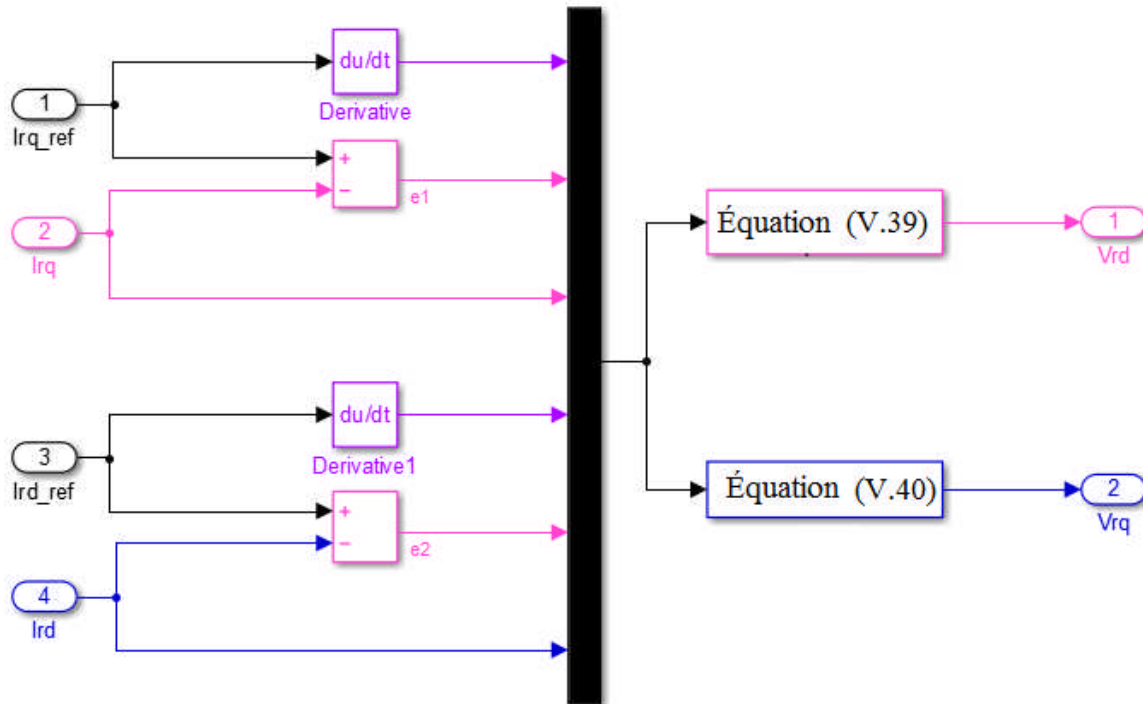


Figure V.2 : Schéma bloc de la commande non linéaire de backstepping.

V.7. Résultat de simulation de la commande des puissances

Pour évaluer les performances de la commande directe des puissances munit de la méthode du backstepping. Nous avons procédé à une teste de simulations sous environnement MATLAB /Simulink.

Les signaux suivent bien leur trajectoire de référence, sans dépassement des puissances active et réactive et sans erreur statique en régime permanent.

Les figures (V.3) et (V.4) montrent les allures de la puissance active et réactive avec leurs références respectivement. Elles nous ont permit de confirmé les grandes performances et la bonne poursuite des allures de puissance (active et réactive).

A partir de la figure (V.5), nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature nulle, ceci confirme le découplage parfait entre le flux et couple.

Les figures (V.6) et (V.7) montrent les courants rotorique suivant l'axe (d) et (q) respectivement on constate que ces courants suivent leurs référence avec succès. Le courant rotorique suivant l'axe (d) est l'image de la puissance réactive et le courant rotorique suivant l'axe (q) idem pour lui par rapport à la puissance active et du couple électromagnétique présenté sur figure (V.8)

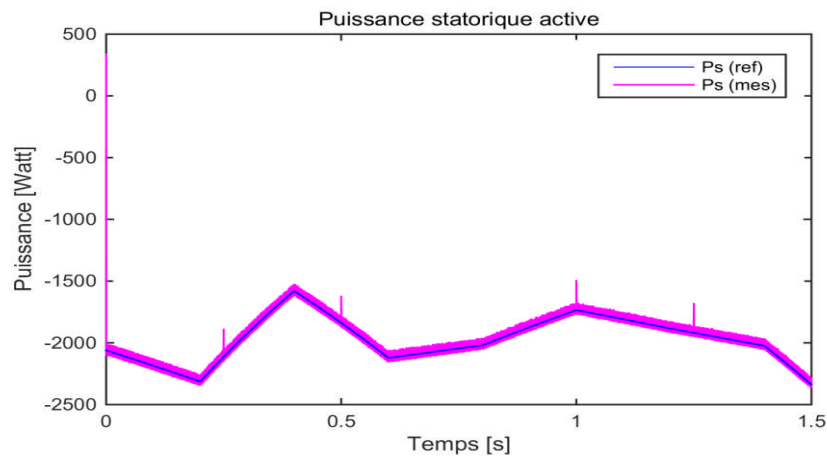


Figure V.3 : La puissance active statorique pour la commande de backstepping.

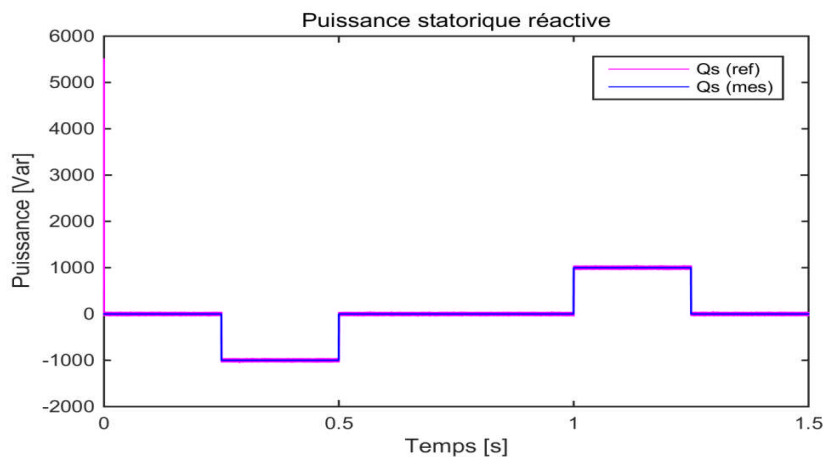


Figure V.4 : La puissance réactive statorique pour la commande de backstepping.

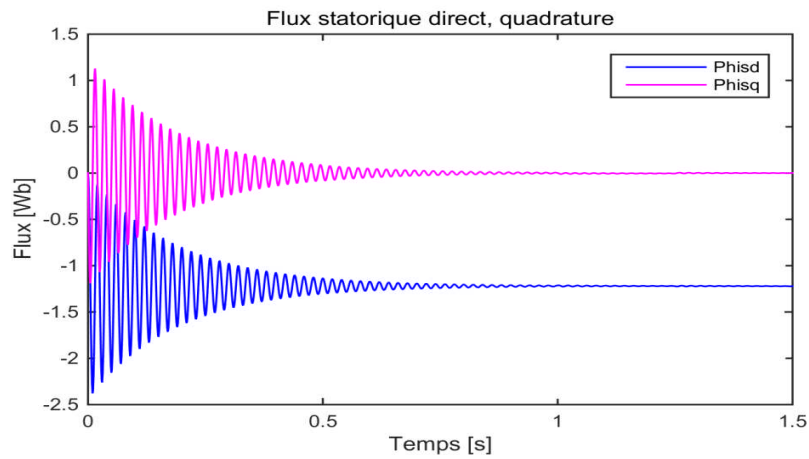


Figure V.5 : Le flux statorique selon l'axe d et q la commande de backstepping.

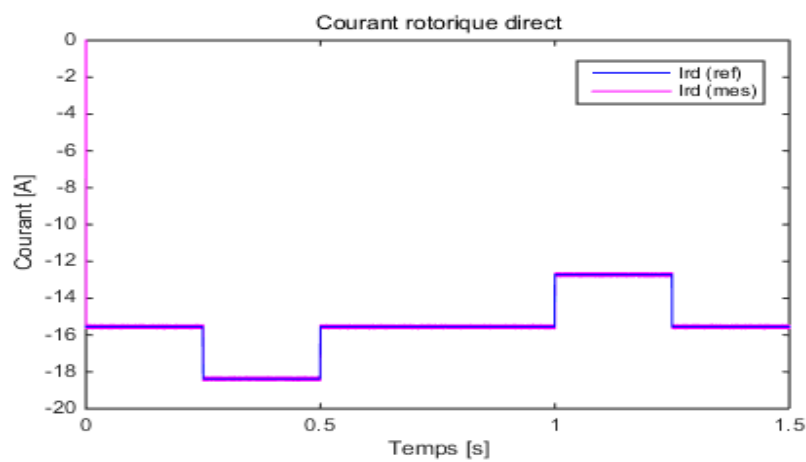


Figure V.6 : Le courant rotorique selon l'axe d pour la commande de backstepping.

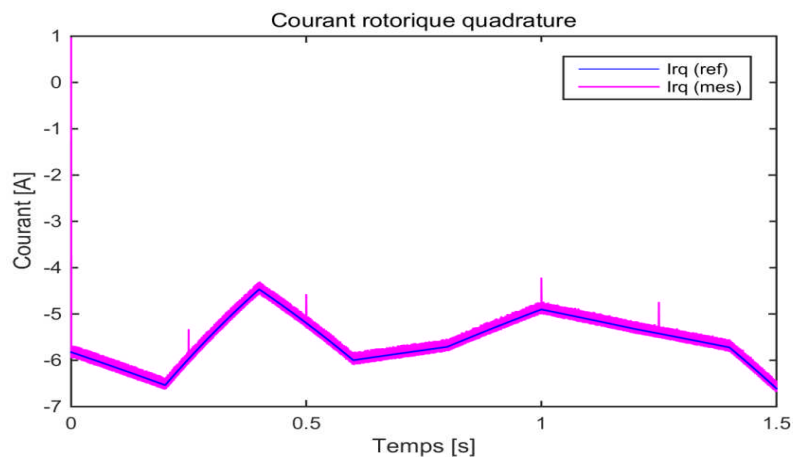


Figure V.7 : Le courant rotorique selon l'axe q pour la commande de backstepping.

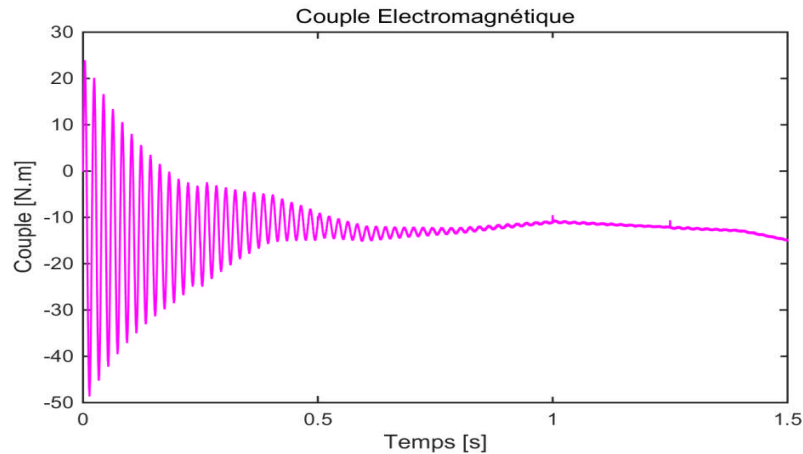


Figure V.8 : Couple électromagnétique pour la commande de backstepping.

V.8. Conclusion

Notre étude s'est basée sur l'application d'une commande non linéaire appelée commande de backstepping pour étudier les performances de la (MADA). La stratégie élaborée présentée dans ce chapitre commença par la présentation brève de la théorie de backstepping utilisant la méthode de Lyapunov. Les performances obtenues sont montrées par des résultats de simulation.

En effet, les résultats de simulation obtenus lors de l'application de la commande backstepping sur le système entraîné à vitesse variable, avec onduleur, montrent une bonne poursuite des puissances générées aux valeurs de références correspondantes. Aussi, nous avons constaté que les erreurs de poursuite sont relativement faibles et le découplage entre les puissances active et réactive est toujours maintenu.

De plus, une garantie d'utilisation de la MADA est assurée au vu des performances obtenues et affichées aux niveaux de la fiabilité et de la stabilité.

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème étude et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice asynchrone. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou la charge à alimenter. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies de commande nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

L'étude aérodynamique donnant les bases théoriques justifiant le rôle de la MADA par son fonctionnement à la vitesse variable

Dans le but de protéger le bobinage de la machine et après l'établissement de plusieurs modes de contrôles on a fait appel à la structure de commande indirecte sans boucle de puissance de par sa robustesse et sa capacité de limiter les courants rotoriques.

L'élaboration d'un certain type de commande nous a permis d'utiliser la vitesse du vent pour de commande de la MADA. Une commande de la turbine MPPT, de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent, afin d'extraire le maximum d'énergie.

On a pu constater que la MADA fonctionnait d'une efficace dans les conditions auxquelles nous avons soumise. Qui prouve la viabilité de son application dans le système éolien.

Nous avons élaboré des stratégies de commande et des perspectives intéressantes permettant d'atteindre plusieurs objectifs concernant la puissance active et la puissance réactive qui nous a permis non seulement d'obtenir un moyen de production d'énergie avec un rendement impeccable. Mais aussi un outil améliorant et contribuant à la qualité d'énergie du réseau.

Références Bibliographiques

- [1] Lavoisier, *Premier principe des lois de la thermodynamique*. 1777.
- [2] A. Aimexe, "Énergies renouvelables et Droit international de l'environnement: enjeux et perspectives," Université de Limoges, 2010.
- [3] C. Jean-Claude and Fayard, "Les énergies nouvelles," Lomé, 1989.
- [4] M. Mohammed and A. B. Saïd, "Étude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret." Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, Tlemcen, 20-Oct-2014.
- [5] M. A. HACHED, "Revue algérienne de l'énergie," *ISSN 2437 - 0479*, no. 05, juin/juillet 2016.
- [6] "le leader de l'éolien en France," 92930 Paris La défense Cedex, Nov-2013.
- [7] B. Kelkoul, "Étude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation," Université de TLEMCEM, Tlemcen, 2011.
- [8] F. Poitiers, "Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau," Université de Nantes, 2003.
- [9] T. Y. MOUSSAOUI and M. HADA, "Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne," Université d'EL-Oued, 2015.
- [10] C. N, "conversion d'énergie produite par des Générateurs éoliens," thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine.
- [11] M. S, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une mada," thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'alger, 2009.
- [12]. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>"Site Internet"
- [13] S. A. Moussa and N. I. Soumana, "Étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne," thèse d'ingénieur, École supérieure polytechnique. Spécialité Electrotechnique, Algérie, 2007.
- [14] R. Redjem, "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [15] R. Drareni and Z. Ouahrani, "Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC," École nationale supérieure polytechnique, Algérie, 2009.
- [16] B. Belabbas, "Intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique local," Université Ibn khaldoun, Tiaret, 2012.
- [17] Y. A. Bencherif, "Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne," thèse d'ingénieur, École nationale supérieure polytechnique, Département du Génie Électrique, 2008.
- [18] B. A, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne."
- [19] S. M, "Étude du générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne," Université El-Harrach, Algérie, 2007.
- [20] K. L, "Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique à double alimentation," thèse de Magister, Université de Batna, 2007.
- [21] K. E. kheil S, "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)," thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique, TOULOUSE, 2006.
- [22] A. N, "Stabilité dynamique des systèmes électrique multimachines: Modélisation, commande, observation et simulation," thèse de Doctorat, l'école doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Lyon, 2008.
- [23] C. J.P and H. J.P, "Modélisation et commande de la machine asynchrone," Paris, 1995.
- [24] I. K, "Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone," LYON, 2008.
- [25] S. E. Gholipour, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques," thèse de Doctorat, l'université Henri poincaré, Nancy-I, 2003.
- [26] B. N, S. K, and M. M. S, "Commande de la machine asynchrone par orientation du flux sttorique," juin-2005.
- [27] S. H, B. A, and B. R, "Développement des performances des systèmes Énergétiques dans la production d'Énergie Eolienne," *Energ. Renouvelable*, 1999.

- [28] M. A, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une aéroturbine," de saint-Jérôme, MARSEILL.
- [29] M. A, "Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone," thèse de Doctorat, Québec, 2007.
- [30] A. T and B. E.M, "Etude et réalisation d'un onduleur à trois niveaux commandé par MLI vectorielle," Ecole Nationale Polytechnique, Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algérie, 2011.
- [31] S. D. Subhransu, P. P, and P. S, "Performance Analysis of Multilevel Inverters Using Variable Switching Frequency Carrier Based PWM Techniques," International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela (Spain), 2012.
- [32] C. A., J. , S., and A. S. A., "Development of a new mixed 5-level inverter for 3 kW household photovoltaic applications," Bilbao (Spain), 2013.
- [33] S. S. and B. C. R., "Embedded Controller Based Multilevel Inverter Topologies," Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)," vol. 3. 2014.
- [34] B. M, "Etude d'un compensateur statique pour éoliennes à vitesse fixe à base de génératrice asynchrone à cage," Mémoire de Maitrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2010.
- [35] I. K. A. S. Morse and K. P. V, "Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36(11)," 1991.
- [36] I. K. R. Marino and K. P. V., "An extended direct scheme for robust adaptive nonlinear control. Automatica, vol. 27, pp 247-255," 1991.
- [37] K. P.V and Krstic, "Transient-performance improvement with a new class of adaptive controllers. Systems and Control Letters, vol. 21, pp 451-46," 1993.
- [38] K.] P.V., K. M, and K. I, "Adaptive nonlinear control without overparametrization. Published in Systems and Control Letters, vol. 19, pp 177-185," 1992.
- [39] M. LOUCIF, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur," Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –, Tlemcen, 2016.
- [40] B. Kh. and G. L, "Adaptive backstepping and pid optimized by genetic algorithm in control of chaotic systems," *Int. J. Innov. Computing Inf. Control IJICIC Int.*, vol. 7, no. 9, pp. 5299–5312, 2011.
- [41] . Tsiniias J, "Sufficient Lyapunov-like conditions for stabilization."
- [42] S. H. J and P. K. V, *A positive real condition for global stabilization of nonlinear systems*, vol. 13. 1989.
- [43] E. M., "Modélisation, Observation et Commande: Une approche multimodèle. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat," Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès-Tunisie et Université de Caen Basse-Normandie, France, 2011.
- [44] K. Miroslav and V. K. and Petar, *Adaptive Nonlinear Output-Feedback Schemes with Marino-Tomei Controller*, vol. 41. 1996.
- [45] R. ROUABHI, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée," doctoral, Université de Batna 2, 2016.
- [46] Kh. Benmahammed L. Guessas. Adaptive backstepping and pid optimized by genetic algorithm in control of chaotic systems. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control IJICIC International*, Vol. 7, No. 9, pp.5299-5312.2011.