

I.1 Introduction

Les applications industrielles des entraînements à vitesse variable exigent des performances de plus en plus importantes ainsi qu'une fiabilité maximale et un coût minimum. Historiquement, la machine à courant continu a été la reine dans le domaine de la variation de la vitesse, et son emploi est largement répandu même de nos jours, cependant elle ne peut servir dans les domaines de grandes puissances, ni aux milieux corrosifs, enfin le système balais collecteur nécessite un entretien permanent.

D'autres dispositifs ingénieux ont conduit au développement du moteur asynchrone à rotor bobiné comme le réglage rhéostatique de vitesse mais avec ses limites de plage de variation. C'est d'ailleurs ce type de machine un peu spéciale qui fait l'objet d'une application de vitesse variable pour un processus spécifique (tels les laminoirs, les bobineuses, les enrouleuses, la traction électrique,...). Dans le domaine des entraînements de grandes puissances, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier.

Il s'agit de la machine à double alimentation «Doubly Fed Asynchronous machine (DFAM)», le stator est alimenté par un réseau fixe et le rotor par alimentation variable qui peut être une source de tension ou une source de courant. [1]

I.2. Description de la machine à double alimentation

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

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut être alimentée les deux cotés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction [2].

I.3. Principe de fonctionnement

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor via une interface électronique, il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance.

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement P_r . Au lieu de dépenser la puissance rotorique en pertes Joule on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

Nous verrons dans les paragraphes suivants comment une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné peut être travaillée en génératrice ou moteur à vitesse variable en contrôlant l'écoulement de puissance entre le rotor et le réseau. Suivant les sens du transfert de puissance entre le rotor et le réseau et aussi entre celui-ci et le stator, la MADA devient ainsi génératrice ou moteur. De plus, grâce à ce mécanisme, sa vitesse de rotation peut être contrôlée [3].

I.4. Les différents modes de fonctionnement de la MADA

I.4.1. Moteur hypo-synchrone

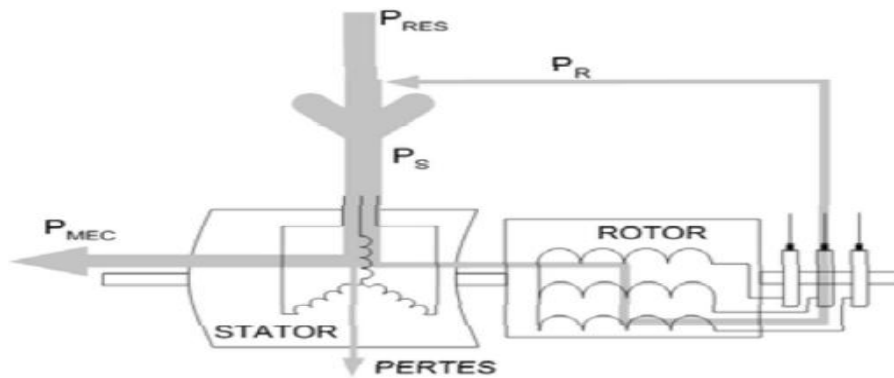


Fig.I.1: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [2].

I.4.2. Moteur hyper-synchrone

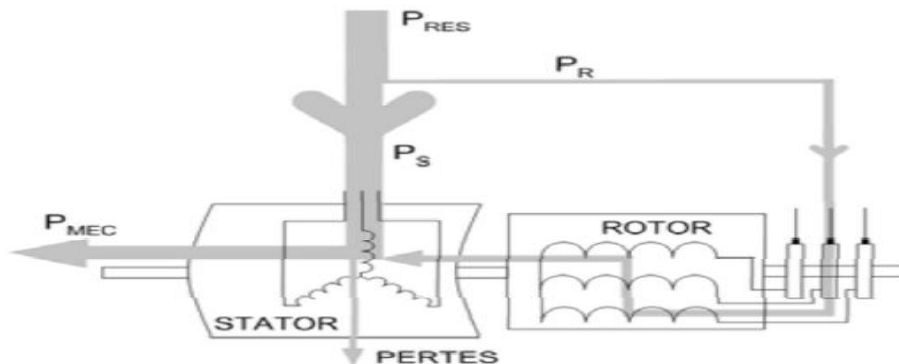


Fig.I.2: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement, et la somme se transmette en énergie mécanique. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique [2].

I.4.3. Génératrice en hypo-synchronisme

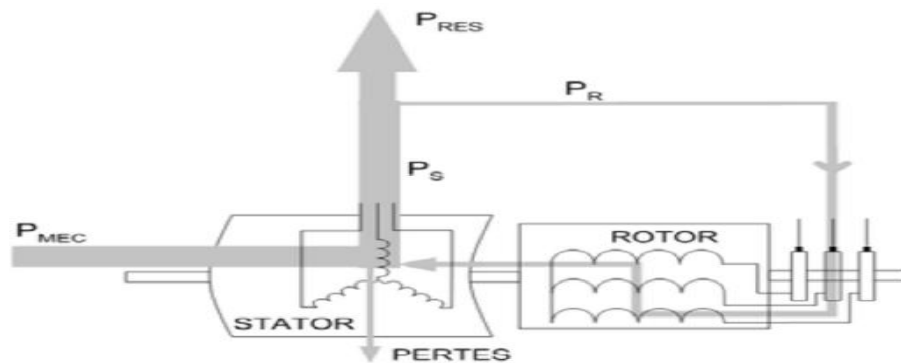


Fig.I.3: Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone.

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hypo-synchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hypo-synchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation.

Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor [2].

I.4.4. Génératrice hyper synchrone

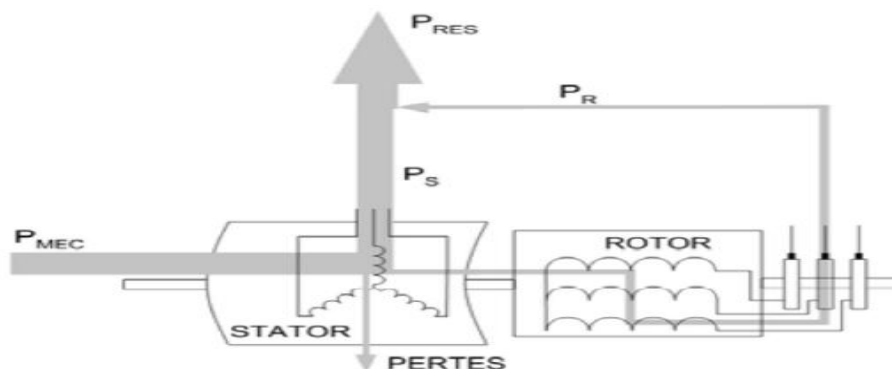


Fig.I.4: Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone.

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor [2].

I.5. Les structures du contrôle de la MADA en mode génératrice

I.5.1. Contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique

Le glissement peut être rendu variable par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans une résistance en utilisant un redresseur alimentant un hacheur commandé (figure I.5). Plus la pulsation rotorique est proche de la pulsation du synchronisme, plus la puissance extraite par le rotor est importante [10].

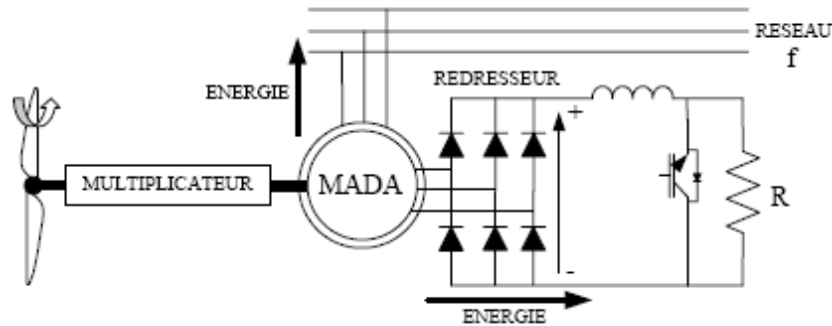


Fig. I.5: MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique

Vue la taille réduite de la résistance R (car située au circuit rotorique), cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse. Le fabricant des turbines éoliennes V_{estas} utilise cette topologie, sans bagues collectrices. Le convertisseur de puissance et la charge résistive sont assemblés sur le rotor et tournent avec lui. Le signal de commande du hacheur est transmis via un signal optique. L'inconvénient de ce principe est que la puissance dissipée dans la résistance diminue le rendement du système de conversion [10].

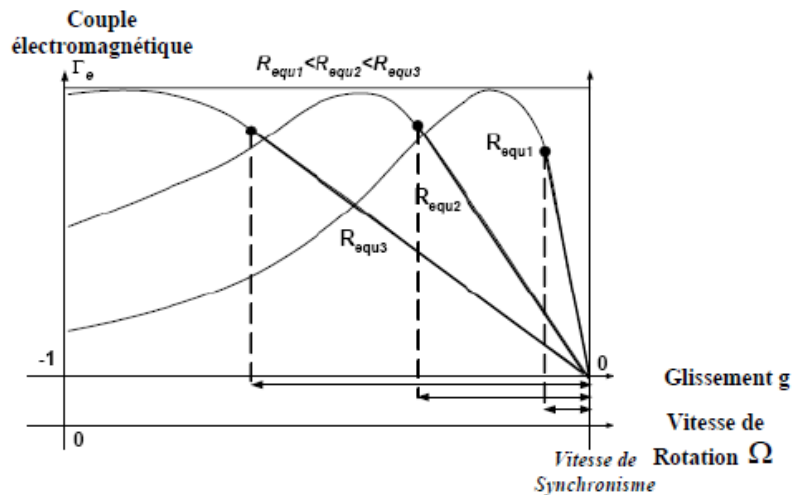


Fig. I.6: Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

I.5.2. Transfert de la puissance rotorique sur le réseau

Au lieu de dissiper la puissance disponible au rotor par effet Joule, on peut récupérer cette puissance en la renvoyant sur le réseau électrique. Ceci améliore le rendement du système. Dans le passé, on utilisait à cet effet des machines tournantes à courant continu ou alternatif (montages Kramer, Sherbius, Rimcoy, etc). De nos jours, on utilise, pour cette récupération, un système statique de conversion d'énergie constitué de convertisseurs de puissance ainsi qu'un transformateur. Le convertisseur est dimensionné pour transiter seulement la puissance rotorique, (soit environ 30% de la puissance nominale) pour obtenir un glissement maximal et donc la puissance statorique nominale. C'est un compromis qui mène à une meilleure capture de l'énergie éolienne et à une faible fluctuation de la puissance du côté du réseau.

Il faut noter que tous les éléments du circuit de récupération (courants du circuit rotorique) ne sont dimensionnés que pour gPs, donc, pour une puissance d'autant plus faible que le glissement maximum désiré est plus faible. Ce procédé est intéressant quand on peut se contenter d'une variation de vitesse réduite [6].

I.5.2.1-Pont à diodes et pont à thyristors

Une première structure pour l'alimentation électrique consiste à utiliser un pont à diodes et un pont à thyristors, cette structure est appelée « Montage de Kramer ». Les tensions entre bagues sont redressées par le pont à diodes, l'onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (figure I.7). Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau [10].

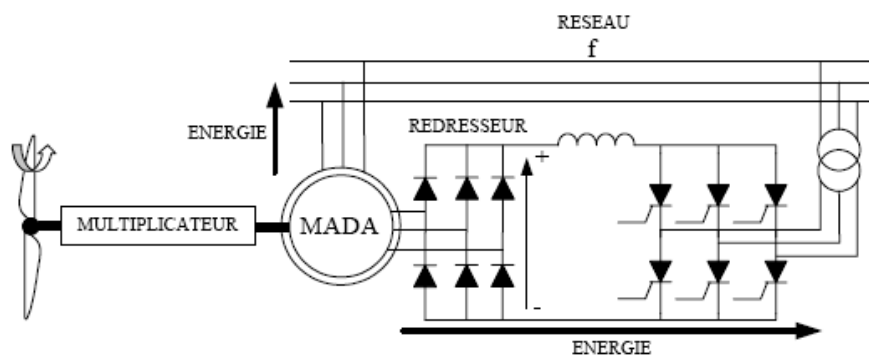


Fig. I.7 : MADA alimentée par un pont à diodes et thyristors

Inconvénients :

Cette structure d'alimentation ne permet pas l'asservissement électrique de la vitesse de la machine. De plus, l'onduleur triphasé utilisé pour cette structure injecte des courants harmoniques basses fréquences d'amplitude importante. Cette injection d'harmoniques multiples de 50Hz est préjudiciable pour la durée de vie des appareillages électriques raccordés sur le réseau. Pour éviter cet inconvénient, on utilise d'autres structures [10].

I.5.2.2- Pont à diodes et pont à transistors

La structure consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle constitués de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées et à modulation de largeur d'impulsion (MLI), constitués par des transistors de puissance (figure I.8). Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevée, n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences. Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive. Par contre, elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice étant donné l'utilisation d'un pont de diodes. Cette structure permet donc de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre. De plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie [10].

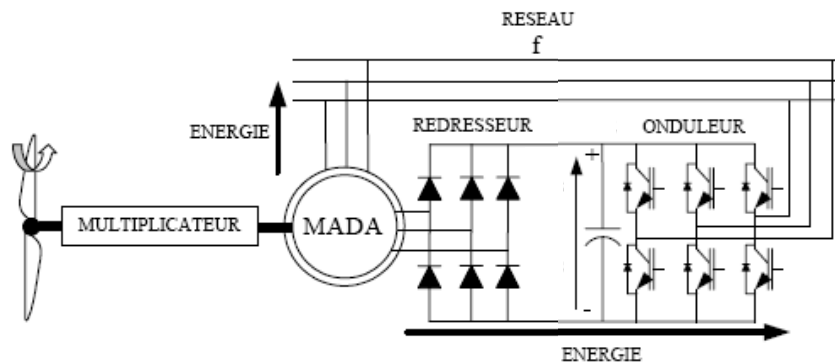


Fig.I.8: MADA alimentée par un pont à diodes et un onduleur MLI

I.5.2.3 - Cycloconvertisseur

Cette configuration possède les mêmes caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans les deux sens. Cette topologie, présente donc plus de marge de manœuvre pour la commande (figure I.9).

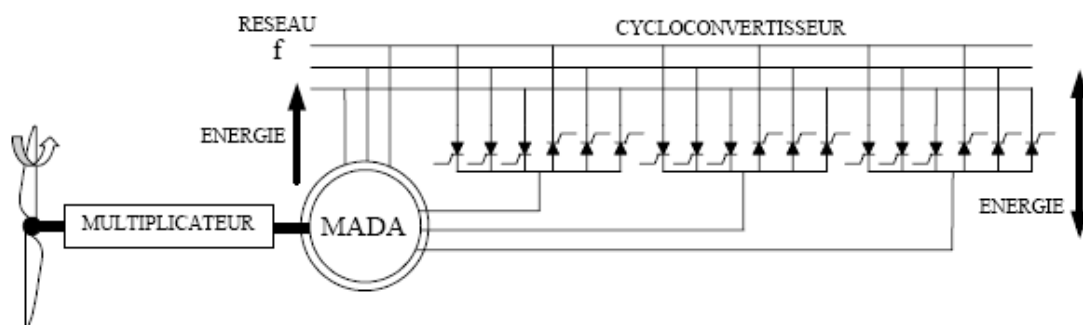


Fig. I.9: MADA avec un contrôle bidirectionnel de la puissance rotorique récupérée

Ce montage est aussi connu sous la dénomination « topologie statique Sherbius ». Formellement, le principe de Sherbius est basé sur l'utilisation de machines tournantes au lieu des convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, le principe de Scherbius est reproduit à l'aide d'un cycloconvertisseur. Celui utilisé dans la figure ci-dessus est conçu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles. Ainsi, ceci permet l'utilisation de thyristors qui sont intéressants du

point de vue coût. Comme le flux de la puissance est bidirectionnel, il est possible d'augmenter ou de diminuer l'énergie de glissement et ainsi faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur.

Une telle structure a été utilisée pour une éolienne de 750kW dont la vitesse de la turbine varie entre 20 et 25tr/min, avec un convertisseur dimensionné pour 200kW [10].

I.5.2.4-Convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante (figure I.10) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables par modulation de largeur d'impulsions. 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.

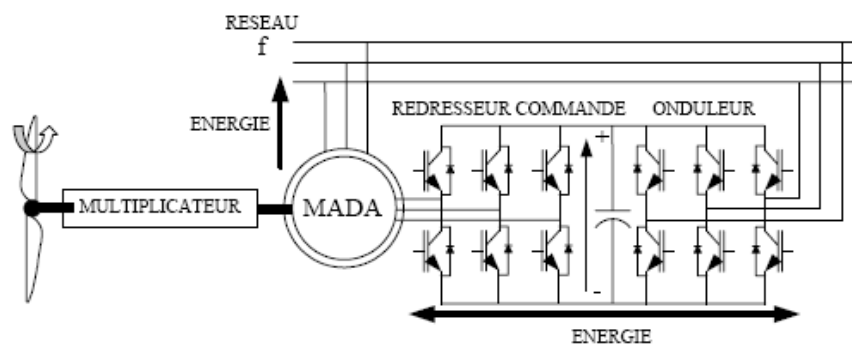


Fig. I.10: MADA alimentée par deux onduleurs à MLI

Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité[2].

I.5.2.5- Structure à trois convertisseurs MLI

On peut également disposer les convertisseurs à la fois au rotor et au stator, la structure est montrée sur la (figure I.11). Cette structure est intéressante car elle permet de contrôler le flux statorique. En effet suite aux variations du vent, la réponse du système en fonctionnement transitoire peut causer des variations significatives du flux statorique. Ceci provoque à la fois des oscillations mécaniques et électriques faiblement atténuées [10].

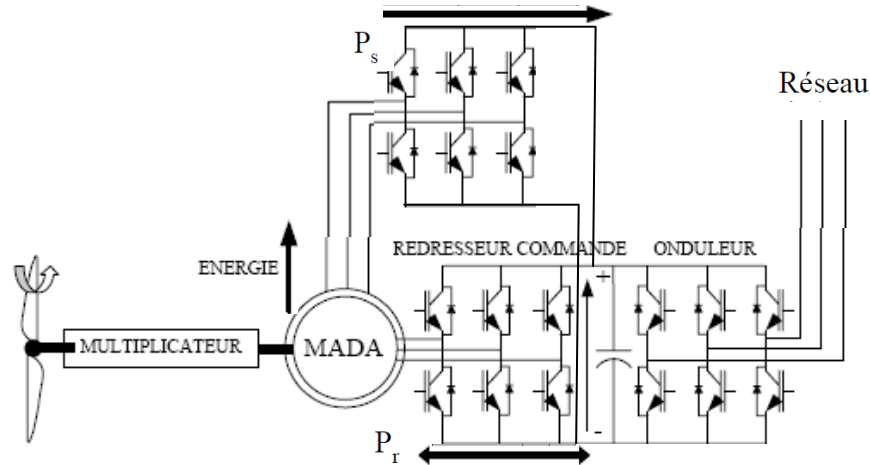


Fig. I.11 : Structure à haute performance (convertisseurs au stator et au rotor)

Les avantages de cette structure d'alimentation sont les suivants :

- Les convertisseurs disposés aux bornes du circuit rotorique et statorique permettent le contrôle de leur flux.
- Cette configuration présente une certaine insensibilité par rapport à des défauts provenant du réseau électrique (creux de tension). En effet, un découplage est réalisé avec le réseau entre les circuits rotoriques et statoriques par l'utilisation d'un bus continu intermédiaire.
- Elle offre deux degrés de libertés supplémentaires pour la commande des puissances transitées par le stator.

L'inconvénient majeur est l'utilisation de trois onduleurs dont un connecté au réseau de très forte puissance. Ils sont donc assez coûteux [5].

I.6. Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

I.6.1. Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer [5] :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [4].

- L'utilisation de la MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.
- 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 présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [2].
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [6].

I.6.2. Inconvénients de la MADA

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone, alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants [5] :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [1].
- Dans un milieu corrosif, les bagues peuvent s'oxyder et cela nécessite un entretien particulier.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [7].

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la MADA sous toutes ses configurations et les performances qui lui permettent d'occuper un large domaine d'application, soit dans les entraînements à vitesse variables (fonctionnement moteur), ou dans les applications à vitesse variable et à fréquence constante (fonctionnement générateur).