

I. GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENNES

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne.

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2. La production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pour tant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [01].

I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Pour convertir l'énergie disponible dans le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être composées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique sert à capter l'énergie cinétique disponible dans le vent et à la transformer en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique [02].

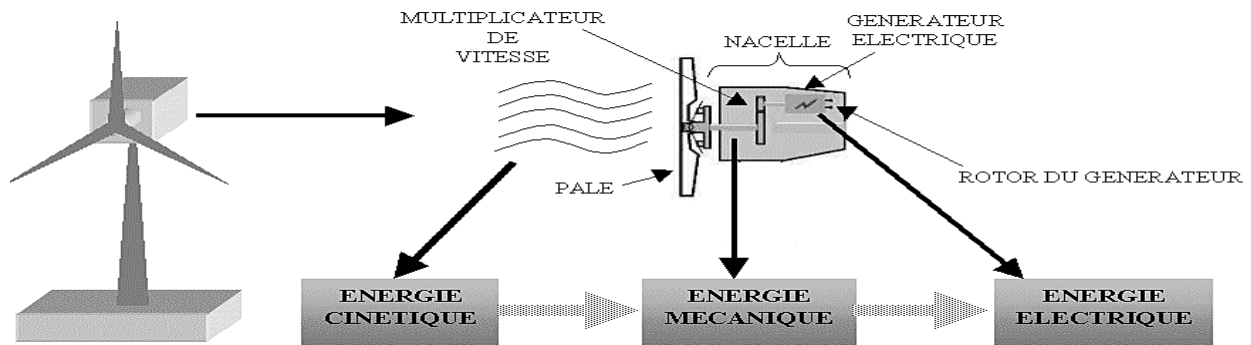


Figure I. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.4. La chaîne de transformation énergétique

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

I.4.1. La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion:

La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.4.2. L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

I.4.3. La production d'électricité par le générateur

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

I.4.4. Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur. L'électricité

est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [03].

I.5. Choix de type d'éoliennes

Aujourd'hui, la plupart des éoliennes commerciales raccordées au réseau actuelles sont à axe horizontal, car elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au sol. le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. D'ailleurs dans la suite de ce bibliographe ne seront étudiées que les éoliennes à axe horizontal [04].

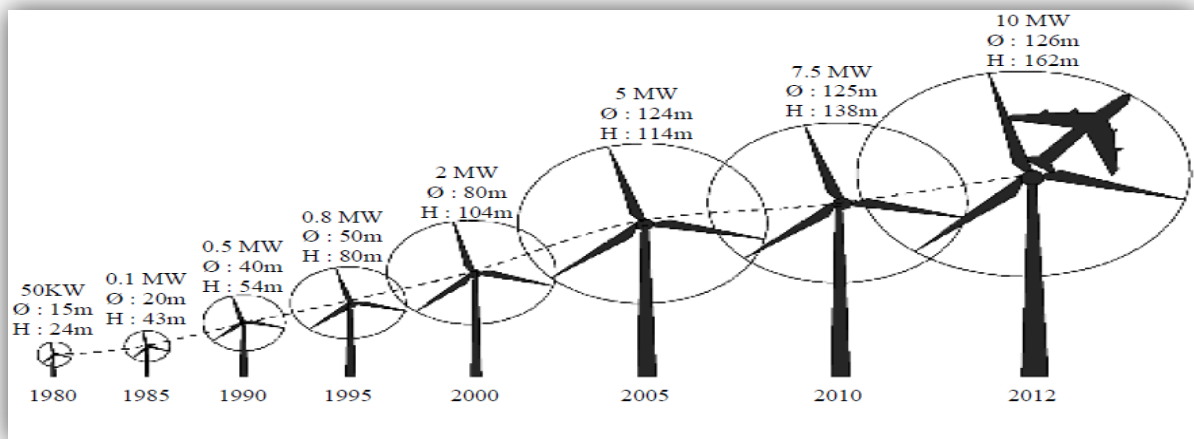


Figure I. 2 : Correspondance taille-puissance des éoliennes

ECHELLE	DIMÉTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
PETITE	moins de 12 m	moins de 40 kw
MOYENNE	12 m à 45 m	De 40 kw à 1 Mw
GRANDE	46 m et plus	1 Mw et plus

Tableaux I.1 : Classification des turbines éoliennes

I.6. avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.6.1. Avantages

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [05].
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du Co2 [06].
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [07].
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.6.2. Inconvénients

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs, .D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines.
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire.

I.7. Classification des éoliennes

On peut classer les générateurs éoliens selon les différents critères. Ces derniers peuvent alors se classer selon.

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc....).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).

I.7.1. Différents types d'éolienne et leurs utilisations

L'organe capteur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique afin de réaliser la conversion électromécanique tant que le mouvement est rotatif, les capteurs alors seront classés selon deux catégories, [08] :

- ◆ Capteurs à axe horizontal.
- ◆ Capteurs à axe vertical.

I.7.1.1. Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche , certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal .



Figure I. 3 : Les éoliennes à axe vertical

I.7.1.1.1. Les type d'éoliennes à axe vertical

I.7.1.1.1. a. Rotor de Darrieus

Est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet [09].

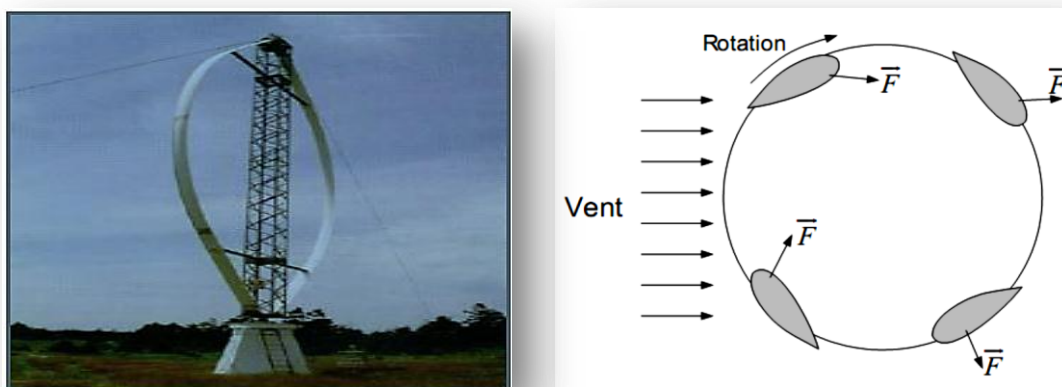


Figure I. 4 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus

I.7.1.1.1.b. Rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.



Figure I. 5 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius

I.7.1.1.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical

+ Les avantages

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.
- Construction souvent simple.
- Faible bruit.

+ Les inconvénients

Les inconvénients principaux d'une éolienne axe vertical sont :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement (Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s) [09].

I.7.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles

démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est 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 [10].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent .



Figure I. 6 : Eoliennes à axe horizontal

I.7.1.2.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal

I.7.1.2.1.a. Eoliennes lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [11].

I.7.1.2.1.b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs)

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

✚ **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

✚ **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

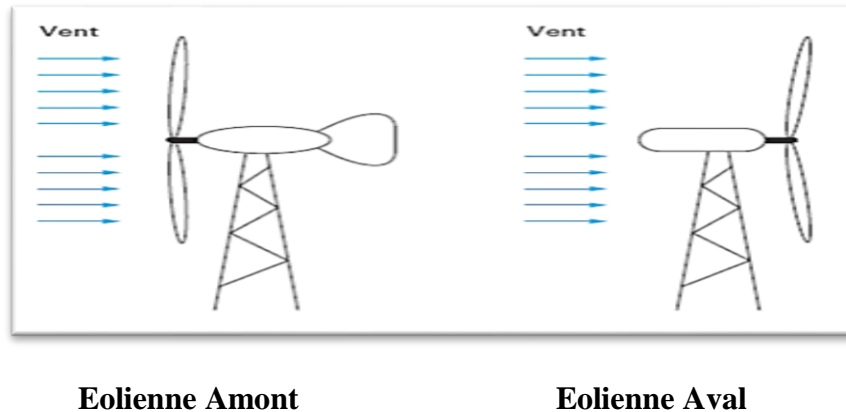


Figure I. 7 : Configuration à axe horizontal

I.7.1.2.2.principaux composants d'une éolienne

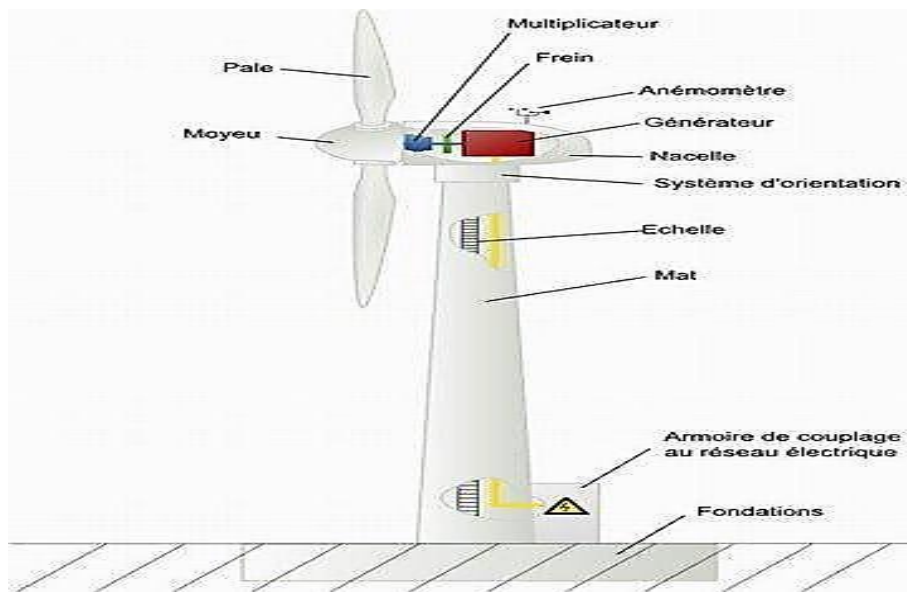


Figure I. 8 : principaux composants d'une éolienne

I.7.1.2.2.a.Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

I.7.1.2.2.b.La nacelle

Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande.

✚ Un multiplicateur

Adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

✚ Le système de refroidissement

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

✚ La génératrice (ou l'alternateur)

Pour transformée l'énergie mécanique en énergie électrique.

Anémomètre

Sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

Le système de contrôle-commande

Comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

I.7.1.2.2.c. Une armoire de commande

Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

I.7.1.2.2.d. Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.7.2. La Vitesse de rotor

I.7.2.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

Avantage et Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

❖ Avantages

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Pas besoin de système électronique.
- Plus fiable (moins d'entretien).

❖ Inconvénients

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transmise au réseau.
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

I.7.2.2.Fonctionnement à vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. à partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent [12].

+ Avantages et Inconvénients**❖ Avantage**

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité.
- Réduction des bruits acoustiques.

❖ Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

I.7.3. Les générateurs utilisés dans le SCE

I.7.3.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.7.3.1.1. Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE)

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.

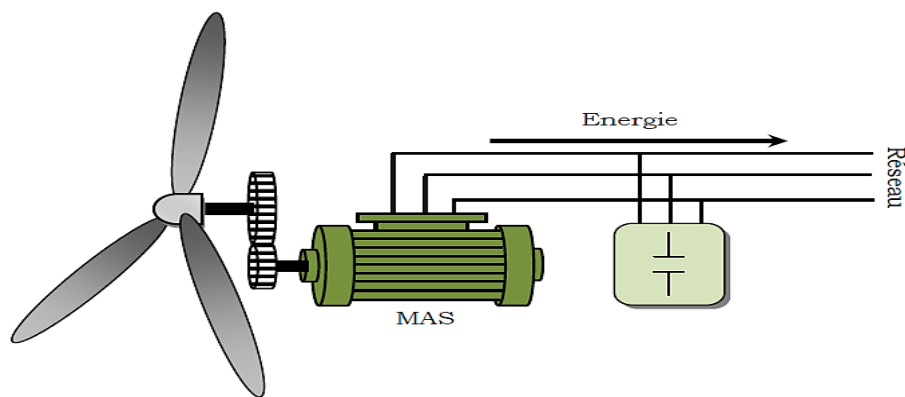


Figure I. 9 : Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

I.7.3.1.2. Générateur asynchrone à double stator

Cas deux enroulements statorique, l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage. Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend la sa conception difficile ainsi que son cout de revient est trop important.[13]

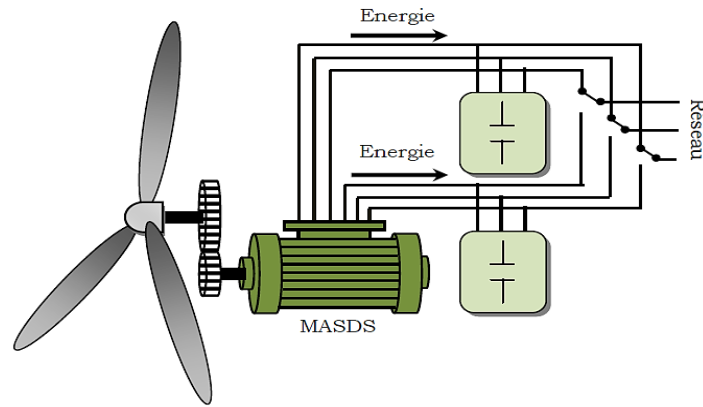


Figure I. 10 : Générateur asynchrone à double stator

I.7.3.1.3. MACE connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance

Le système permet un fonctionnement à vitesse variable , quelle que soit la vitesse du vent on aura une tension à fréquence fixe ,en effet la tension produite sera redressée et transformée en tension continue, Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire.

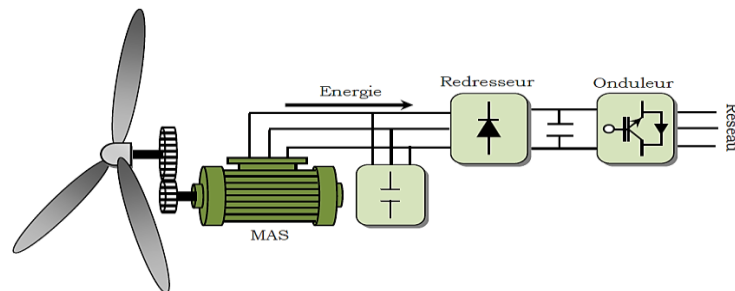


Figure I. 11 : Connexion indirecte d'une machine asynchrone réseau

Elle est constituée par un rotor à cage et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel.

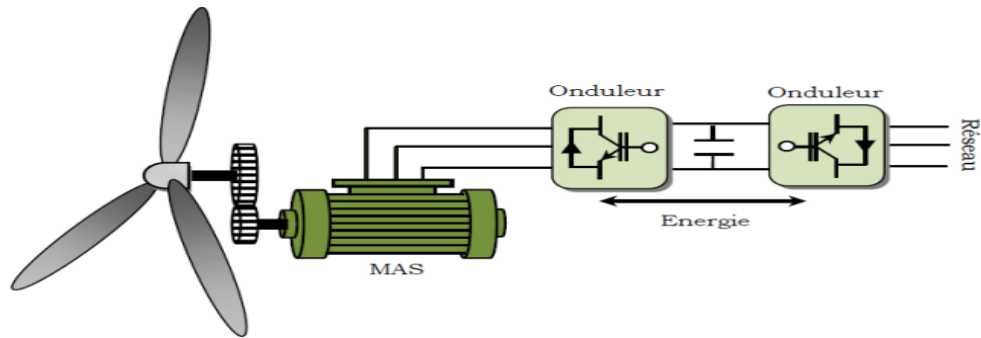


Figure I. 12 : Générateur asynchrone connectée au réseau par deux onduleurs

I.7.3.1.4. Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution.

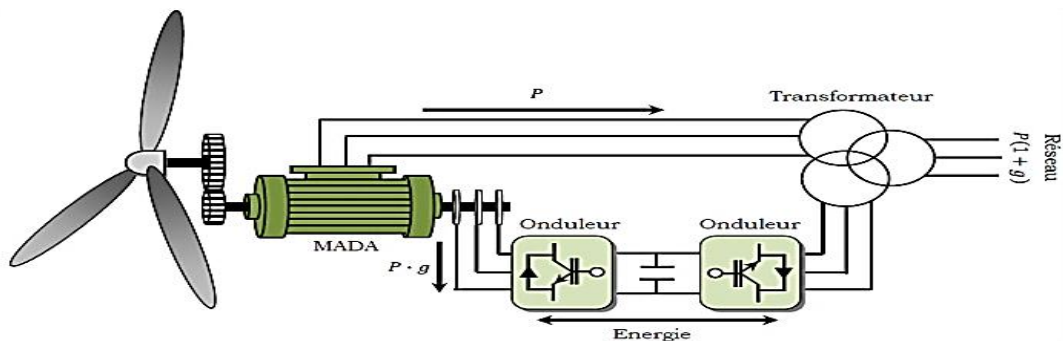


Figure I. 13 : schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

I.7.3.2. Systèmes utilisant la machine synchrone

Les génératrices synchrones utilisées dans le domaine éolien sont plus chères que les génératrices à induction de même taille.

Ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéro-générateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aéro-générateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.[14]

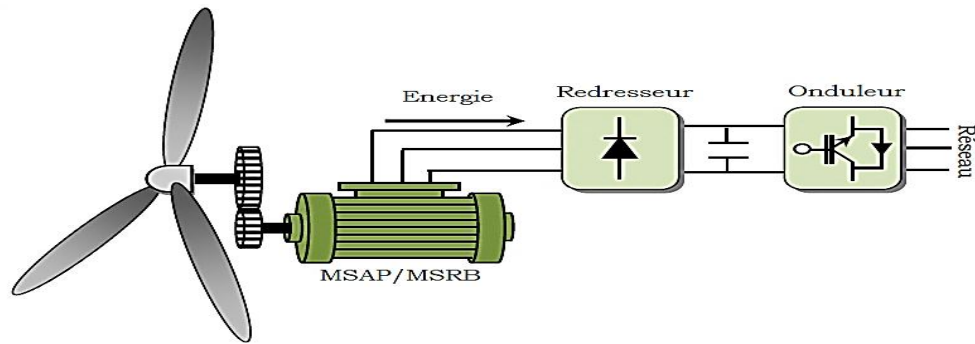


Figure I. 14 : système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable

I.7.4. Autres Architectures

On observe actuellement l'émergence d'architectures particulières qui dérivent des génératrices classiques (synchrone ou asynchrone). Parmi ces nouvelles architectures, on pourra citer la génératrice asynchrone à double alimentation en cascade, la génératrice asynchrone à cage à double alimentation statorique, génératrice asynchrone a doublé alimentation en cascade avec l'un de deux machines à double étoile, la génératrice synchrone à aimants permanents discoïdes et la génératrice à réluctance variable.

I.8. éolienne à machine asynchrone à double alimentation

I.8.1. Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écurieul coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne.

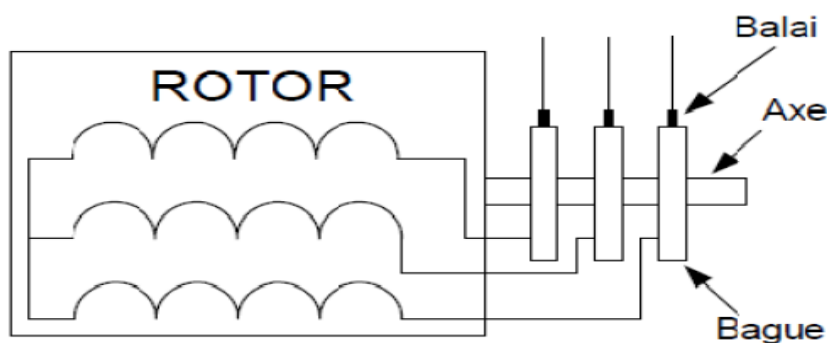


Figure I. 15 : Structure du rotor de la MADA

I.7.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statorique tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$ et le rotor tourne avec la vitesse ω_r , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \quad (I.1)$$

Où : g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement. Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.[15]

Pour que la rotation du vecteur résultant des f_{mms} par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_{gl} = 2 \cdot \pi \cdot f_r$ c'est-à-dire :

$$f_r = g f_s \quad (I.2)$$

I.7.3. Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants (Figure. I.15). C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur.

Mode moteur hypo-synchrone

- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme,
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau

Mode moteur hyper-synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur,
- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.

- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator.

Mode génératrice hypo-synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La turbine fournit une puissance mécanique P_m à la machine.
- une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor

Mode génératrice hyper-synchrone :

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La totalité de la puissance mécanique fournie e à la machine est transmise au réseau aux pertes près

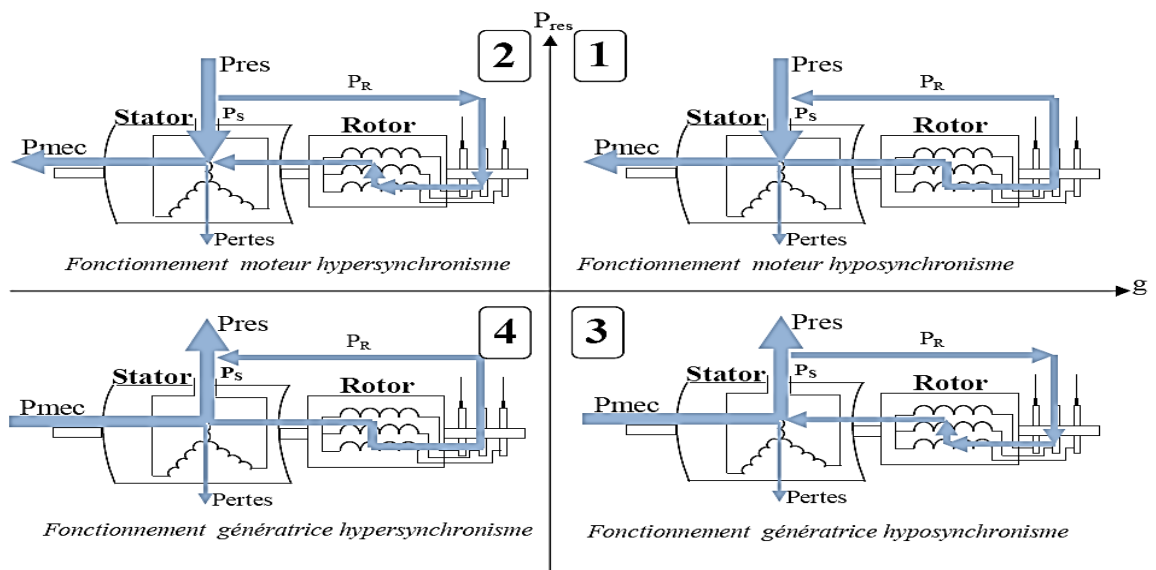


Figure I. 16 : Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation

I.8.4. Les différentes alimentations de la MADA

I.8.4.1. MADA avec pont à diodes et pont à thyristors

Cette structure, appelé montage K ramer, utilise un pont à diodes et un pont à thyristors [15]

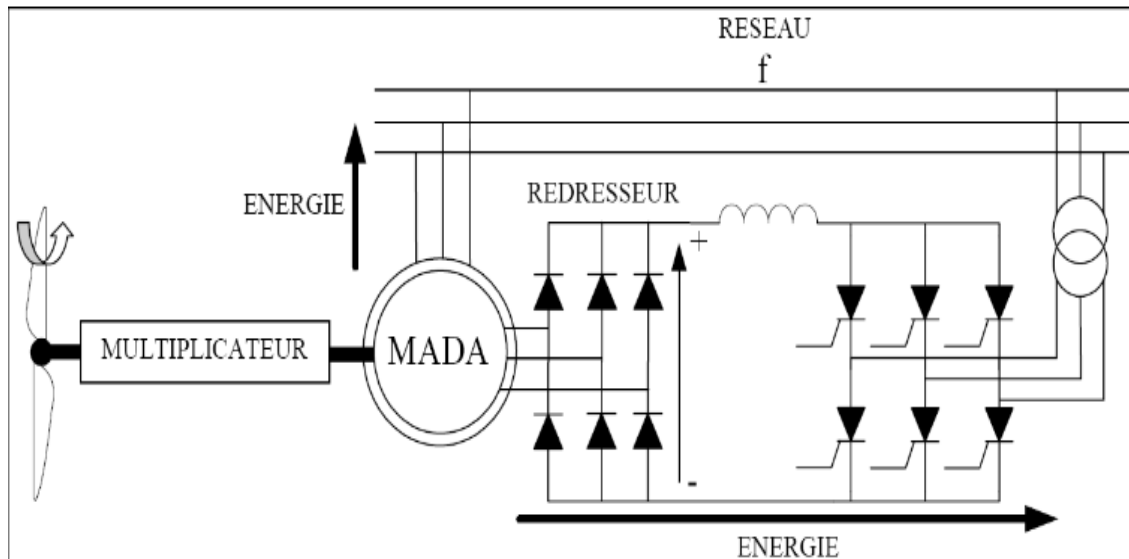


Figure I. 17 : MADA avec pont à diodes et pont à thyristors.

Les tensions entre les 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.

I.8.4.2. MADA avec pont à diodes et pont à transistors

Dans cette structure, on remplace les onduleurs à commutation naturelle à base de thyristors par des onduleurs à commutations forcées et à MLI ; constitués de transistors de puissance

I.8.4.3. MADA avec cyclo-convertisseur

- Structure autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau
- Cette structure est utilisée pour des valeurs de fréquence rotorique largement inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles.
- Elle permet l'utilisation de thyristors qui sont intéressants d'un point de vue coût

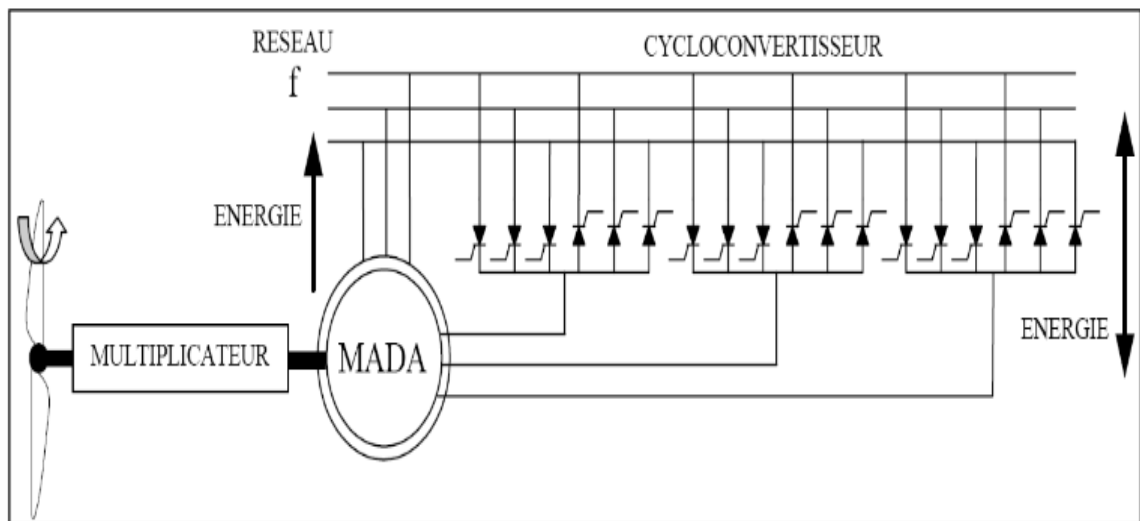


Figure I. 18 : MADA avec cyclo-convertisseur

I.8.4.4. MADA avec convertisseurs MLI

Cette structure utilise deux onduleurs de tension en cascades équipés d'IGBT et Connectés au travers d'un bus continu (Figure. I.19).

Les onduleurs sont commandés en MLI. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur :

- un contrôle du flux et de la vitesse de la MADA du côté de la machine
- un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau. [15]

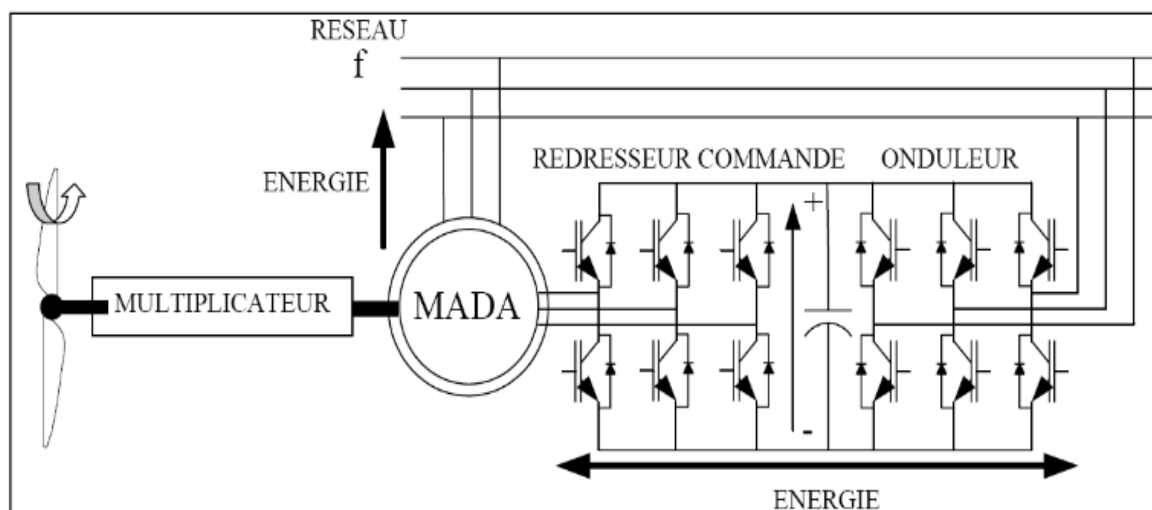


Figure I. 19 : MADA avec convertisseurs MLI

I.7.5. Avantages et inconvénients de la MADA

a. Avantage

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donne ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse et la récupération de la puissance de glissement la puissance nominale sans être surchauffée.
- Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés que pour une fraction de la puissance de la machine (30%) contrairement au système utilisant la machine asynchrone à cage d'écuréuil ou le convertisseur est dimensionné pour la totalité de la puissance de la machine.

b. Inconvénients

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause des balais.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.

I.9. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de jeter un coup d'œil sur les solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Plusieurs types de machines ont été présentées : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale.

Enfin, nous avons présenté le système éolien avec machine asynchrone à double alimentation qui étudie le principe de fonctionnement et les différentes alimentations de cette machine.

