

Chapitre 5**Topologies des systèmes éoliens**

- Etat de l'art des systèmes éoliens,
- Les différentes machines utilisées dans les systèmes de conversion éolienne
- Modélisation et simulation des machines électriques tournantes : MAS, MSAP, MADA, GRV,.....,
- Les convertisseurs utilisés dans les systèmes de conversion éolienne (modélisation et simulation) :
 - Convertisseur AC/DC,
 - Convertisseur DC/AC,
 - Convertisseurs DC/DC pour l'adaptation d'impédance,

Principe de raccordement de la chaîne éolienne au réseau électrique.

5.1 Etat de l'art sur la conversion électromécanique

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages et inconvénients de chaque configuration peuvent se résumer comme suit :

5.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Avantage:

Les avantages principaux de ce type :

- 1- système électrique plus simple.
- 2- moins cher.
- 3- pas besoin de système électronique.
- 4- plus fiable (moins d'entretien).

Inconvénients:

- 1- l'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- 2- difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- 3- présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

5.1.2 Fonctionnement à vitesse variable

Avantages principaux de ce type:

- 1- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- 2- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- 3- 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
- 4- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- 5- 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
- 6- Réduction des bruits acoustiques.

Inconvénients :

- 1- Utilisation de machines spéciales.
- 2- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- 3- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

- 4- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

5.2 Générateurs et topologies

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne dans cette section les topologies importantes et leurs caractéristiques principales.

5.2.1 Générateur synchrone

5.2.1.1 Générateur synchrone à rotor bobiné

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Les sites isolés ne sont pas donc adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante.

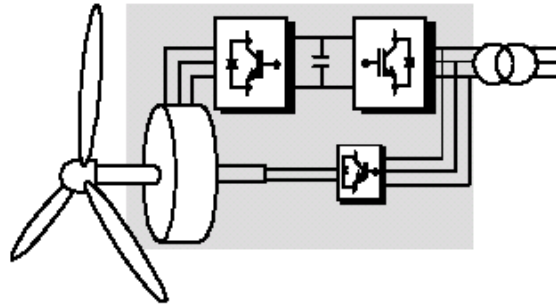


Figure 5-1: système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné et convertisseur MLI

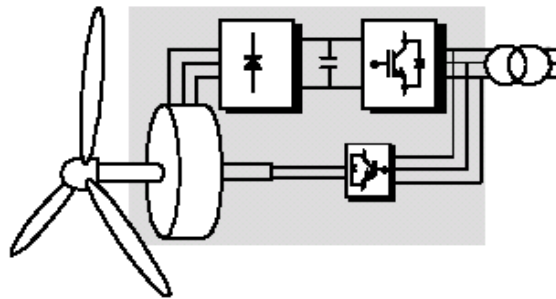


Figure 5-2 : système éolien basés sur la machine synchrone à rotor bobiné et redresseur à diodes

5.2.1.2 Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.

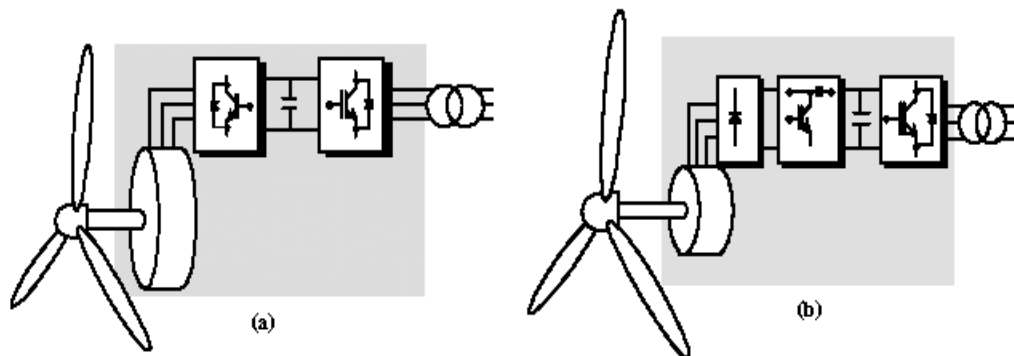


Figure 5-3 : systèmes éoliens basés sur la machine synchrone à aimants permanents [19]

(a) GSAP avec convertisseurs MLI

(b) GSAP avec redresseur, hacheur et convertisseur MLI

Dans la configuration de la GSAP de la figure (5.3-b), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. L'inconvénient de cette configuration est l'utilisation du redresseur, ce qui augmente l'amplitude du courant et la déformation de la tension. En conséquence, cette configuration a été considérée pour les petites puissances (inférieures à 50KW).

Dans la configuration de la figure (5-3 -a), un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal. Cependant, ces performances dépendent de la bonne connaissance des paramètres de la génératrice qui dépendent de la température et la fréquence. En choisissant judicieusement les paramètres du système représenté sur la figure (5.4), un système à vitesse « non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu.

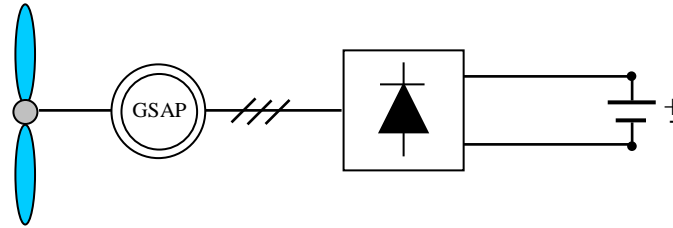


Figure 5-4 : Système éolien à coût minimum basé sur GSAP

5.2.2 Générateur asynchrone

La génératrice asynchrone à cage d'écurie équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde car elles offrent des performances attractives en termes de coût d'investissement, tout particulièrement dans les solutions de base où elles sont directement connectées au réseau. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure 5-5.

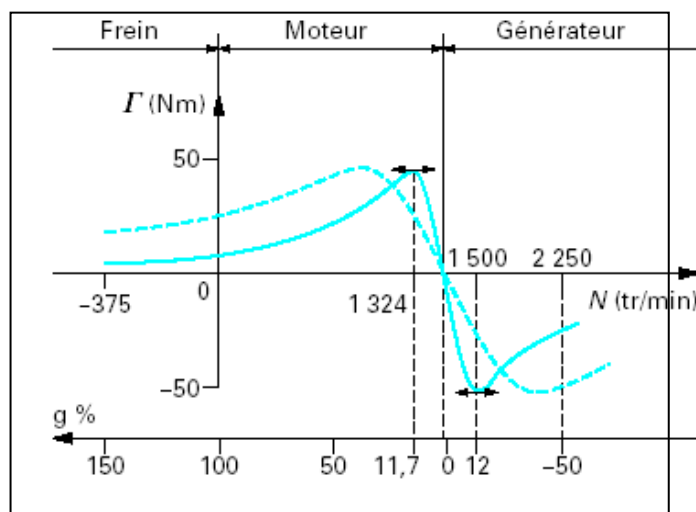


Figure 5-5 : Caractéristiques couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de grandes puissances avec pales importantes,

la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

5.2.2.1 GAS à cage connecté au réseau par l'intermédiaire de redresseur - onduleur

Le dispositif de base est représenté sur la figure (5-6). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est 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. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel.

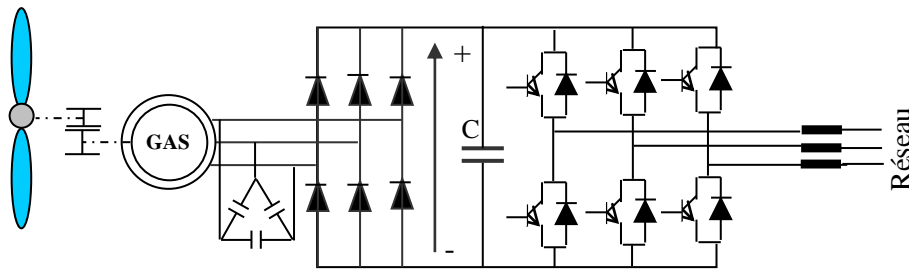


Figure 5-6 : GAS à cage connecté au réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

5.2.2.2 Générateur asynchrone à cage avec convertisseurs MLI

L'introduction de convertisseurs de puissance composés d'un redresseur MLI dont la structure (figure 5-7) est semblable à celle de l'onduleur entre la machine et le réseau, permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine, et de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre.

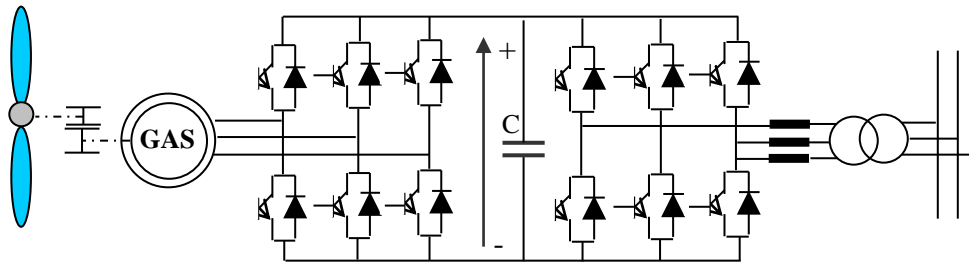


Figure 5-7 : Aérogénérateur asynchrone à cage avec convertisseurs MLI

5.2.2.3 Générateur asynchrone à cage connecté directement au réseau

La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique comme le montre la figure (5-8). La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (5-8) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

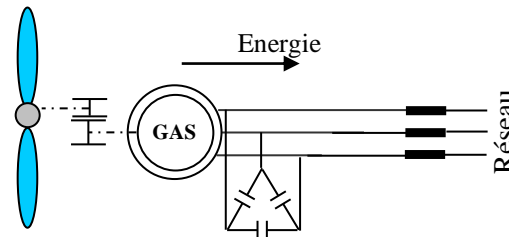


Figure 5-8 : système éolien basé sur GAS à cage connectée directement au réseau

5.2.2.4 Générateur asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator Figure (5-9).

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles est conçu pour les petites vitesses de vent. Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner à des vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

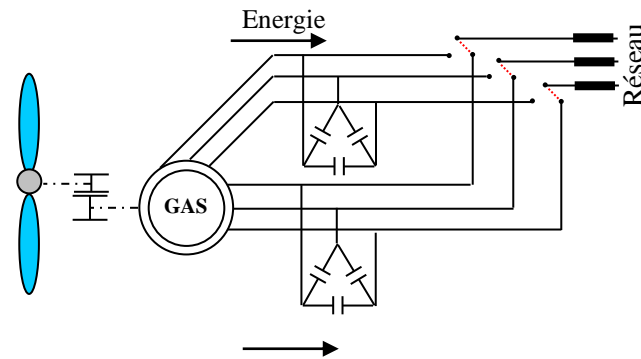


Figure 5-9 : système éolien basé sur GAS à double stator

5.2.2.5 GAS à rotor bobiné connecté directement au réseau

Les machines asynchrones à rotor bobiné offrent un potentiel économique très attractif pour la variation de vitesse. Malgré un surcoût (machines non standards et construction plus complexe) par rapport à une machine à cage et la présence d'un système bagues-balais triphasé, elles permettent d'exploiter des variateurs électroniques de puissance réduite.

La figure (5-10) représente un système éolien basé sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné avec réglage de la résistance rotorique. L'idée de cette configuration est de contrôler la résistance du rotor par l'intermédiaire d'un convertisseur d'électronique de puissance et ainsi de commander le glissement de la machine sur un domaine de variation de 10% .

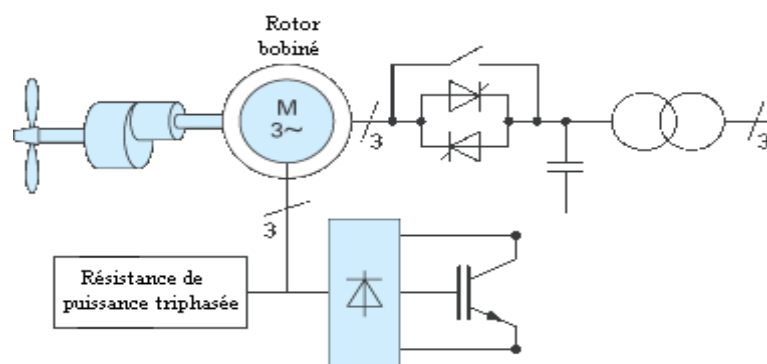


Figure 5-10 : Aérogénérateur asynchrone à rotor bobiné avec réglage de la résistance rotorique

Même si elle dégrade a priori le rendement électromagnétique, cette légère variation de vitesse contribue à augmenter le rendement global de l'ensemble turbine-générateur. La figure (5-10) montre la structure générale d'un tel système avec redresseur triphasé à diodes au rotor et hacheur pour le réglage continu de la résistance triphasée grâce au réglage du rapport cyclique de conduction du transistor de puissance.

5.2.2.6 GAS à double alimentation type rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) à rotor bobiné représente actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable avec les génératrices synchrones .

Elle est caractérisée par un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines. Les vitesses de rotation nominales de ces machines sont d'habitude un peu moins élevées par rapport aux machines à cage d'écureuil alors le rapport de multiplicateur de vitesses peut être moins important.

5.2.2.7 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure (5-11), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur. Le contrôle de l'hacheur permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable (environ 10% autour de la vitesse de synchronisme) en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

L'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance dans les éléments résistives.

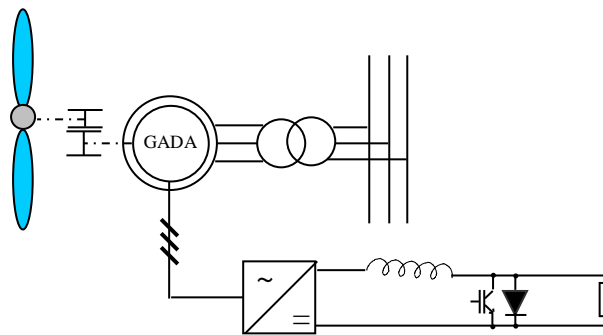


Figure 5-11 : MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

5.2.2.8 MAS à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de Kramer), (Figure 5-12).

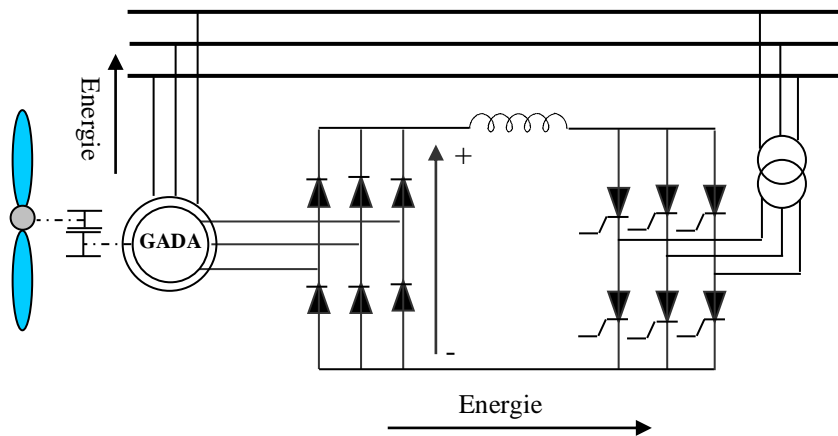


Figure 5-12 : MADA, structure de Kramer

L'ensemble redresseur onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. 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.

5.2.2.9 MAS à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur (Figure 5-13), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius.

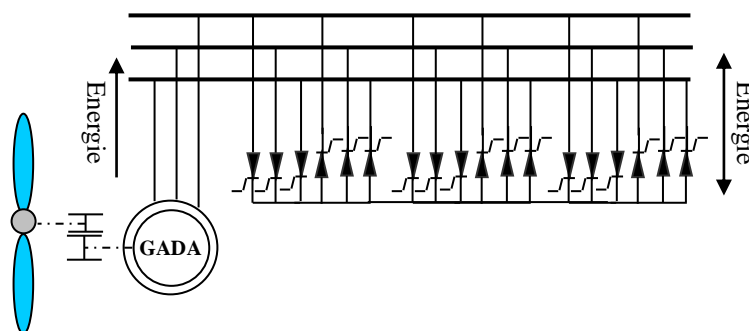


Figure 5-13 : MADA, structure Scherbius avec cycloconvertisseur

5.2.2.10 MAS à double alimentation avec convertisseurs MLI

Cette configuration consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur (Figure 5-14).

En général, le dimensionnement de la chaîne rotor se limite entre un quart et un tiers de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Ce qui suffit à assurer une variation jusqu'à 30% de la plage de vitesse. C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

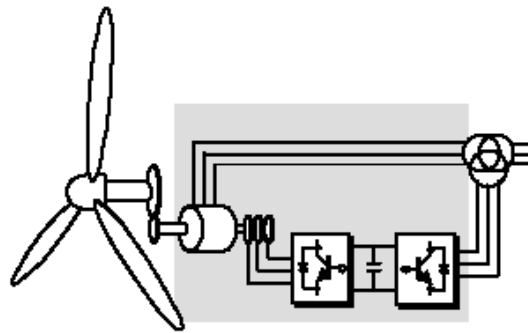


Figure 5-14 : MADA, structure Scherbius avec convertisseurs MLI

La figure (5-15) illustre les différentes configurations électriques conçues pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

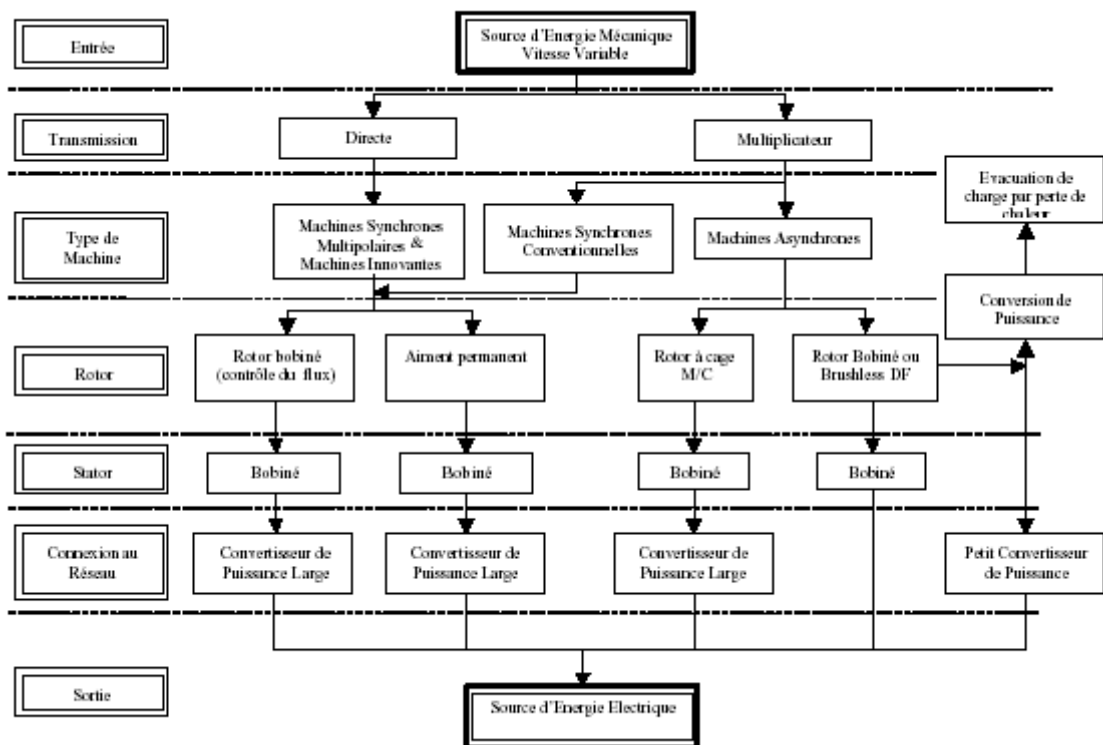


Figure 5-15 : Processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique pour différentes configurations électriques