République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Fares de Médéa
Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'optention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Réseaux Electrique
Commande Electrique

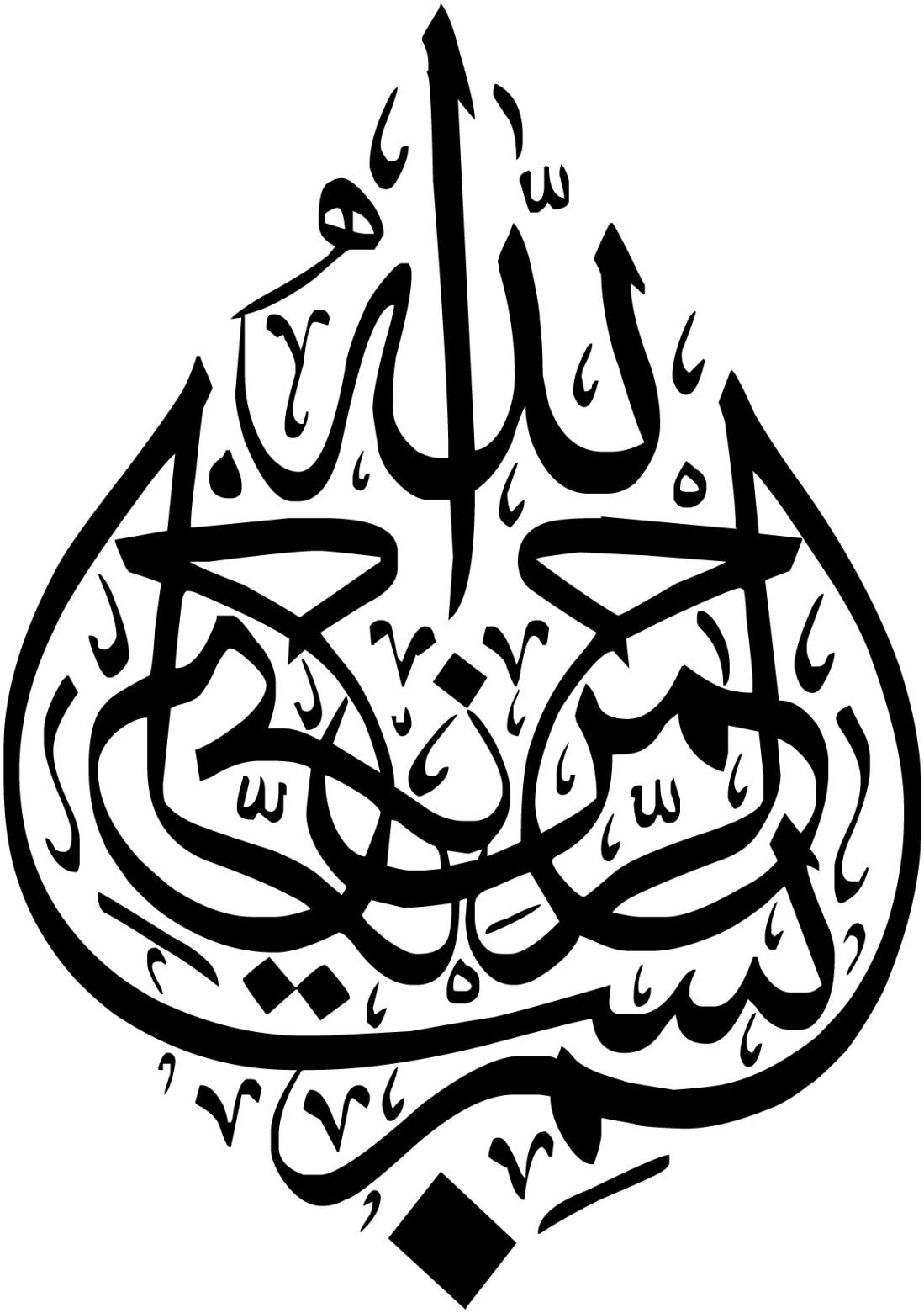
Thème
Modélisation et commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation connecté à un réseau DC

Proposé par : Dr. Noureddine Henini

Présentée par :

AMMI Mohamed el amine
LAKROUT Hocine

Année universitaire : 2017 /2018



Dédicaces

À ma grand-mère,
À mes chers parents,

À mes sœur Yamina,Nadjet,
À mes frères Redoiane, Abd El Reouf, louanes, Soufiane et Abd El Bassite,

À toutes la famille AMMI

À toutes mes amies

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Mohamed.

Dédicaces

À ma grand-mère,
À mes chers parents,

À ma sœur
À mes frères,

À toutes la famille LAKROUT

À toutes mes amies

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Hocine.

Remerciements

*Tout d'abord, je tiens à remercier **ALLAH** Tout Puissant pour toutes les merveilles qu'il fait dans ma vie et pour m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur **Noureddine HANINI**, qui m'a guidé avec grande patience tout au long de l'élaboration de ce travail, pour ses aides précieuses qui ont judicieusement éclairés mon chemin vers l'aboutissement et la réussite de la concrétisation de ma mémoire de master.*

*J'adresse également mes plus grands remerciements au, rahmani **abd el samed**, ingénior de **SKB** pour son aide, son accompagnement et son éclairage technique. et tout l'équipe de société **SKB.***

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant ces années de recherches et d'études.

Résumé

ملخص

يعرض هذا العمل نمذجة ومراقبة المولد اللا تزامني المزدوج التغذيةفي إنتاج طاقة الرياح. ولهذا تم إنشاء نموذج المولد اللا تزامني المزدوج التغذية

والهدف الرئيسي من هذه المراقبة هو السيطرة على الطاقة المولدة من طرف المولد بطريقة مستقلة، التي تستخرج عن طريق توجيه التدفق

كلمات مفتاحية: المولد اللا تزامني المزدوج التغذية, التحكم الشعاعي تصميم النموذج

Résumé

Ce travail présente la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle a été établi pour le GADA. Puis nous avons utilisé la commande vectorielle pour commander cette génératrice.

L'objectif principal de cette commande est de contrôler les puissances générées par la génératrice d'une façon Indépendante, on les découple par orientation du flux rotorique.

Mots clés : Machine asynchrone à double alimentation, éolienne, turbine, modélisation, onduleur, commande vectorielle.

Abstract

This work presents the modeling and the control of the doubly-fed induction machine (DFIG) in the wind power production. With this intention, a model of the DFIG was established. The main objective of this method is to control the powers generated by the generator in an Independent way, they are decoupled by orientation of the rotor flux.

Keywords:

Doubly fed induction machine, wind turbine, modeling, vector control.

Table des matières

Abréviations i
Nomenclature et symboles ii
Liste des tableaux iv
Liste des figures v

Introduction générale 1

Chapitre I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.1. Introduction 04
1.2 GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE 04
I.2.1. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne 04
I.2.2. Définition de l'énergie éolienne 06
I.2.3. L'éolienne en Algérie 07
I.2.4. L'aérogénérateur 08
I.2.5. Présentation des différentes technologies des systèmes éoliens 09
I.2.5.1. Aérogénérateurs à Axe Vertical 09
I.2.5.1.1. Avantages 09
I.2.5.1.2. Inconvénients 10
I.2.5.2. Aérogénérateurs à Axe Horizontal 10
I.2.5.2.1. Avantages 10
I.2.5.2.2. Inconvénients 11
I.2.6.Architecture d'une éolienne à axe horizontal 11
I.2.7. Applications des éoliennes 12
I.2.8. Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne 12
I.2.8.1. Avantages 12
I.2.8.2. Inconvénients 13
I.3. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 14
I.3.1. Loi de BETZ 14
I.4. Etat de l'art sur la conversion électromécanique 17
I.4.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe 18
I.4.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable 19
I.5.1 Problématiques de la connexion aux réseaux 20
I.5.2. Réglage de la tension 20
I.5.2.1. Réglage de la fréquence 21
I.5.2.2 Description des problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique 22
I.5.2.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible 22
I.5.2.2.2 Capacité d'accueil 23
I.5.2.2.3 Déconnexions intempestives 23
I.5.2.3.Description des facteurs affectant la qualité énergétique 25
I.5.2.3.1 Fluctuation de tension 25
I.5.2.3.2 Variation de la fréquence 26
I.5.2.3.3 Harmoniques et inter-harmoniques 27
I.5.3 Architecture pour améliorer la qualité de l'énergie 27
I.5.3.1 Le stockage et les fluctuations de production 27
I.5.3.1.1 Description des différents types de stockage 28
I.5.3.1.2 Le stockage inertiel (court terme) 29

Table des matières

I.5.3.2 Filtrage limitant les harmoniques 29
I.5.3.2.1 Problématique des harmoniques 29
I.5.3.2.2 Méthodes de compensation des harmoniques 29
I.5.3.3 Creux de tension 30
I.5.3.3.1 Reprise au vol 30
I.5.3.3.2 Solutions possibles 30
I.5.4CONCLUSION 32

Chapitre II Modélisation de la Génératrice

II.1. Introduction 34
II.2 Description du système 34
II.3 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation 35
II.3.1 Machine à double alimentation en cascade asynchrone 35
II.3.2 Machine à double alimentation cascadée à un repère 36
II.3.3 MADA sans balais 37
II.3.4 Principe de fonctionnement 38
II.3.4.1 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone 38
II.4 Aperçu sur la configuration de la MADA a rotor bobiné 38
II.4.1 Configuration pour application génératrice 38
II.4.1.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée 39
II.4.1.2 MADA -structure de kramer 40
II.4.1.3 MADA structure de scherbius avec cyclo-convertisseur 40
II.4.1.4 MADA structure de scherbius avec convertisseurs MLI 41
II.5 Domaines d'application de la MADA 42
II.6 Avantages et inconvénients de la MADA 42
II.6.1 Avantages de la MADA 43
II.6.2 Inconvénients de la MADA 44
II.7 Application des machines asynchrones à double alimentation 45
II.7.1 Application génératrice 45
II.8 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation 45
II.8.1 Hypothèses simplificatrices 46
II.8.2 Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA 46
II.8.2.1 Equations électriques 46
II.8.2.2 Equations mécanique 47
II.8.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q) 48
II.8.3.1 La Transformation de Park 48
II.8.3.2 Application de la transformation de Park 48
II.9.coclusion

Chapitre III : Commande vectorielle de la GADA

III.1 Introduction 52
III.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA 53
III.3 Etablissement du modèle de la GADA 53
III.4.Technique de commande 55
III.5. Résultats de Simulation 57
III.6. Interprétation des résultats 61
III.7. Conclusion 62

Table des matières

Conclusion générale 64
Références bibliographiques 66
Annexe A 68

Abréviation

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation.
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation.
GTO	Gate Turn-Off Thyristor.
IGBT	Insulated Gate Bipolaire Transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
MS	Machine Synchrone.
PI	Proportionnel Intégral
GWEC	Global Wind Energies Concile
SCE	Système de Conversion Eolien
CDER	centre de développement des énergies renouvelable
CEEG	Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz
VSC	convertisseur de source de tension
DC	Tension continue

Liste des symboles

Paér	la puissance aérodynamique.
ρ	Représente la densité de l'air.
R	Le rayon des pales de la turbine.
CP	Le rendement aérodynamique de la turbine, appelé souvent coefficient de puissance.
Lss, Lrr	sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.
M	Mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.
Ms, Mr	les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.
[Msr]	la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor.
M_{max}	Est Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.
Cem	Le couple électromagnétique du la machine.
Cr	Le couple résistant.
Is Ir	Les courants de phase statorique et rotorique respectivement.
θs ,θr	Angle électrique statorique, rotorique.
Φs, φr	Respectivement flux statorique et rotorique.
Φsd, φsq	les flux statoriques directs et en quadrature du système.
Φrd, φrq	les flux rotoriques directs et en quadrature du système.
Isd, Isq	Le courant statorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.
Ird, Irq	Les courant rotorique directe et en quadrature dans le repère de PARK.
Ws, Wr	Pulsation statorique et rotorique.
Vsd, Vsq	les tensions statoriques directes et en quadrature du système diphasé.
Vrd, Vrq	les tensions rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.
as, bs, cs	Les trois phases du stator.
ar, br, cr	Les trois phases du rotor.
Ps, Qs	Puissance active et réactive statorique.
Pr, Qr	Puissance active et réactive rotorique.

Liste des symboles

Rs	résistance statorique.
Rr	résistance rotorique.
Ω_1	vitesse de rotation avant multiplicateur.
Ω_2	vitesse de rotation après multiplicateur.
m	la masse d'air en mouvement.
V_1 , V_2	vitesse du vent
S	la surface des pales
V, I, Φ	tension, courant et flux, respectivement
Lfs,	Lfr inductances du stator et du rotor
M	magnetizing inductance
im	courant magnétisant
σ	facteur de fuite
Te	couple électromagnétique
Us	tension stator ligne-à-ligne nominale
Vdc	Tension continue
d, q	Quantités de trames synchrones à deux axes
*	Valeur de référence
f_r	Le coefficient de frottement visqueux de la MADA.
Ω	la vitesse de rotation de l'axe de la MADA.
J $\frac{d\Omega}{dt\theta}$	l'inertie des parties tournantes.
Lr, Ls	Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.
P	le nombre de paires de pôles de la MADA.

Liste des tableaux

Tableau I.1. Niveaux de tension de raccordement en fonction de leur puissance.

Tableau III.1. Paramètre de GADA.

liste de figure

Chapitre I. Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne

Figure I.1. Puissance des installations éoliennes (MW) à l'échelle mondiale. 05

Figure I.2. Principaux organes du système de conversion éolienne. 06

Figure I.3. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie. 07

Figure I.4. Correspondance taille-puissance des éoliennes. 08

Figure I.5. Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical. 09

Figure I.6. Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale. 10

Figure I.7. Principaux composants d'une éolienne. 11

Figure I.8. Tub de courant d'air autour d'une éolienne 15

Figure I.9. Coefficient de puissance 15

Figure I.10. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes. 16

Figure I.11. Evolution de la configuration électrique 18

Figure I.12. Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage 19

Figure I.13. Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage 19

Figure I.14. Puissance produite par la turbine 20

Figure I.15. Transit de puissance entre les réseaux NORDEL et UCTE. 23

Figure I.16. Gabarit de tension auquel doivent satisfaire les éoliennes connectées au réseau de répartition 25

Figure I.17. Schéma d'une éolienne connectée au réseau. 26

Figure I.18. Insertion d'un système de stockage dans une éolienne. 28

Figure I.19. Eolienne équipée d'un crow bar actif. 31

Chapitre II. Modélisation de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation

Figure II.1. Schéma fonctionnel du GADA autonome connecté à une charge CC. 34

Figure II.2. Représentation de la machine asynchrone à double alimentation. 35

Figure II.3. Schéma de principe de la MADA en cascade asynchrone. 36

Figure II.4. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère. 36

Figure II.5. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais. 37

Figure II.6. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone. 37

Figure II.7. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone. 38

Figure II.8.MADA à énergie rotorique dissipée. 39

FigureII.9. Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique. 39

Figure II.10.MADA, structure Kramer. 40

Figure II.11. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur. 41

Figure II.12. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI. 41

Figure II.13. Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA. 43

Figure II.14. Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse entre la machine à cage et la MADA. 44

Figure II.15. Représentation de la MADA dans les deux repères. 45

Chapitre III. Commande vectorielle de la GADA

Figure III.1. Principe de la commande vectorielle. 52

Figure III.2. Vecteurs de flux et de tension. 54

Figure III.3. Diagramme de contrôle du DFIG connecté à un contrôleur de domaine charge. 56

Figure III.4.Réponse en tension continue à un changement d'étape de la résistance de charge. 57

Figure III.5. La puissance Réactive Statorique 58

Figure III.6. La puissance active Statorique 59

Figure III.7.courants du stator triphasé. 59

Figure III.8.la fréquence du stator. 60

Figure III.9. Courants du rotor. 60

Introduction générale

I. INTRODUCTION GENERAL

La production de l'énergie électrique dans le monde génère diverses pollutions. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables de rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles. A l'opposé, les centrales nucléaires, dont le développement s'intensifia suite à la crise du pétrole, n'ont pas d'influence néfaste sur la qualité de l'air. Par contre, elles produisent des déchets radioactifs qui engendrent d'importants problèmes de stockage, de traitement ou de transport.

Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, …) dans la production de l'électricité **[BAA 16]**.

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable, et l'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent, beaucoup de recherches sont faites et se font en ce moment sur les stratégies des différentes chaines de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées d'une génératrice asynchrones à double alimentation (GADA). Cette dernière permet une production d'électricité à vitesse variable.

L'objectif principal de notre travail consiste à l'étude de la commande d'une GADA qui peut être introduite dans un système éolien. On a choisi une classique (commande vectorielle) La structure de notre mémoire est donnée comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie.

Le deuxième chapitre nous abordons la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Des hypothèses simplificatrices nous faciliteront sa mise en équation

Le troisième chapitre présente une stratégie de commande vectorielle classique en puissances active et réactive statoriques appliquée au GADA, il sera alors possible de donner des valeurs de consignes indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive, ceci nous offre la possibilité de régler en permanence la valeur de la puissance réactive que la machine va fournir au réseau. Nous présentons la méthode indirecte qui s'occupe d'abord de réguler les courants rotoriques de la GADA.

Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, des perspectives espérées sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

Chapitre I

L’état de l’art sur l’énergie éolienne

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 **[TRI 13]**.

L'objectif de ce premier chapitre et donc de présenter un état de l'art sur l'énergie éolienne. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie. Ensuite nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques. Enfin nous avons illustré les avantages et les inconvénients, les domaines d'application.

I.2 Généralités sur l'énergie éolienne

I.2.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J. C environ **[TOU 15].**

Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé

respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. L'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive **[BOY 06].**

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde **[MEL 11]**.

D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energies Concile (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée **[BOU 09]**.



Figure.I.1. Puissance des installations éoliennes (MW) à l'échelle mondiale **[GWEC 10]**.

I.2.2 Définition de l'énergie éolienne

Le SCE (Système de Conversion Eolien), est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice Figure.I.2.

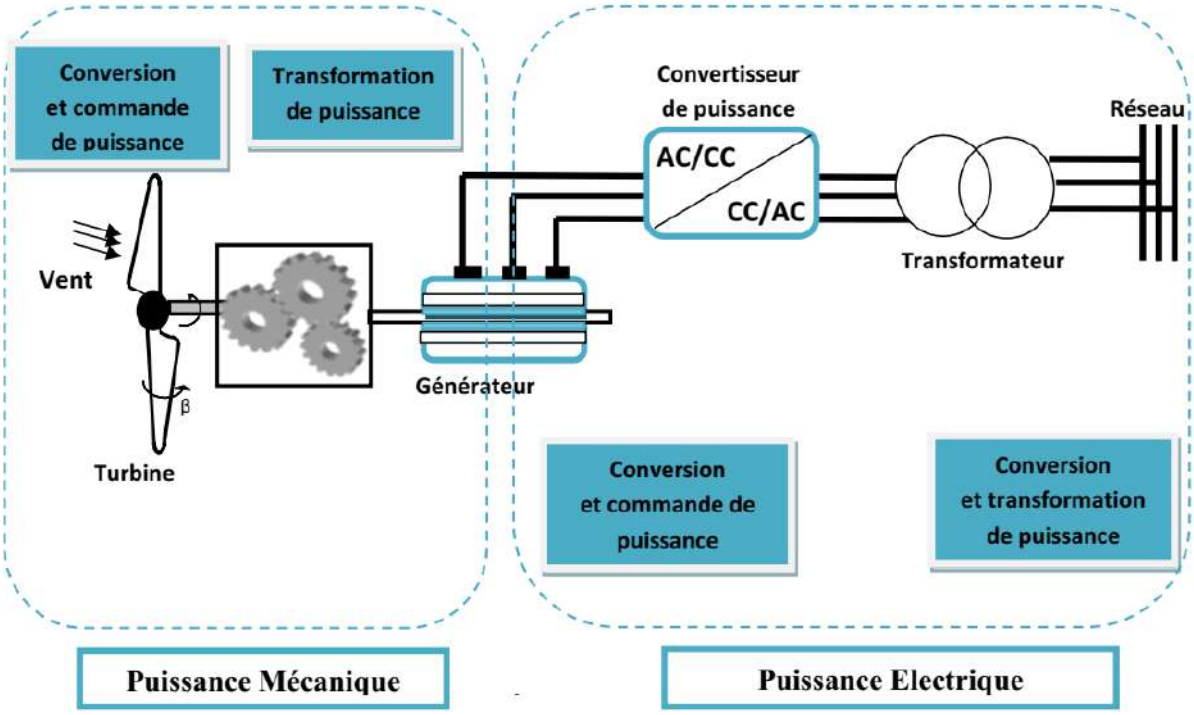


Figure.I.2. Principaux organes du système de conversion éolienne **[TRI 10]**.

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entrainé par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. 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. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences **[LMRG 12]**.

I.2.3 L'éolienne en Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7 m/s dans la région d'Adrar **[TOU 15].**

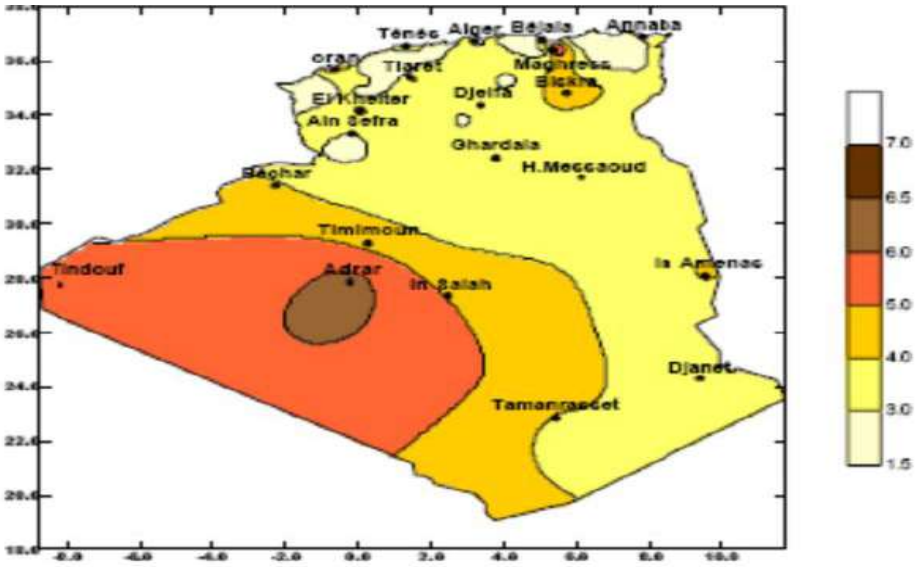


Figure.I.3. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie, **[TOU 15]**.

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes **[TOU 15]**:

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens.

➢ **Projet à faire en Algérie :**

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe

SONELGAZ. Le potentiel éolien, technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007 **[TOU 15]**.

Les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an.

La Figure.I.3.présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER laboratoire de l'énergie éolienne [**TOU 15]**.

I.2.4 L'aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories **[GAN 11]**

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

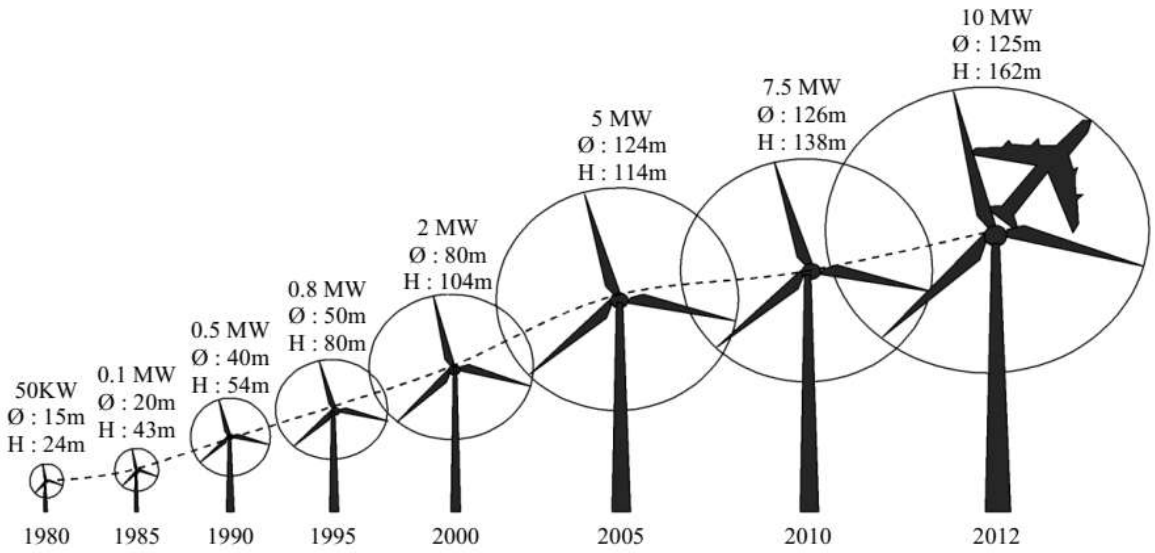


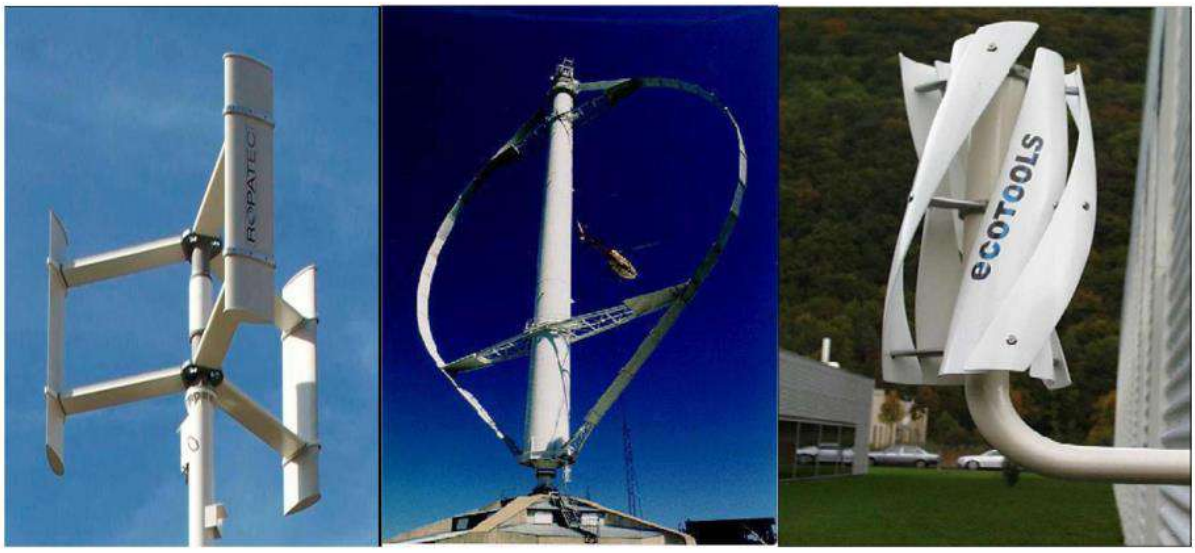
Figure.I.4. Correspondance taille-puissance des éoliennes **[GAN 11]**.

I.2.5 Présentation des différentes technologies des systèmes éoliens

Du point de vue conception, les éoliennes peuvent être classées en deux catégories selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue les éoliennes à axe vertical Figure.I.5.et les éoliennes à axe horizontal Figure.I.6. **[KHO 06]**.

I.2.5.1 Aérogénérateurs à Axe Vertical

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boite d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique **[BOU 09]**.



(a) (b) (c)

Figure.I.5. Différentes technologie d'éoliennes à axe vertical :

a) Turbine Darrieus en H. **b)** Turbine Darrieus. **c)** Turbine Savonius **[BOU 09]**.

I.2.5.1.1 Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien. **[TMK 15]**.

I.2.5.1.2. Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne, à tour **[TMK 15]**.

I.2.5.2 Aérogénérateurs à Axe Horizontal

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol . Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique **[BOY 06]**.



Figure.I.6. Différentes technologie d'éoliennes à axe horizontale :

a) Eolienne multiple. **b)** Eolienne horizontale bipale. **c**) Eolienne horizontale tripale **[BAA 16]**.

I.2.5.2.1 Avantage

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage **[BAA 16]**.

I.2.5.2.2. Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple **[BAA 16]**.

I.2.6 Architecture d'une éolienne à axe horizontal :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour.

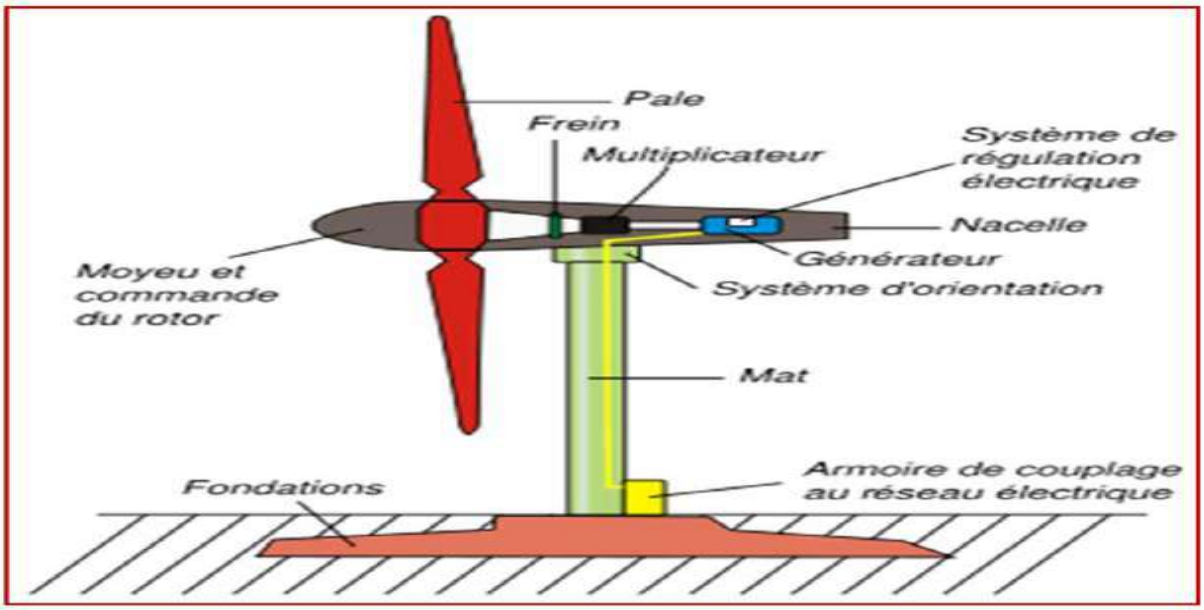


Figure.I.7. Principaux composants d'une éolienne **[HAS 12]**.

I.2.7 Applications des éoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- soit pour entraîner une génératrice électrique. Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration.
- l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...) **[HAS 12]**.

I.2.8 Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne

I.2.8.1 Avantages

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

- La concentration du CO2 est augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°c depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°c d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années.

Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais ils ont par exemple annoncé qu'il provoquera une augmentation de niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100.

L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO2 :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs.
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- 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 en plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent en énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales à énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte. Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés **[HAS 12]**.

I.2.8.2 Inconvénients

- L'énergie change suivant la météo, la nature du vent stochastique du vent à une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaitre après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.

- Le cas d'installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou bien de doubler l'installation par un groupe électrogène Diesel, ce qui augmente le coût.
- Impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage. Les oiseaux: les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci, **[BOU 09], [BOY 06]**.

I.3 conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.3.1 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2» **[DEN 10]**.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure.I.8.sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesseV_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est:

$$m = \frac{\rho.S.(V_1+V_2)}{2} \qquad \text{(I.1)}$$

La puissance $P_{aér}$ alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aér} = \frac{m.({V_1}^2+{V_2}^2)}{2} \qquad \text{(I.2)}$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_{aér} = \frac{\rho.S.(V_1+V_2)({V_1}^2+{V_2}^2)}{4} \qquad \text{(I.3)}$$

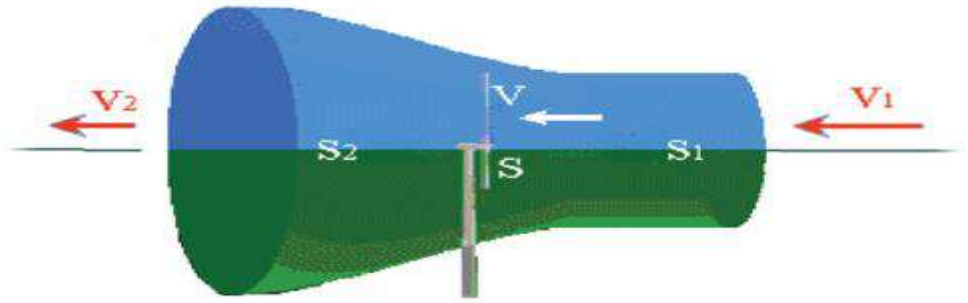


Figure.I.8. Tub de courant d'air autour d'une éolienne **[DEN 10]**.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesseV_1, la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho . S . {V_1}^3}{2} \qquad \text{(I.4)}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement Disponible est alors :

$$\frac{P_{aér}}{P_v} = \frac{1}{2}\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right) = C_p \qquad \text{(I.5)}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus Figure.I.9, on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_{aér}}{P_v}$ appelé aussi coefficient de puissanceC_p présente un maxima de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent **[DEN 10]**.

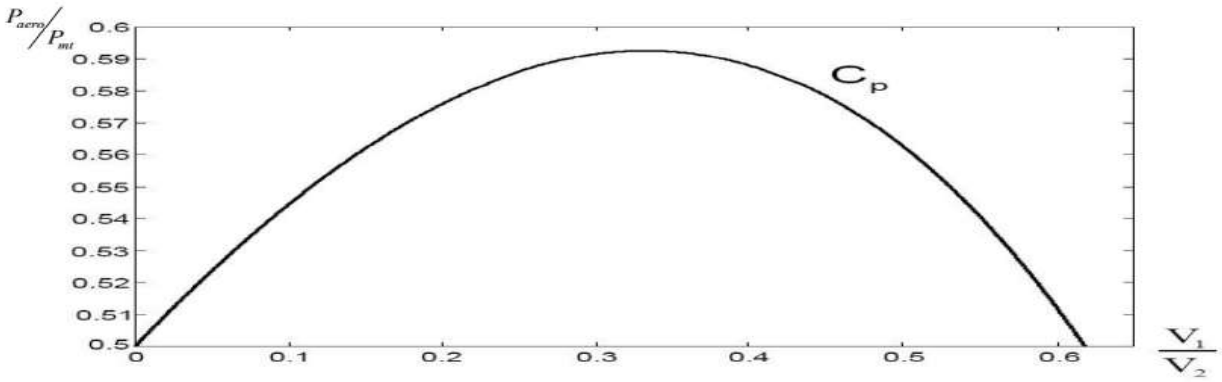


Figure.I.9. Coefficient de puissance **[DEN 10]**.

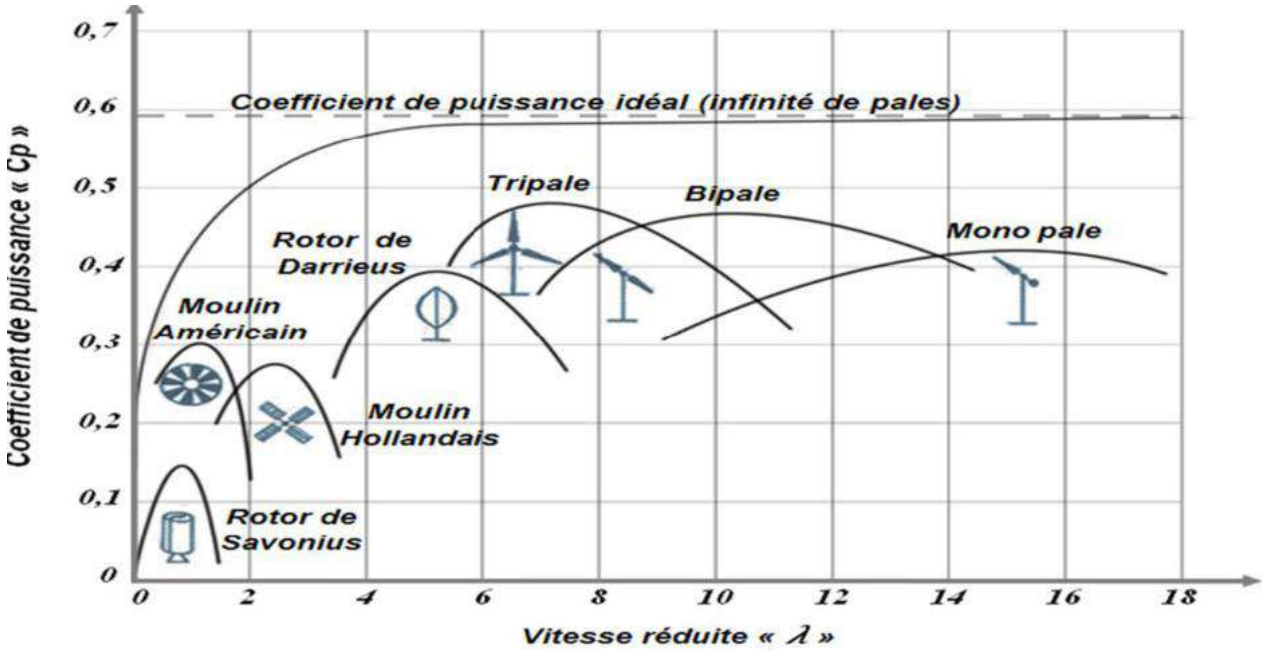


Figure.I.10. Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes **[DEN 10]**.

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 Figure.I.10 atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 45 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts **[MEL 11]**.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance Figure.I.9 atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente **[MEL 11]**.

- **Production d'énergie mécanique**

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique $P_{aér}$ disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aér} = C_p . P_v = \frac{1}{2} . Cp(\lambda) . \rho . \pi . R^2 . {V_1}^3 \qquad \text{(I.6)}$$

Avec : $\lambda = \frac{\Omega_1 . R}{V_1}$ (I.7)

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur et R: rayon de l'aérogénérateur.

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

$$P_{aér} = \frac{1}{2} . Cp\left(\frac{\Omega_2 . R}{K . V_1}\right) . \rho . \pi . R^2 . {V_1}^3 \quad \text{(I.8)}$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

I.4 Etat de l'art sur la conversion électromécanique

Dans le cas de la conversion de l'énergie éolienne, les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Ce sont souvent des structures standard à une ou deux paires de pôles. Suivant les puissances et le fonctionnement désirés (connexion au réseau électrique ou fonctionnements isolé et autonome), différentes configurations de connexions au réseau ou à la charge peuvent être adoptées. Dans le paragraphe suivant, nous développerons plus en détail les caractéristiques et les performances de chacun de ces deux types de machines dans diverses configurations **[BAA 16]**.

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil. C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électronique de puissance et la réduction des prix correspondant qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux aérogénérateurs possible. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système. La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance. Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins

de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important. Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des générateurs asynchrones doublement alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans ce mémoire **[BAA 16]**.

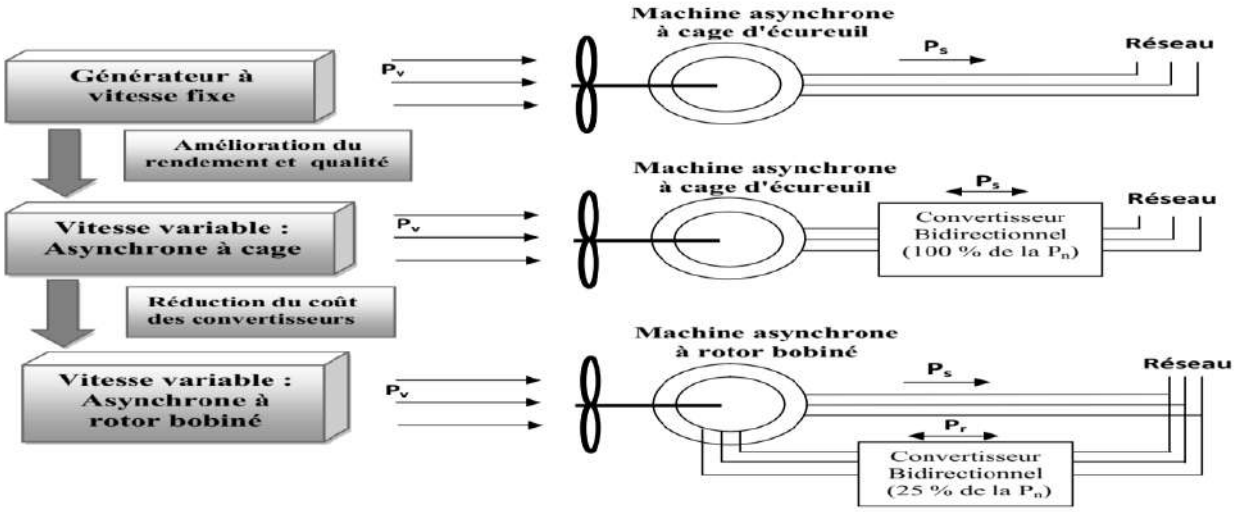


Figure.I.11. Evolution de la configuration électrique **[BAA 16].**

I.4.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe

Dans le premier cas Figure.I.12 le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (seules les générateurs asynchrones sont utilisés dans ce cas). Deux générateurs asynchrones sont souvent utilisés dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit **[GA, GS 17]**.

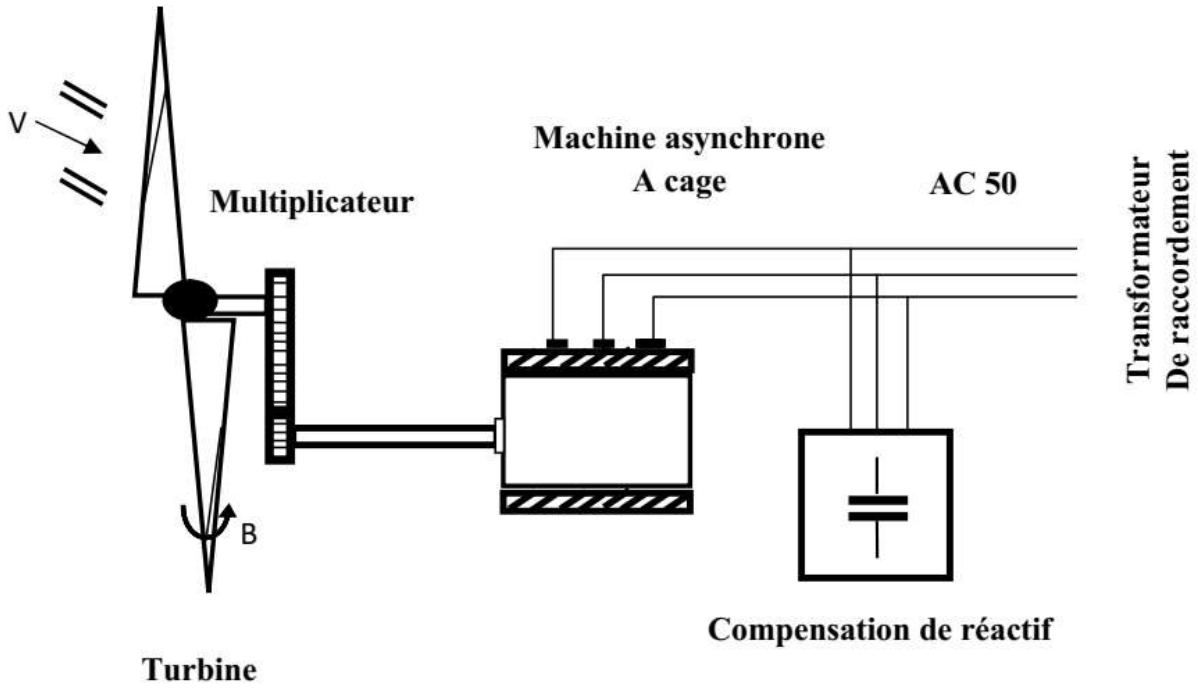


Figure.I.12. Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage **[GA, GS 17]**.

I.4.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable

Dans le deuxième cas Figure.I.13, une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la génératrice électrique **[GA, GS 17]**.

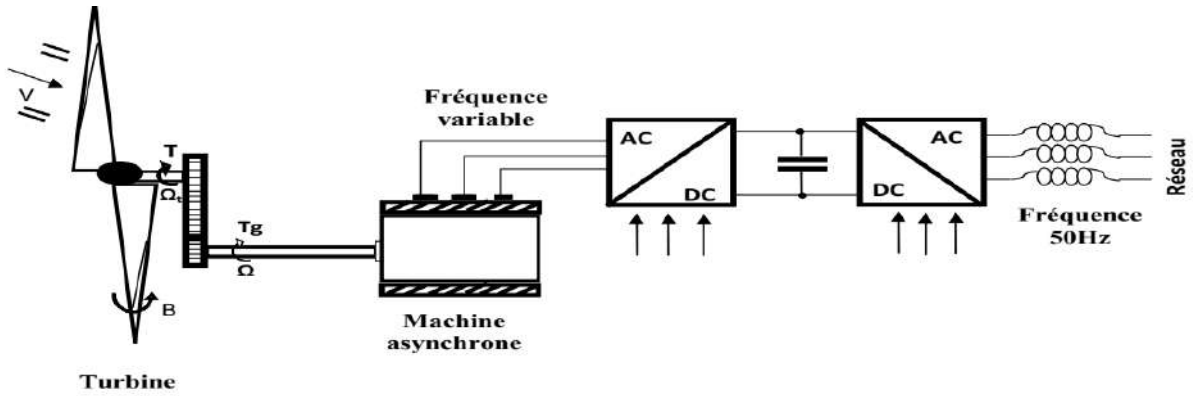


Figure.I.13. Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage **[GA, GS 17]**.

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée sur la Figure.I.14.À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si le générateur est entraîné 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.

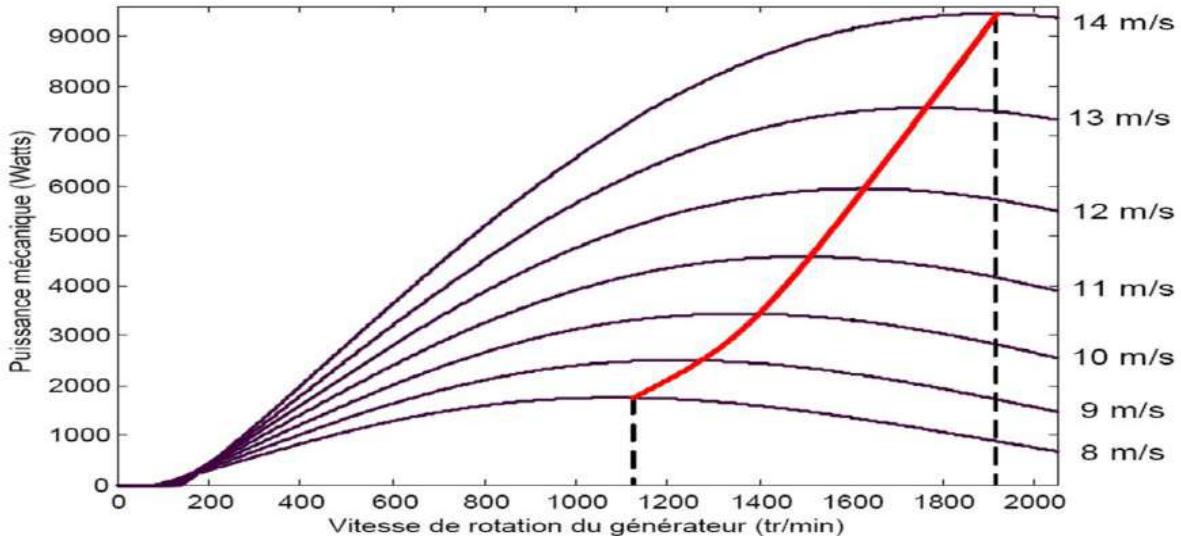


Figure.I.14. Puissance produite par la turbine **[GA, GS 17]**.

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure.I.14 les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la génératrice devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple **[TG 11]**.

I.5.1 Problématiques de la connexion aux réseaux

L'impact de l'éolien sur le réseau de transport est à considérer à une échelle européenne. En effet, la concentration d'énergie éolienne dans le nord de l'Allemagne produit déjà d'importants flux discontinus de puissance sur les réseaux de transport voisins, du Benelux et d'Europe Centrale. Dans le futur, le réseau de transport français risque de ne pas être épargné par ce phénomène **[TG 11]**.

I.5.2. Réglage de la tension

Les installations de production relèvent :

Du réseau public de transport si la puissance installée est supérieure à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63 kV (domaine de la HTB).

Du réseau public de distribution si la puissance installée est inférieure ou égale à 12 MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20 kV (domaine de la HTA et de la BT).

Les contraintes techniques dépendent principalement de la puissance à raccorder, elle définit le type de réseau. Le Tableau I.1 donne les niveaux de tension de raccordement des installations en fonction de leur puissance, en France. Les raccordements au réseau HTA français sont analysés dans **[TG 11]**.

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison soit par un réglage primaire soit par un réglage secondaire : Le réglage primaire, qui mobilise la réserve réactive des groupes les plus proches de la perturbation, sous l'action de leur régulateur primaire de tension agissant sur l'excitatrice des groupes à partir des variations de tension observées au stator, de façon à maintenir cette tension égale à la valeur de consigne affichée. Le réglage secondaire de tension, qui mobilise les réserves réactives de l'ensemble des groupes et des condensateurs par zones électriquement homogènes du point de vue du comportement en tension. Plus la puissance produite est importante, plus les contraintes de réglage sont importantes. Les installations raccordées aux réseaux HTB2 et HTB3 doivent pouvoir participer au réglage secondaire de la tension de leur zone, si le gestionnaire du réseau le demande.

I.5.2.1 Réglage de la fréquence

A la différence de la tension, qui est un paramètre local (la tension est différente en tout point du réseau, elle dépend du courant qui circule dans les lignes au voisinage du point considéré), la fréquence est homogène dans tout le réseau électrique dès lors que la production et la consommation sont en équilibre.

Type de réseau	**Plage de tension**	**Niveaux de tension**	**Puissance**
BT	BT monophasé	230 V	$P < 18$ kVa
BT	BT triphasé	400 V	$P < 250$ kVa
MT(HTA)	1 kV < U < 50 kV	15 kV, 20 kV	P <12MW
HT (HTB1)	50 kV < U < 130 kV	63 kV, 90 kV	$P < 50$MW
HT (HTB2)	130 kV < U < 350 kV	150 kV, 225 kV	$P < 250$MW
HT (HTB3)	350 kV < U < 500 kV	400 kV	$P > 250$MW

Tableau I.1. Niveaux de tension de raccordement en fonction de leur puissance **[TG 11]**.

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour les fermes éoliennes. Tableau I.l est néanmoins intéressant de noter les contraintes imposées aux autres installations

- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 40 MW doivent participer au réglage primaire de fréquence.
- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 120 MW doivent participer au réglage secondaire de fréquence.

Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien. En cas de forte pénétration de l'éolien, les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien évolueront. Le problème étant évidemment l'existence d'une réserve primaire associé à l'éolien. Actuellement, il est déjà demandé aux éoliennes de réduire leur génération lorsque la production est supérieure à la consommation, donc lorsque la fréquence est supérieure à 50 Hz.

I.5.2.2 Description des problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau électrique

Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans le réseau électrique sont principalement causés par

- leur production aléatoire qui et difficilement prévisible
- la capacité d'accueil
- les déconnexions intempestives.

I.5.2.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible

Le problème majeur de l'éolien est l'incertitude sur les prévisions de la vitesse du vent sur les sites éoliens induisant une incertitude sur la production des éoliennes. Les erreurs de prévisions sont en négatif (sous-production) ou en positif (surproduction) avec des changements de signe rapides en cours de journée. La prévision est satisfaisante en ce qui concerne l'amplitude mais le moment où ce niveau de production est atteint, n'est pas précis.

L'expérience allemande montre que des prévisions à 72 h sont utopiques, et que l'erreur moyenne sur des prévisions à 24 h représente 10% de la capacité installée et peut atteindre parfois 50% **[TG 11]**.

L'opérateur ELTRA, gérant le réseau ouest du Danemark intégrant une forte capacité éolienne, a connu des situations critiques dues à une surproduction éolienne dont l'évacuation vers le réseau nordique (NORDEL) ou vers le réseau UCTE (via l'Allemagne) posait problème du fait que les lignes d'interconnexion étaient déjà aux limites de leur capacité Figure.I.15.

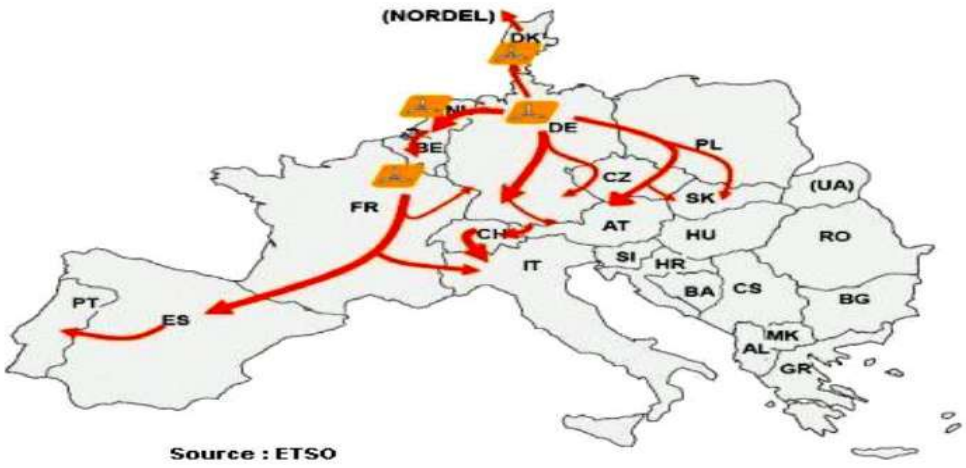


Figure.I.15. Transit de puissance entre les réseaux NORDEL et UCTE.

La multiplicité des installations éoliennes sur un vaste territoire est néanmoins favorable à une corrélation entre la consommation et la production éolienne comme le montre des études sur le foisonnement éolien. Le foisonnement éolien est le phénomène statistique qui fait que, par la multiplication spatiale des installations éoliennes sur un territoire donné, la valeur minimale de la puissance injectée par l'ensemble est supérieure à la somme des puissances minimales de chacune d'entre-elles. Ainsi, la multiplication d'éoliennes (soumises à des vitesses de vent différentes) conduit globalement à un lissage de la puissance **[TG 11]**.Ainsi, le foisonnement éolien dans l'hexagone (trois régimes de vent dé corrélés) assure une production éolienne plus stable que dans tous les autres pays d'Europe.

I.5.2.2.2 Capacité d'accueil

La capacité des lignes et des postes est limitée. Les sites ventés sont souvent éloignés des lieux de consommation. Par conséquent, de nouvelles lignes et postes devraient être construits afin d'assurer la sécurité du réseau. Une étude prospective réalisée dans la zone gérée par l'opérateur allemand E.ON prévoit le développement de 1000 km de lignes supplémentaires d'ici 2016 pour une capacité éolienne de 16000 MW pour un montant de 550 M€. Le délai de renforcement d'un poste peut atteindre 5 ans et le délai de construction d'une nouvelle ligne peut atteindre 10 ans. De plus ces projets peuvent faire l'objet d'oppositions importantes de la part des populations. En l'état, RTE a évalué la capacité d'accueil du réseau français entre 6000 et 7000 MW d'éolien.

I5.2.2.3 Déconnexions intempestives

Les générateurs éoliens sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement lors d'un creux de tension (dès que la valeur de la tension est inférieure à 80% de la tension nominale) ou lors d'une variation de la fréquence. En effet, le

couple électromagnétique va diminuer pendant le creux de tension et la turbine va accélérer. Ceci entraînera une surchauffe pouvant endommager la génératrice. Une procédure d'arrêt est nécessaire. Un creux de tension a pour conséquence une démagnétisation de la génératrice. A la fin du défaut, lorsque la tension redevient normale, la génératrice peut se re-magnétiser brutalement ce qui peut provoquer un appel de courant important ; d'où la protection en surintensité. Le fonctionnement de l'interface d'électronique de puissance sous-entend le contrôle de la tension au niveau du bus continu. Une protection en surtension doit être prévue. Pour ne pas endommager ses composants lors d'un défaut du réseau, l'éolienne coupera automatiquement la connexion au réseau et arrêtera la rotation du rotor immédiatement avec des freins.

Lors du blackout italien du 28 septembre 2003, 3400 MW de productions se sont déconnectés lorsque la fréquence du réseau a atteint 49 Hz **[HAS 12]**.L'opérateur E.ON prévoit que le risque de déconnexion de 3000 MW d'éolien suite à un défaut important sur le réseau 380 kV au nord de l'Allemagne est bien réel, pouvant ainsi induire un déséquilibre production/consommation qui aggraverait de manière significative les conséquences d'un défaut qui aurait pu être éliminé normalement.

Afin d'éviter un déclenchement simultané de toute ou partie de la production éolienne sur un défaut normalement éliminé, il est demandé aux éoliennes installées depuis 2003 de pouvoir rester connectées au réseau en cas de baisse de tension et de variation de fréquence suivant des contraintes pouvant varier d'un opérateur à l'autre. En France, RTE demande que les éoliennes restent connectées au réseau tant que le creux de tension reste supérieur au gabarit présenté à la Figure.I.16. (valable pour les réseaux de répartition : réseaux de transport régionaux à 225 kV, 90 kV et 63 kV).

Concernant les variations de fréquence, les installations de production doivent rester connectées pour des durées limitées dans les plages exceptionnelles de fréquence situées entre 47 et 52 Hz. De plus, même si l'installation ne participe pas à la constitution des réserves comme c'est le cas de l'éolien, elle doit être capable de réduire la puissance produite lorsque la fréquence dépasse un seuil réglable entre 50.5 et 51 Hz. **[HAS 12]**.

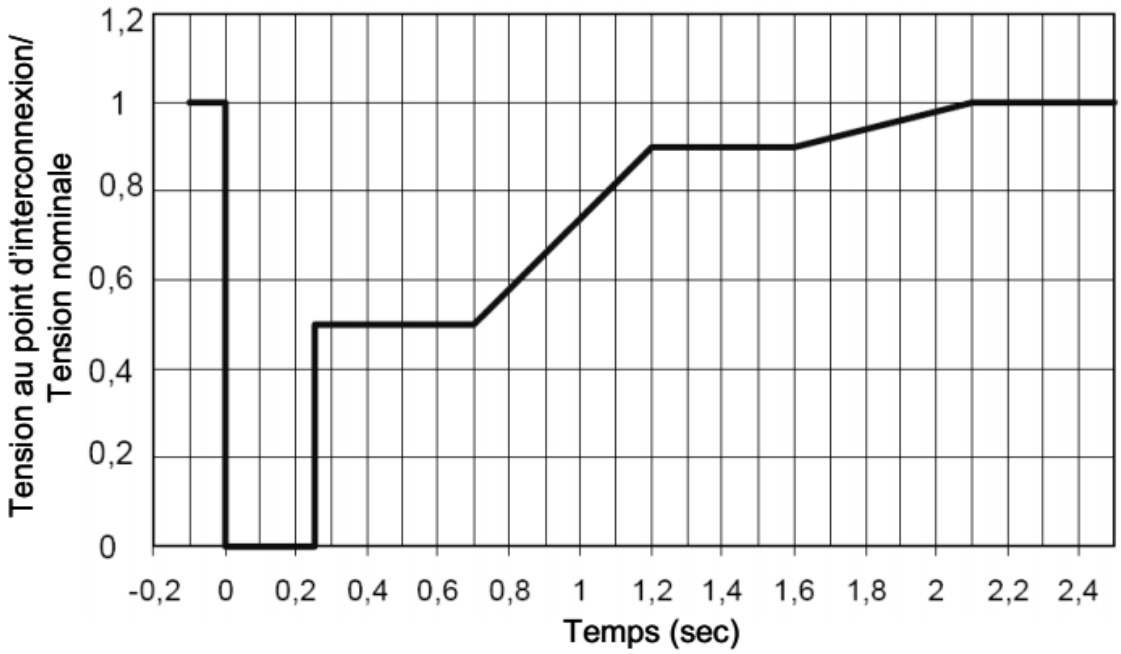


Figure.I.16. Gabarit de tension auquel doivent satisfaire les éoliennes connectées au réseau de répartition **[HAS 12]**.

I.5.2.3 Description des facteurs affectant la qualité énergétique

Le terme qualité de puissance fait référence à la stabilité de la tension ainsi qu'à la stabilité de la fréquence du réseau. L'objectif désiré étant un courant alternatif avec une forme sinusoïdale la plus idéale possible.

I.5.2.3.1 Fluctuation de tension

Le problème principal est le creux de tension dont l'origine est liée aux court-circuit qui peuvent être provoqués par l'enclenchement de gros moteurs, d'appels de charges importantes Dans une moindre mesure, il y a des variations rapides de tension, provoquées par des variations rapides de puissance absorbées ou produites par des installations telles que les éoliennes. Ces fluctuations peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage gênant désigné par le terme flicker (ou papillotement) **[HAS 12]**.Les autres applications de l'électricité ne sont, normalement, pas affectées par ces phénomènes tant que la variation d'amplitude reste inférieure à 10%.

La chute de tension aux bornes de la ligne de connexion d'une éolienne au réseau peut être approximée par la relation suivante Figure.I.17. **[HAS 12]**.

$$\Delta V = \frac{RP+XQ}{V_{th}} \quad \text{(I.9)}$$

où P et Q sont les puissances actives et réactives transitant par la ligne de résistance R et de réactance X.

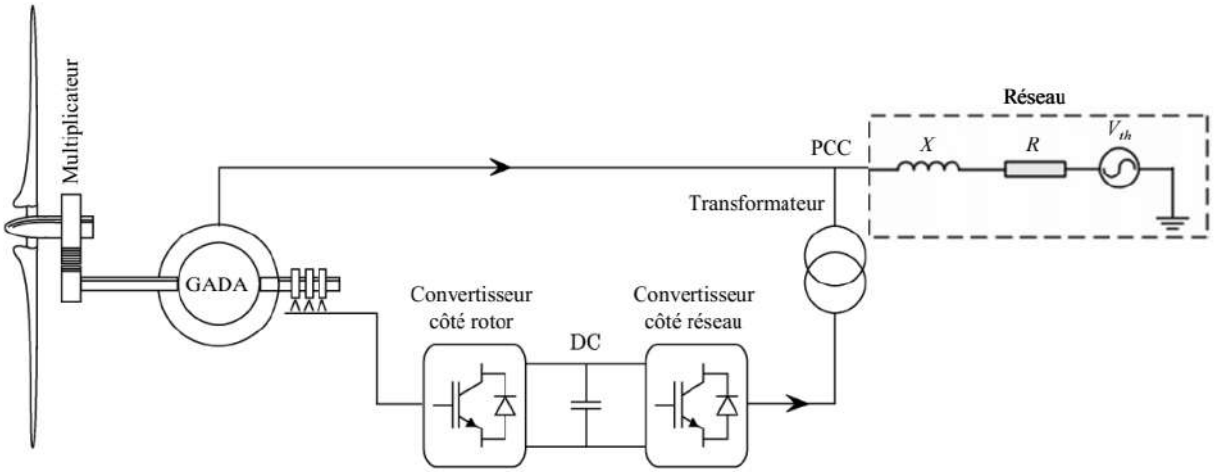


Figure.I.17. Schéma d'une éolienne connectée au réseau.

Dans le cas des lignes THT, $X > 10R$, (I.1) peut se réduire à :

$$\Delta V = \frac{XQ}{V_{th}} \quad \text{(I.10)}$$

En effet, la nuit, en régime de faible consommation, les lignes électriques très peu chargées génèrent énormément de réactif que les groupes de production se doivent d'absorber. Mais de manière générale, le facteur de puissance EDF autrement valant 0.93, on aura $Q = 0.4P$. De plus, pour les lignes à haute tension, les valeurs des résistances linéiques sont comprises entre 0.012 Ω/km (800 kV) à 0.031 Ω/km (362 kV). Les inductances vont de 1 à 2 mh/km pour les lignes aériennes, soit des réactances comprises entre 0.3 et 0.7 Ω/km, donc nettement supérieures aux résistances linéiques. L'hypothèse est donc réaliste en négligeant les effets capacitifs en sous-charge La puissance active générée par les éoliennes étant fluctuante, elle induit donc des fluctuations de la tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport, les transits de puissance réactive provoquent des variations de tension. Les éoliennes actuellement connectées au réseau de transport doivent donc participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive **[GAN 11]**.

I.5.2.3.2 Variation de la fréquence

La fréquence doit être maintenue autour de la valeur nominale de 50 Hz, quelles que soient les variations de consommation ou de production. En effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages. D'autre part, la plupart des composants du système électrique sont conçus pour fonctionner dans une plage de

fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître.

Les variations de fréquence sont très faibles dans le réseau synchrone européen, elles sont de l'ordre de 1%. Ces variations ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques. Cependant, avec l'augmentation des fermes éoliennes connectées sur le réseau HT, les variations de puissances pourraient causer des variations de fréquence. En effet, les variations de puissances produites par les éoliennes peuvent atteindre quelques centaines de kW en quelques dizaines de seconde **[HAS 12]**.

Nous pouvons alors utiliser la commande développée dans les chapitres précédents qui permet de réguler la puissance en plus du calage des pales.

I.5.2.3.3 Harmoniques et inter-harmoniques

Les éoliennes, interfacées au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance, génèrent malheureusement des harmoniques. Les convertisseurs équipés en grande majorité de transistors IGBT, génèrent des harmoniques hautes fréquences (plusieurs kHz) mais, ces harmoniques peuvent être assez aisément limités contrairement aux convertisseurs équipés de thyristors générant des harmoniques de basse fréquence et nécessitant des filtres conséquents pour les éliminer **[HAS 12]**.

I.5.3 Architecture pour améliorer la qualité de l'énergie

I.5.3.1 Le stockage et les fluctuations de production

Au vu des éléments présentés dans le paragraphe précédent, il est important que les centrales électriques puissent réguler leur production. Dans le cas des éoliennes nous pouvons réduire facilement la puissance captée du vent en utilisant la commande de la génératrice en orientant les pales ou en utilisant d'autres méthodes qui seront vues dans I.5.3.3.

Cependant, produire à un instant donné plus d'énergie que l'énergie captable du vent à cet instant est impossible si ce n'est en utilisant l'inertie mais, son action est très limité. L'utilisation d'un système de stockage améliorerait de manière significative les capacités d'intégrations des éoliennes dans le réseau. Un système permettant d'emmagasiner une grande quantité d'énergie tout en ayant une dynamique de réponse rapide qui permettrait de lisser toutes les variations instantanées de puissance et ainsi d'améliorer la qualité de l'énergie produite par les éoliennes.

Ce paragraphe va donc brièvement lister les différents procédés de stockage pour l'éolien et les conversions qu'ils effectuent **[HAS 12]**.

I.5.3.1.1 Description des différents types de stockage

- Les moyens de stockage court terme, possédant un temps de réponse court, sont :
- Les super condensateurs fonctionnant à partir d'un bus de tension continue avec un hacheur et une connexion au réseau par le biais d'un redresseur/onduleur.
- Les volants d'inertie entraînés par un variateur électronique utilisant un redresseur/onduleur.
- Les moyens de stockage long terme, possédant une capacité de stockage importante, sont
  - Les batteries alimentées à partir d'un bus de tension continue avec un hacheur et une connexion au réseau à l'aide d'un redresseur/onduleur.
  - De l'air comprimé fonctionnant avec une machine à courant continu pilotée par un hacheur alimenté par un bus de tension continue et une connexion au réseau à l'aide d'un redresseur/onduleur.
  - Les piles à combustible avec redresseur/onduleur pour la connexion au réseau et fonctionnement à l'aide un hacheur **[HAS 12]**.

Nous voyons que tous ces dispositifs peuvent être assez facilement connectés aux éoliennes au niveau du bus continu comme le montre la Figure.I.18.

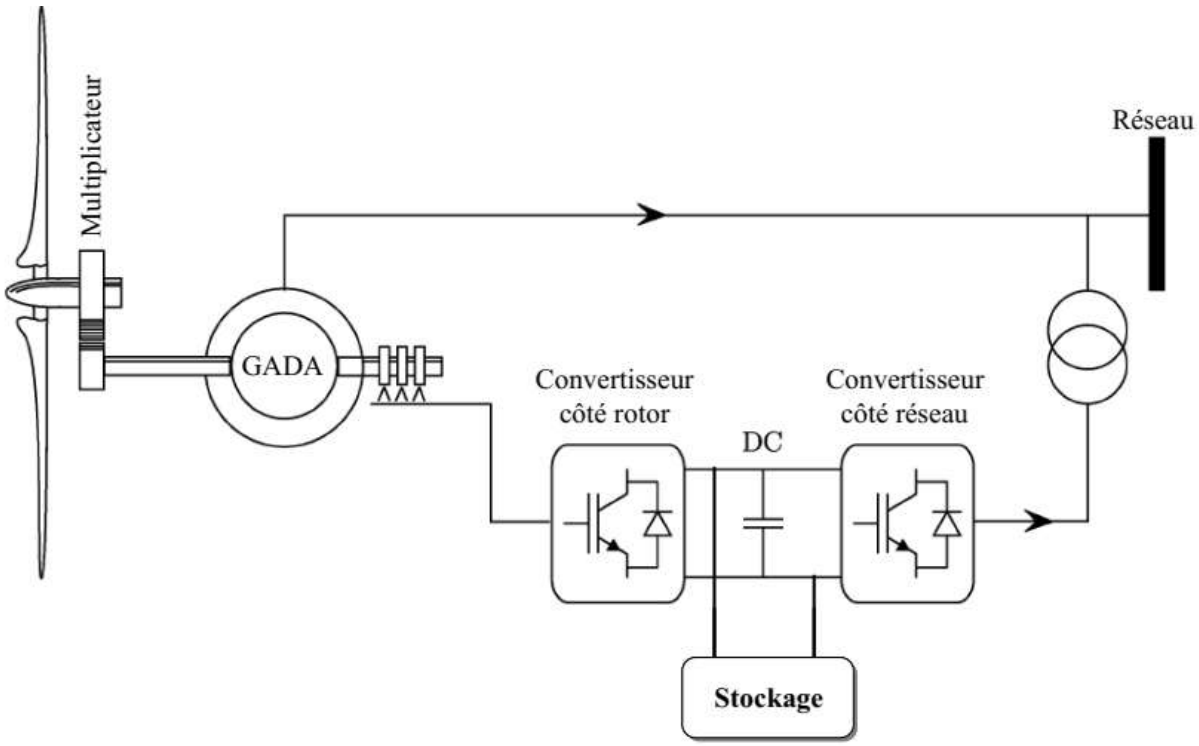


Figure.I.18. Insertion d'un système de stockage dans une éolienne.

I.5.3.1.2 Le stockage inertiel (court terme)

Le phénomène de flicker limite le taux de pénétration de l'énergie éolienne dans les réseaux de distribution **[HAS 12]**. L'utilisation d'un système du stockage inertiel permet d'atténuer ce phénomène en stockant de l'énergie lorsque la vitesse du vent augmente et en la restituant au réseau lors d'une diminution de la vitesse du vent. Le système de stockage inertiel est souvent présenté comme une solution car sa constante de temps est faible et qu'il a un meilleur rendement pour les sollicitations rapides. Les rendements de ces systèmes peuvent atteindre 92%.

I.5.3.2 Filtrage limitant les harmoniques

I.5.3.2.1 Problématique des harmoniques

Les équipements électriques affectés par les harmoniques peuvent être classés en deux principales catégories :

- Les équipements sensibles aux harmoniques : entraînant des échauffements supplémentaires et nécessitant un surdimensionnement.
- Les appareils se synchronisant avec le réseau ou utilisant la tension réseau comme référence. En effet, les courants harmoniques génèrent des chutes de tension dans les conducteurs.

Au vu de ces informations, la nécessité de limiter la propagation des courants harmoniques est évidente.

I.5.3.2.2 Méthodes de compensation des harmoniques

Il existe 4 solutions pour diminuer la pollution harmonique présente sur le réseau

- Il a été démontré que la perturbation harmonique globale croit lorsque la puissance du court-circuit diminue. La solution serait donc de réduire l'impédance du court-circuit, ce qui n'est pas toujours envisageable pour des raisons de coût.
- La modification du convertisseur polluant en changeant sa structure ou du moins sa commande.
- L'utilisation de filtres passifs de type LC connecté en parallèle avec la charge empêche la propagation des harmoniques. Cependant, malgré sa simplicité et son faible coût, ils dépendent essentiellement des caractéristiques du réseau. Cette technique nécessite de connaître le rang de chaque harmonique et demande de réaliser un filtre pour chaque harmonique que l'on veut diminuer. En fait, ces filtres ne sont pas adaptatifs et sont peu

efficaces quand les harmoniques sont variables. Sans oublier, que ces filtres connaissent des problèmes de vieillissement qui entraînent un décalage de la fréquence réduisant leur efficacité.

- La dernière solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif **[HAS 12].**Ces filtres s'adaptent en permanence aux courants harmoniques présents sur le réseau et permettent une compensation de tous les harmoniques. Ces filtres actifs se déclinent en différentes structures. Il existe une grande variété de commandes selon les courants (filtre parallèle) ou les tensions (filtre série) que l'on veut corriger.

I.5.3.3 Creux de tension

I.5.3.3.1 Reprise au vol

Le terme reprise au vol (ou fault ride through en anglais) désigne le fait de pouvoir recommencer à produire, tout de suite après le défaut, à condition que certaines grandeurs électriques ou mécaniques soient contrôlées de manière fine pendant le défaut **[LMRG 12]**.

Si la reprise au vol n'est pas assurée, une procédure d'arrêt d'urgence doit être enclenchée, puis une procédure de démarrage et enfin une procédure de couplage au réseau, ce qui occasionne une interruption de plusieurs minutes. C'est contraignant pour l'opérateur de réseau qui doit gérer un défaut sur le réseau mais aussi une interruption de production de puissance d'origine éolienne. C'est aussi gênant pour le producteur qui doit arrêter puis remettre en marche son éolienne (fatigue mécanique des composants). Il faut enfin signaler que la reprise au vol permettrait aux générateurs éoliens de participer au courant de court-circuit.

I.5.3.3.2 Solutions possibles

La possibilité de reprise au vol exige de pouvoir gérer l'excès de puissance pendant le défaut. Trois types d'action peuvent être proposés pour y parvenir : limiter la puissance entrante, stocker l'excédent de puissance ou dissiper cet excédent de puissance.

Limiter la puissance : Modifier l'angle de calage permet de freiner la turbine et limiter ainsi son accélération. Dans pratiquement toutes les structures, il y a cette possibilité de réduire la puissance captée par la turbine par une action rapide sur l'angle de calage des pales.

Stocker l'excédent de puissance entrante : Le stockage inertiel est effectué naturellement par l'accélération de la turbine lors de l'apparition du défaut. Nous avons vu précédemment que, au niveau du bus continu, nous pouvions insérer un moyen de stockage.

Dissiper l'excédent de puissance entrante : Cette stratégie consiste à rajouter au niveau du bus continu une résistance de dissipation pilotée par un interrupteur commandable. Cette résistance correctement dimensionnée peut aussi servir de résistance de freinage en

fonctionnement normal lors de l'arrêt de l'éolienne. Il s'agit du freinage rhéostatique, également utilisé dans la traction électrique.

Dans la GADA, le stator de la machine étant directement couplé au réseau, le défaut va affecter son état magnétique ainsi que sa vitesse de rotation. De plus, la présence des convertisseurs électroniques de puissance conduit à surveiller également le niveau de tension du bus continu.

Les constructeurs adoptant cette solution rajoutent au circuit rotorique des impédances (essentiellement des résistances) appelées circuit *crow bar* qui permet de bloquer le convertisseur connecté au rotor sans ouvrir les circuits des enroulements rotoriques (refermés sur ces impédances) pendant le défaut Figure.I.19. **[LMRG 12]**.

- La procédure mise en œuvre actuellement lors de la détection du défaut est la suivante **[LMRG 12]**.
- Blocage du convertisseur côté rotor ;
- Déconnexion du stator ;
- Fermeture du rotor sur des résistances de charge (circuit crowbar) entraînant une démagnétisation rapide de la génératrice ;
- Ouverture du rotor et remise en service du convertisseur côté rotor pour ré-magnétiser progressivement la génératrice ;
- Synchronisation et reconnexion du stator dès la disparition du défaut Pendant cette procédure, le convertisseur côté réseau reste connecté et travaille en limitation de courant tout en maintenant la tension du bus continu.

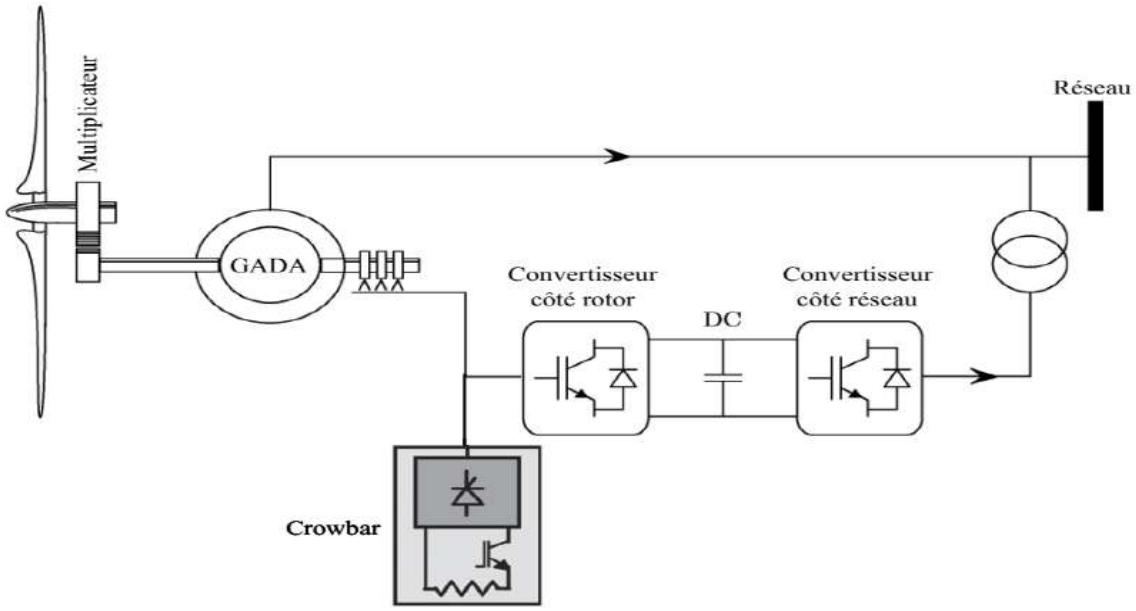


Figure.I.19. Eolienne équipée d'un crow bar actif.

I.5.4CONCLUSION

Différentes études concernant l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux de distribution ont été présentées, permettant de comprendre à la fois l'impact de cette énergie dans ces réseaux et celui du réseau sur la structure éolienne. Ainsi, nous avons décrit la problématique de la connexion des éoliennes au réseau et nous avons analysé les différents Composants ou stratégies à mettre en œuvre pour résoudre ces problèmes. Nous avons mis en évidence l'utilité du stockage permettant de lisser la production malgré les variations de vent. Nous avons étudié l'aspect qualité de l'énergie en nous intéressant, entre autres aux charges non linéaires qui génèrent des courants harmoniques se propageant à travers le réseau électrique. Les solutions de minimisation de ces harmoniques existent et fonctionnent correctement.

Les éoliennes à base de génératrices asynchrone à double alimentation arrivent à répondre aux différentes contraintes imposées par les défauts venant du réseau ; comme par exemple éviter les déconnexions intempestives. La mise en œuvre de solutions adéquates est cependant délicate comme par exemple le circuit crow bar. Nous avons alors réussi à montrer dans ce chapitre que la stratégie de commande proposé était tolérante (robuste) aux variations de fréquence et aux défauts asymétriques de la tension réseau. En effet, nous obtenons de bonnes poursuites des consignes de couple durant les défauts. Ceci permet bien évidement de maintenir un bon niveau de performances énergétique de l'éolienne.

Chapitre II

Modélisation de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation

II.1. Introduction

La Machine Asynchrone Double Alimentation a suscité un grand intérêt sur tout en tant que génératrice dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, à travers ce chapitre nous connaitrons les raisons d'un tel engouement en commençant par décrire la structure de cette machine, exposer ses différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées tout en citant ses avantages et ses inconvénients.

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations.

II.2 - Description du système

Figure.II.1. montre une topologie de conversion du GADA autonome connecté à une charge CC. Il comprend une éolienne, une boîte de vitesses, un GADA, un convertisseur de source de tension (VSC) et un redresseur à diodes. Le stator est connecté à la charge DC par l'intermédiaire d'un redresseur à diodes. Le rotor est connecté à la charge CC à travers un VSC. Un condensateur est ajouté en parallèle pour lisser la tension continue.

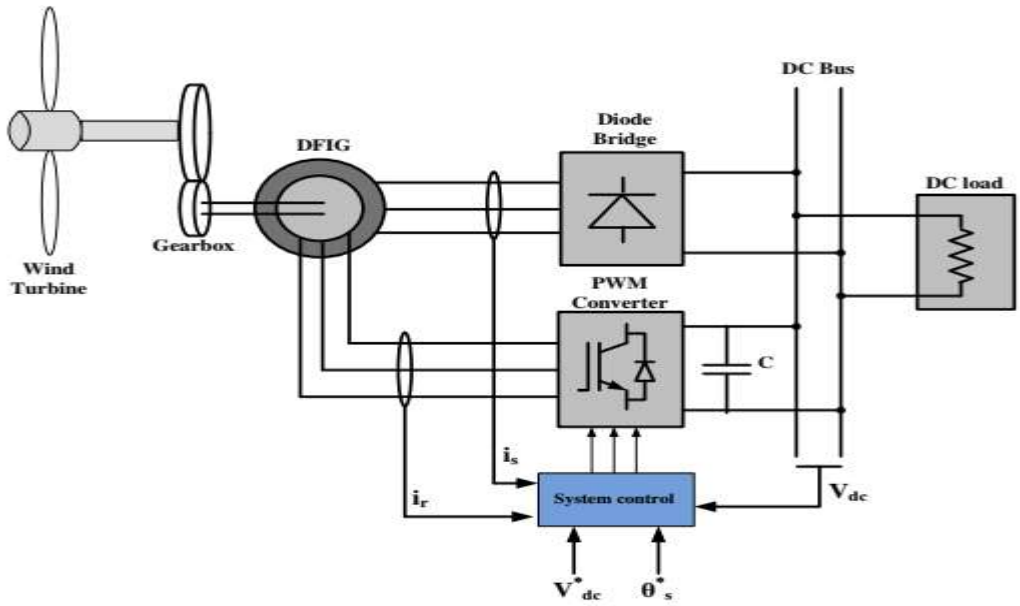


Figure.II.1. Schéma fonctionnel du GADA autonome connecté à une charge CC

II.3 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 **[BAA 16]**, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures.

Elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil 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 **[BAA 16]**. La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

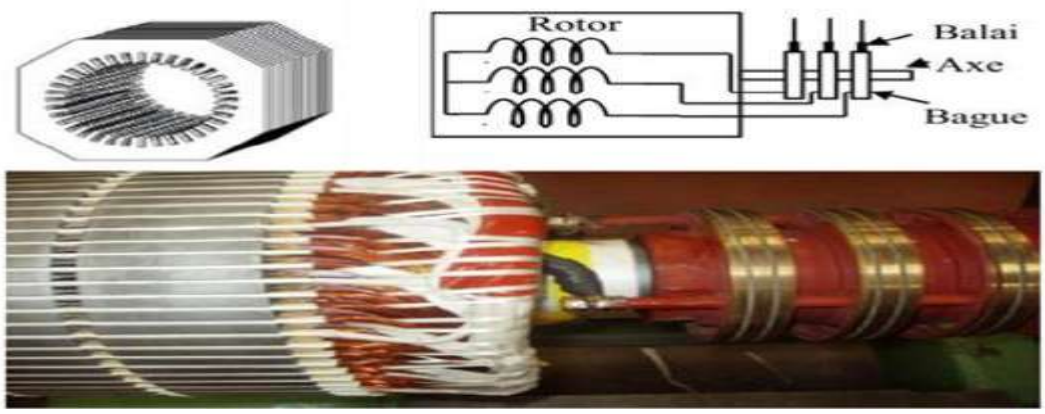


Figure.II.2. Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

II.3.1 - Machine à double alimentation en cascade asynchrone

La machine à double alimentation en cascade asynchrone (Cascad Doubly Fed Induction Machine) constituée de deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré sur la Figure.II.3. Le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur **[BAA 16]**

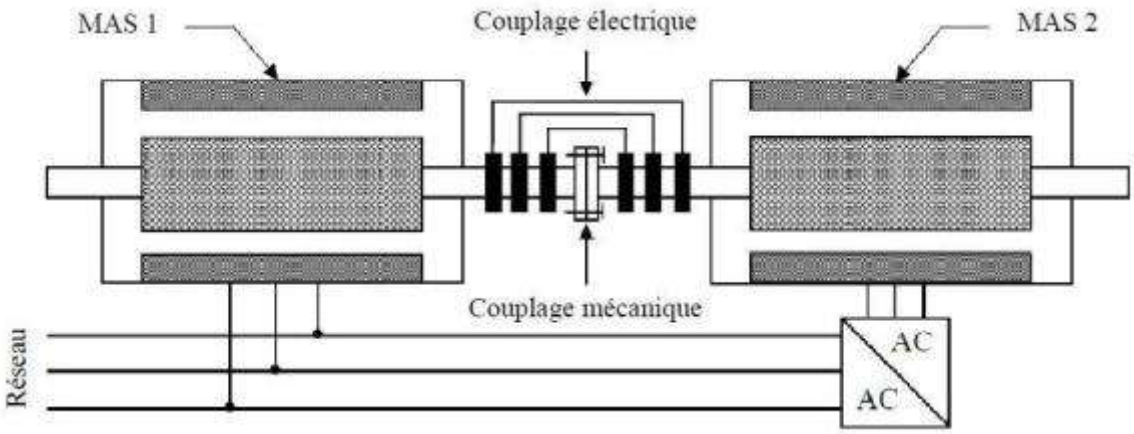


Figure.II.3. Schéma de principe de la MADA en cascade asynchrone.

Ce type de machines offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard **[BOY 06]**

II.3.2 Machine à double alimentation cascadée à un repère

Il s'agit de deux machines asynchrones à cage connectées mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La Figure.II.4. Présente le schéma de principe de cette machine, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur AC-AC.

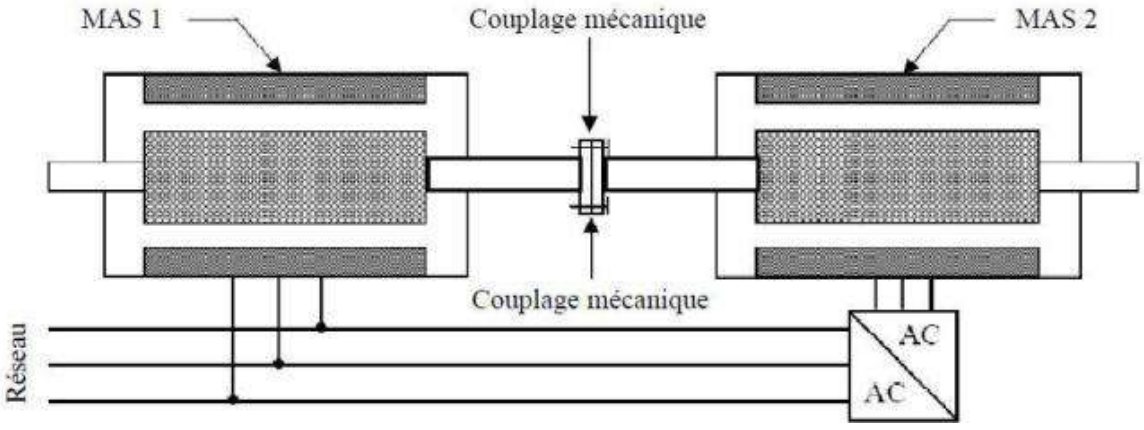


Figure.II.4. Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

II.3.3 MADA sans balais

Brushless Doubly Fed Induction Machine, cette machine a la particularité de posséder deux bobinages triphasés ayant des nombres de paires de pôles différents logés la même armature du stator. L'un des deux bobinages est connecté directement au réseau et est destiné au transfert de puissance. Le second bobinage, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine à travers un convertisseur AC/AC Figure.II.5. Le rotor de cette machine possède une structure spéciale différente de la cage d'écureuil classique mais tout aussi robuste: il est constitué de plusieurs boucles conductrices concentriques, où le nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

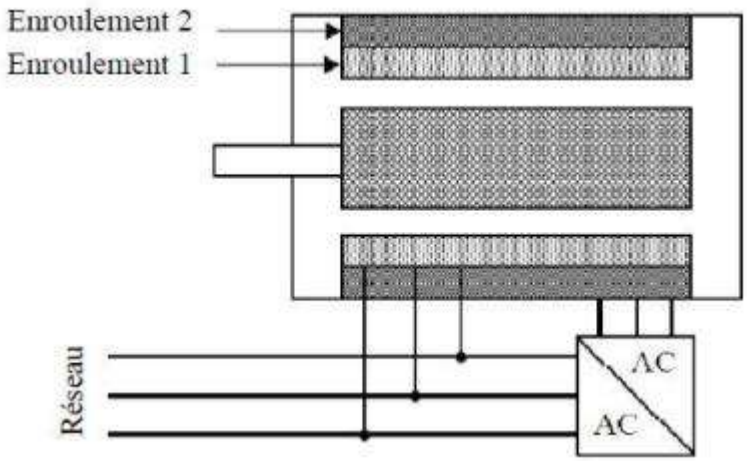


Figure.II.5. Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais.

Cette machine présente l'intérêt d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable, de plus le convertisseur placé entre le stator de faible puissance et le réseau est dimensionné uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et est donc moins volumineux et moins chère. La machine n'a pas de contacts glissants mais possède deux stators à nombre de pair de pôles différent ce qui augmente son diamètre et sa complexité de fabrication. Parmi les types de machines à double alimentation sans balais qui sont gagnés un grand intérêt ces dernières années, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable (Doubly Fed Reluctance Machine) qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable) **[HAS 12].**

II.3.4 Principe de fonctionnement

La machine asynchrone à double alimentation que nous allons étudier est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, dans 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 générateur.

II.3.4.1 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone :

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator tout comme et la puissance de glissement est aussi fournie par le stator Figure.II.6. La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

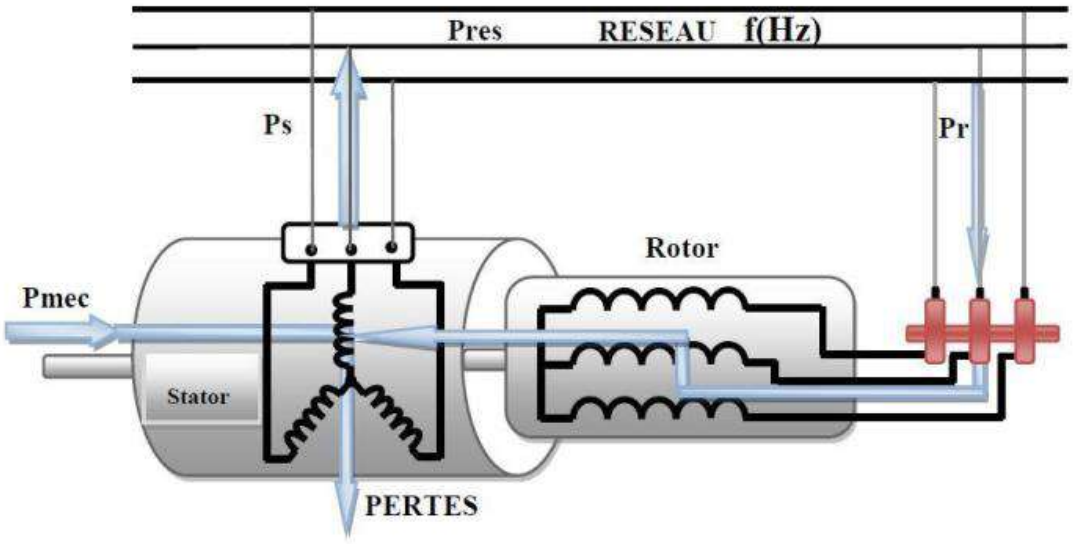


Figure.II.6. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

II.4 Aperçu sur la configuration de la MADA a rotor bobiné :

Comme toutes les autres machines électriques à courant alternatif, la MADA peut fonctionner en moteur comme en génératrice. Chaque mode de fonctionnement est caractérisé par une configuration qui répond à un critère choisit. Dans cette partie du chapitre, on va citer les configurations les plus utilisées, selon la littérature, pour chaque mode de fonctionnement.

II.4.1 Configuration pour application génératrice :

On dans cette configuration s'intéresse à la MADA à rotor bobiné et son utilisation pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

II.4.1.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure.II.7. 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 à IGBT ou GTO. Montre la technologie qui permet une variation limitée de la vitesse à environ 10% autour de celle de synchronisme par le changement de la résistance rotorique. Outre la plage de variation de vitesse limitée, l'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance rotorique dans les éléments résistifs **[TRI 13]**

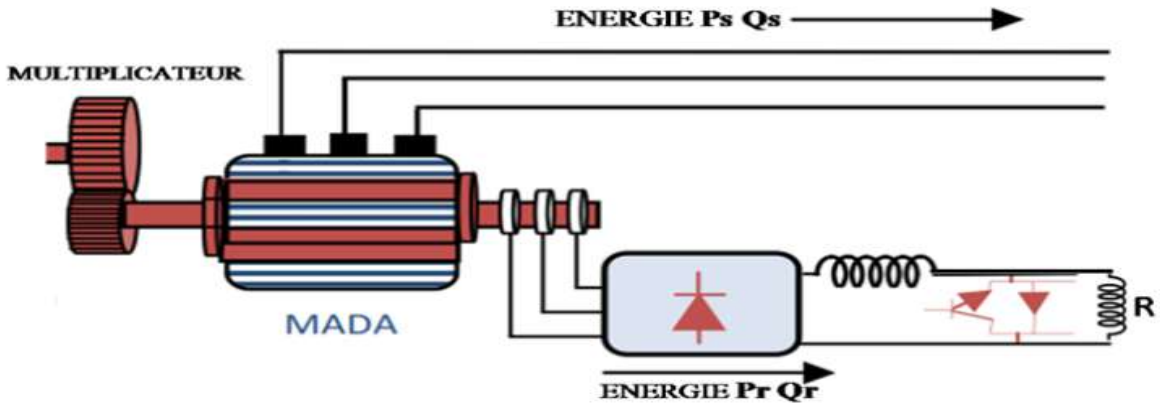


Figure.II.7. MADA à énergie rotorique dissipée.

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance

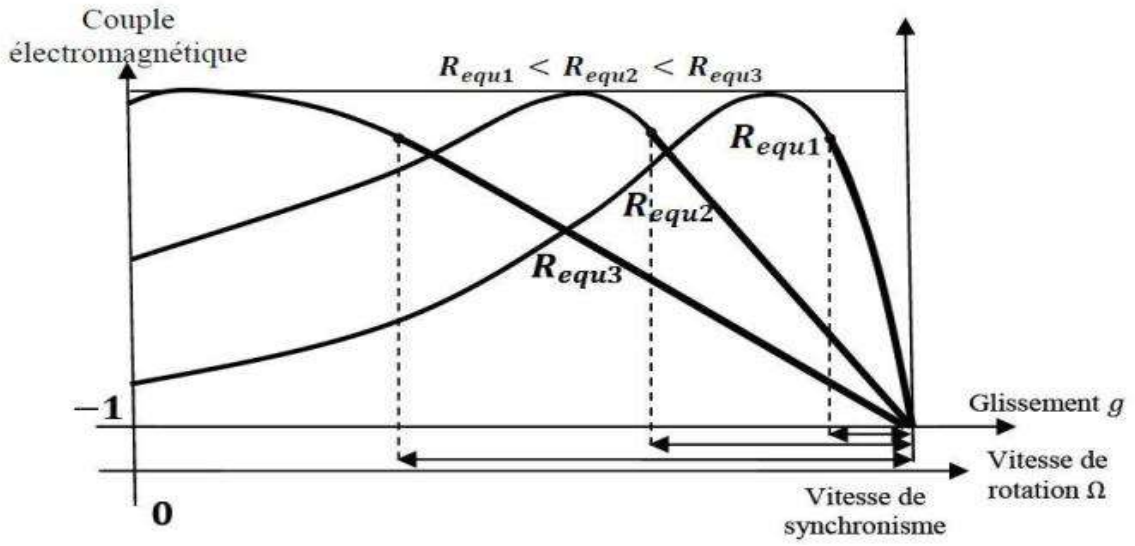


Figure.II.8. Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique.

II.4.1.2 MADA -structure de kramer :

Pour augmenter le rendement de la structure du système précédent, cette structure, Figure.II.9. Pour améliorer la structure du système précédent, tout en réduisant les pertes d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

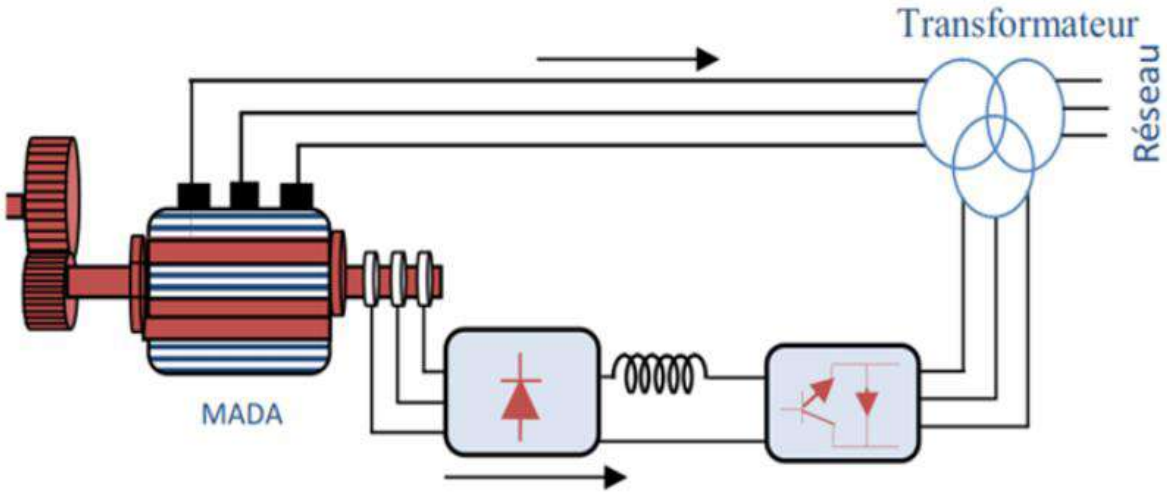


Figure.II.9. MADA, structure Kramer.

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. 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 solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT **[GA, GS 17].**

II.4.1.3MADA structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, cette topologie consiste a remplacée l'association redresseur-onduleur par un cyclo-convertisseur. La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Kramer, Cette variation peut être positive (fonctionnement hypo-synchrone) ou négative (fonctionnement hyper-synchrone). Comme dans le cas de la machine brushless, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance. L'inconvénient de cette structure est la génération

des perturbations harmoniques importantes qui diminue le facteur de puissance du dispositif. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT **[GA, GS 17].**

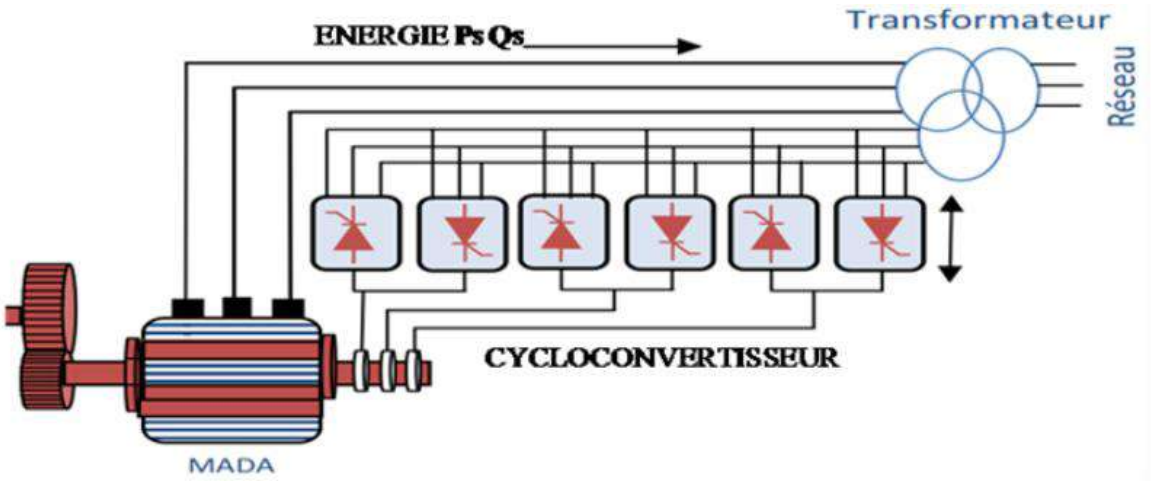


Figure.II.10. Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

II.4.1.4 MADA structure de scherbius avec convertisseurs MLI :

Une autre structure intéressante la Figure.II.11. utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau **[GA, GS 17].**

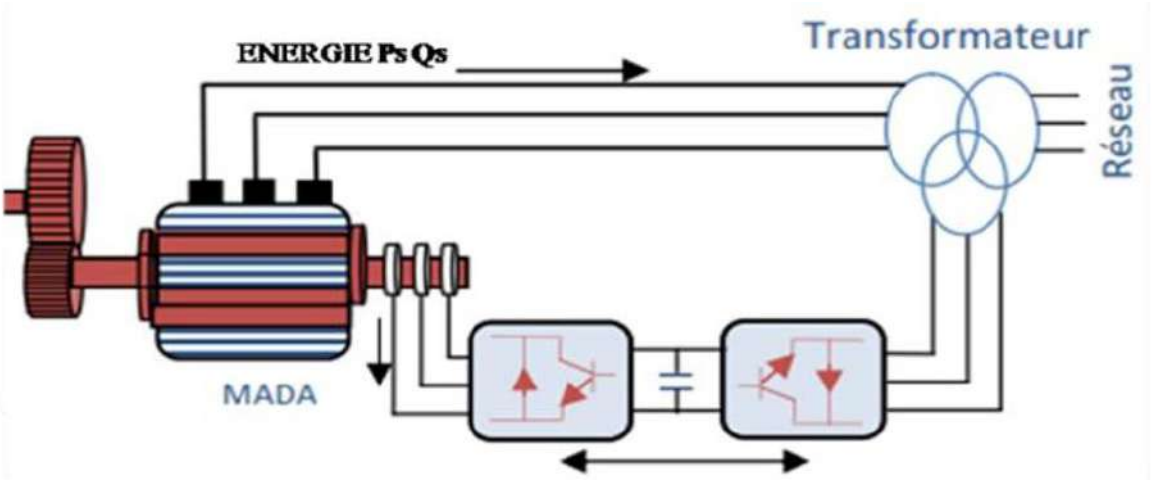


Figure.II.11. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Cette structure est alors particulièrement adaptée pour la génération d'électricité dans les systèmes et qui a fait l'objet du plus grand nombre d'études et d'applications.

II.5 Domaines d'application de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la "MADA" est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens, De plus, le fonctionnement en générateur présente la "MADA" comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que, **[GA, GS 17].**

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La "MADA" peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, tel que **[GA, GS 17].**

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc...

On note que les applications de la "MADA" en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage **[TG 11].**

II.6 Avantages et inconvénients de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation est couramment appelée machine généralisée. Sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue soit à une machine asynchrone classique en court-circuitant les enroulements rotoriques, soit à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative".

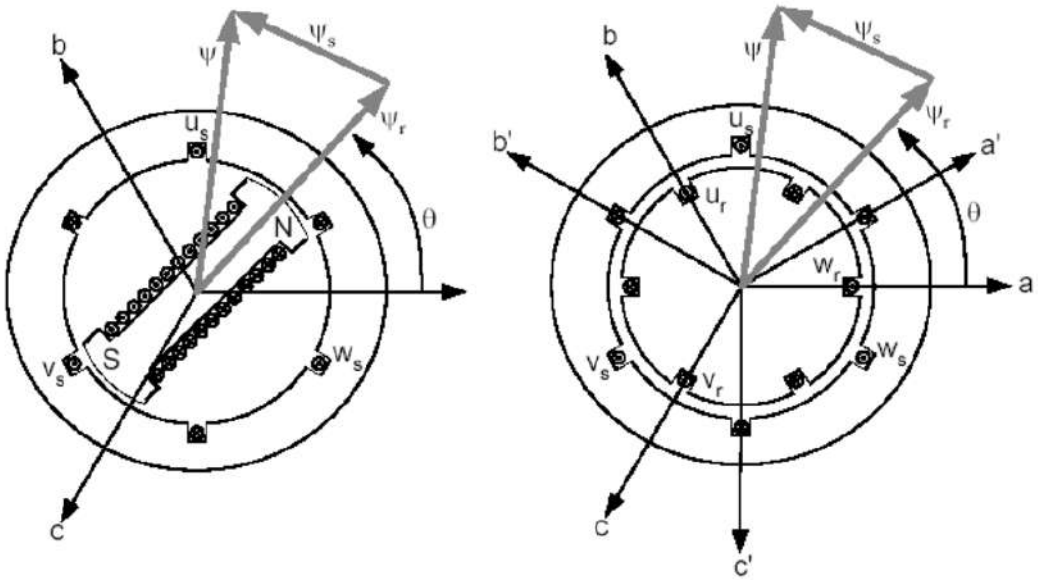


Figure.II.12. Enroulements et les flux dans une machine synchrone et dans une MADA.

Le vecteur flux φ présent dans l'entrefer de la machine représente la résultante des flux créés par les bobinages statoriques φ et du flux rotorique φ qui est créé soit par la rotation de la roue polaire alimentée en continu (MS) soit par l'alimentation alternative des bobinages rotoriques triphasés (MADA). Le remplacement de la roue polaire par le circuit triphasé alimenté en alternatif permet d'avoir un vecteur du flux rotoriqueφ qui a une amplitude et une phase totalement contrôlable par l'alimentation du circuit. Ainsi, la dynamique du flux dépend uniquement de la constante du temps électrique du système **[TG 11].**Dans ce contexte, il est clair que la machine asynchrone à double alimentation réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone en plus les avantages envisagés grâce à sa double alimentation. D'autre part, comme toutes les autres machines électriques, la MADA a des inconvénients qu'on va les citer ci-dessous.

II.6.1 Avantages de la MADA :

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permet de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous

permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.

- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de lavitesse.
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir:
- Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- Régulation découplée des puissances active et réactive.

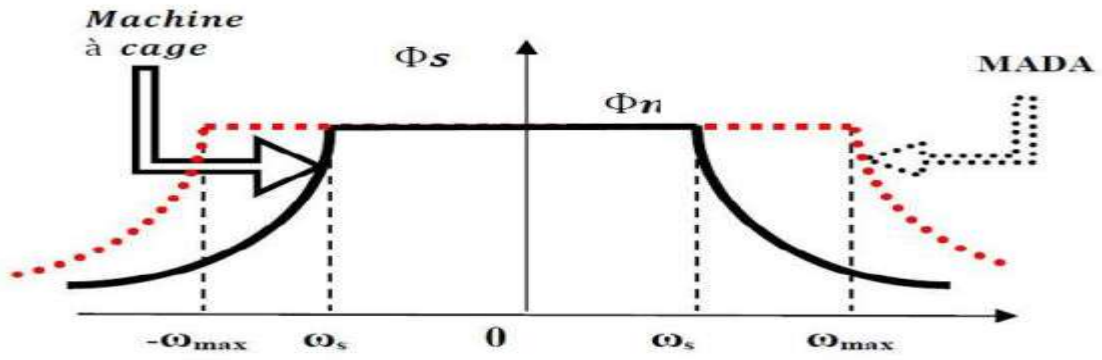


Figure.II.13. Comparaison de zone de fonctionnementEn survitesse entre la machine à cage et la MADA.

II.6.2. Inconvénients de la MADA :

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

II.7 Application des machines asynchrones à double alimentation :

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie.

II.7.1 Application génératrice :

Grâce à sa capacité de fonctionner dans une large gamme de vitesses, la MADA est devenue la solution adaptée pour l'énergie éolienne. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet d'avoir des tensions statoriques à fréquence et amplitude fixes quel que soit la vitesse de rotation de son arbre. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions **[TG 11].**
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

II.8. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La génératrice asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité.

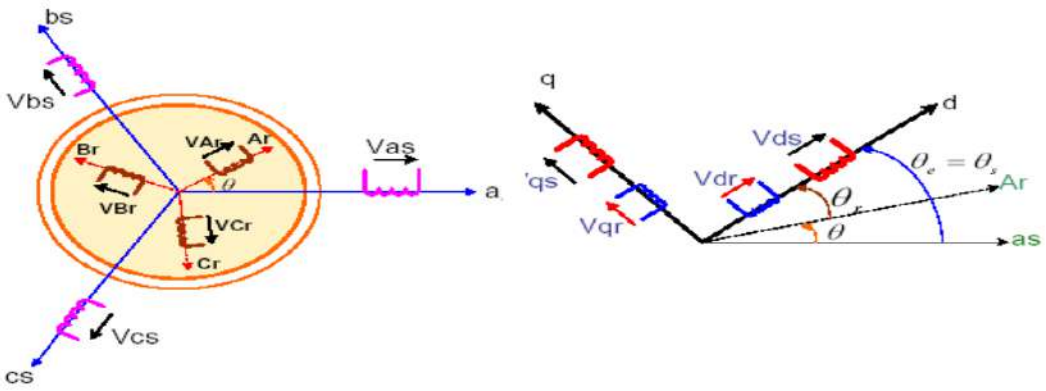


Figure.II.14. Représentation de la MADA dans les deux repères.

II.8.1. Hypothèses simplificatrices :

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.
- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

II.8.2 Equations électriques et l'équation mécanique de la MADA :

II.8.2.1 Equations électriques :

$$\begin{Bmatrix} [Vs] = [Rs.Is] + \dfrac{d}{dt}[\varphi s] \\ [Vr] = [Rr.Ir] + \dfrac{d}{dt}[\varphi r] \end{Bmatrix}$$

On a aussi :

$$[Vs] = \begin{bmatrix} Vas \\ Vbs \\ Vcs \end{bmatrix} \quad ; \; [Is] = \begin{bmatrix} Ias \\ Ibs \\ Ics \end{bmatrix} \; ; [Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix}$$

$$[Vr] = \begin{bmatrix} Var \\ Vbr \\ Vcr \end{bmatrix} \quad ; \; [Ir] = \begin{bmatrix} Iar \\ Ibr \\ Icr \end{bmatrix} \; ; [Rr] = \begin{bmatrix} Rr & 0 & 0 \\ 0 & Rr & 0 \\ 0 & 0 & Rr \end{bmatrix}$$

Où Rs et Rr sont respectivement la résistance des enroulements statoriques et rotoriques.

Et les équations des flux sont données par :

$$\begin{Bmatrix} [\varphi s] = [Lss].[Is] + [Msr].[Ir] \\ [\varphi r] = [Lrr].[Ir] + [Mrs].[Is] \end{Bmatrix}$$

Avec :

$$[Lss] = \begin{bmatrix} Ls & Ms & Ms \\ Ms & Ls & Ms \\ Ms & Ms & Ls \end{bmatrix} \quad ; \; [Lrr] = \begin{bmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Mr \\ Mr & Mr & Lr \end{bmatrix}$$

Où Lss , Lrr :sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques.

Ms, Mr : sont les inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

$[Msr]$: est la matrice des inductances mutuelles ou matrice de couplage stator-rotor donnée par :

$$[Msr] = [Mrs]^t = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Avec : $[Msr] = [Mrs]^t$ et $[Msr]$=est l'inductance mutuelle stator-rotor

M_{max} **:** Est Mutuelle max entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant les flux par leurs expressions dans **(**III.1**)**, on obtient :

$$\begin{cases} [Vs] = [Rs.Is] + \dfrac{d}{dt}([Lss].[Is] + [Msr].[Ir]) \\ [Vr] = [Rr.Ir] + \dfrac{d}{dt}([Lrr].[Ir] + [Mrs].[Is]) \end{cases}$$

II.8.2.2 Equations mécanique

L'équation mécanique de la machine est représenté par :

$$C_{em} = \mathrm{Cr} + f_r.\Omega + \mathrm{J}\frac{d\Omega}{dt\theta}$$

Avec respectivement :

$\mathrm{C_{em}}$**:** Le couple électromagnétique du la machine.

Cr**:** Le couple résistant.

$\mathrm{f_r}$**:** Le coefficient de frottement visqueux de la MADA.

Ω**:** la vitesse de rotation de l'axe de la MADA.

$\mathrm{J}\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{dt}\theta}$**:** l'inertie des parties tournantes.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_{em}=\mathrm{P}\,[Is]^{t}\,\frac{d\Omega}{dt\Theta}[[\mathrm{Msr}].\,[\mathrm{Ir}]]$$

II.8.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q)

II.8.3.1 La Transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui permet de transformer les grandeurs statoriques et rotoriques triphasées en grandeurs équivalentes représentées dans un repère orthogonal. Elle est constituée d'une transformation triphasée- biphasée « du repère (a, b, c) au repère (α, β) », suivie d'une rotation « du repère (α, β) au repère (d, q) ».

La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$\mathrm{P}\,(\Theta)=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\Theta) & \cos(\Theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta-\frac{4\pi}{3})\\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta-\frac{4\pi}{3})\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix}$$

Et on a aussi :$[Xdq0]=[Xabc][\mathrm{P}(\Theta)]$

II.8.3.2 Application de la transformation de Park

En appliquant cette transformation sur chacun des vecteurs tensions, courants et flux statoriques et rotoriques, on obtient les équations des flux (III.6) et des tensions (III.7) et (III.8)

$$\begin{cases}\varphi sd = Ls.Isd + MIrd\\ \varphi sq = Ls.Isq + MIrq\end{cases}\begin{cases}\varphi rd = Lr.Ird + MIsd\\ \varphi rq = Lr.Irq + MIsq\end{cases}$$

$Lr\ et\ Ls$: sont les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.

M: L'inductance mutuelle.

φsd Et, φsq et φrq sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système

$$\begin{cases}Vsd = Rs.Isd + \dfrac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_e\varphi_{sq}\\ Vsq = Rs.Isq + \dfrac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_e\varphi_{sd}\end{cases}$$

$$\begin{cases} Vrd = Rr.Ird + \dfrac{d\varphi_{rd}}{dt} - (W_e - W)\varphi_{rq} \\ Vrq = Rr.Irq + \dfrac{d\varphi_{rq}}{dt} + (W_e - W)\varphi_{rd} \end{cases}$$

Où $W_e = \frac{d\Theta_e}{dt}$ et $W = \frac{d\Theta_e}{dt}$ **:** sont respectivement les pulsations électriques et mécanique.

Tel que :$\Theta_e = \Theta + \Theta_r$

En choisissant le repère lié au champ tournant ($W_e = W_s$), car c'est le mieux adapté lors d'une étude de la commande des machines [40], on obtient les équations générales de la MADA :

$$\begin{cases} Vsd = Rs.Isd + \dfrac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s\varphi_{sq} \\ Vsq = Rs.Isq + \dfrac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s\varphi_{sd} \\ Vrd = Rr.Ird + \dfrac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r\varphi_{rq} \\ Vrq = Rr.Irq + \dfrac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r\varphi_{rd} \end{cases}$$

Avec respectivement :

Vsd, Vrd, Vsq, Vrq Sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé ;

W_s Et W_r sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$C_{em} = \mathrm{P}\,\frac{M}{Ls}\,(Ird.\varphi_{sd} - Irq.\varphi_{rd})$

Avec P le nombre de paires de pôles de la MADA.

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = Vsd.Isd + Vsq.Isq \\ Q = Vsq.Isd - Vsd.Isq \end{cases}$$

II.9.coclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la structure d'une machine asynchrone à double alimentation que envisagées dans l'industrie où nous avons effectué une présentation de ses différentes configurations.

Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter cette machine, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait en fonctionnement générateur. L'analogie de fonctionnement qui peut être faite avec les machines synchrones dans la configuration des flux a conduit à dénommer cette machine, "machine généralisée".

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons par la suite, établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d −q) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK.

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation en puissance active et réactive au chapitre suivant.

Chapitre III
Commande vectorielle de la GADA

III.1 Introduction

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de BLONDEL sur la théorie de la réaction des deux axes]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) **[BAA 16].**

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d − q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. **[BOY 09].**

Plusieurs méthodes de commande des "MADA" sont apparues, parmi elles, la commande vectorielle. Son principe de base est de rendre ces machines semblables du point de vue commande à une machine à courant continu à excitation séparée

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentation aussi bien en fonctionnement générateur. Mise en équation de la "MADA" nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans le chapitre précédent. Nous allons maintenant procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande. Dans un premier temps, la synthèse d'un régulateur « Proportionnel – Intégral » est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la "MADA" en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation. Quelques résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la machine. Ensuite, on calcule le régulateur nécessaire pour la commande, et enfin on termine par les résultats de la simulation qui signifier la validation de commande.

III.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator.

La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d − q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer.

Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique.

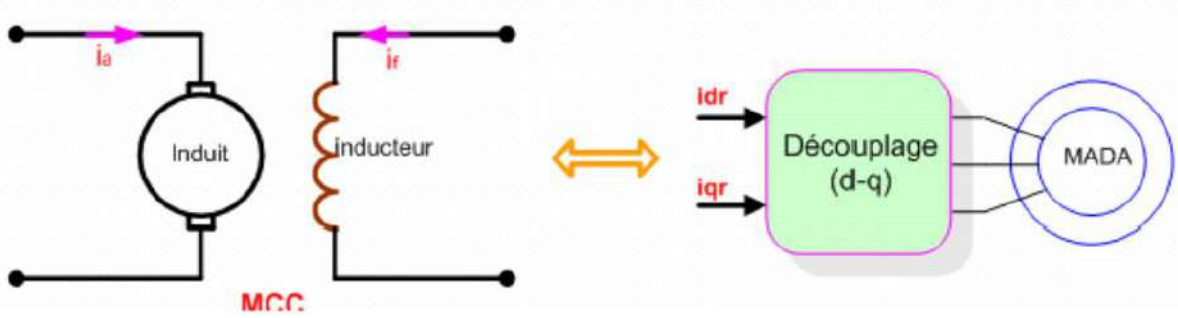


Figure III.1. Principe de la commande vectorielle.

III.3. Etablissement du modèle de la GADA

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère (d− q) afin que l'axe 'd'soit aligné sur le flux statorique.

On rappelle d'abord le système équations différentielles de la génératrice décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant qui est donné par :

$$\begin{cases} Vsd = Rs.Isd + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s\varphi_{sq} \\ Vsq = Rs.Isq + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s\varphi_{sd} \\ Vrd = Rr.Ird + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r\varphi_{rq} \\ Vrq = Rr.Irq + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r\varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

$$\omega_s = \omega_r - \omega_m \quad \text{(III.2)}$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = Ls\ isd + Mird \\ \varphi_{sq} = Ls\ isq + Mirq \\ \varphi_{rd} = Lr\ ird + Misd \\ \varphi_{rq} = Lr\ irq + Misq \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

$$L_s = L_{fs} + M\ ;\ L_r = L_{fr} + M \quad \text{(III.4)}$$

Le couple électromagnétique est exprimé par :

$$T_e = p(\varphi_{sd} isq - \varphi_{sq} isd) \quad \text{(III.5)}$$

Les puissances du rotor et du stator sont exprimés comme suit:

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} isd + V_{sq} isq \\ Q_s = V_{sq} isd - V_{sd} isq \\ P_r = V_{rd} isd + V_{rq} isq \\ Q_r = V_{rq} isd - V_{rd} isq \end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

En choisissant un cadre d'axe d-q en rotation synchrone le flux du stator φs est maintenu aligné avec l'axe d (Figure.2), nous pouvons écrivez :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = Mim \\ \varphi_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

$$\begin{cases} V_{rd} = \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{M}{Ls}\frac{d\varphi_s}{dt} + Rrird - \omega_r \sigma L_r irq \\ V_{rq} = \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + Rrirq + \omega_r \sigma L_r ird + \omega_r \frac{M}{Ls}\varphi_s \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

Où $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ est le facteur de fuite de l'induction Générateur.

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s}\varphi_s \\ \varphi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

En découplant le vecteur, les équations (5) et (10) sont utilisées pour exprimer le couple électromagnétique, en fonction du rotor couranti_{rq}.

$$T_e = -p\frac{M}{L_s}\varphi_s i_{rq} \quad \text{(III.12)}$$

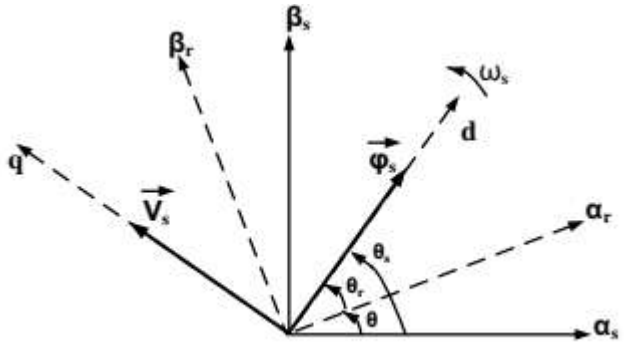


Figure III.2. Vecteurs de flux et de tension.

III.4. Technique de commande

Dans le système représenté par la Figure III.3, l'objectif principal est de contrôler la tension continue par conséquent la tension du stator et fréquence pour diverses conditions de charge et vitesses de générateur. Deux boucles de contrôle indépendantes sont conçues pour réguler le courant continu et l'amplitude de tension et fréquence du stator.

Le contrôle du champ orienté est utilisé pour découpler l'actif et des boucles de contrôle réactives. La référence actuelle ird* sera utilisé pour contrôler la tension continue. Le contrôle de fréquence est obtenu en ajustant la référence de courant du rotor de l'axe q irq*.

La valeur de la tension continue est déterminée en utilisant expression suivante [9]:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_s \quad \text{(III .13)}$$

Selon 13, la tension continue est régulée par la tension du stator. La tension du stator est contrôlée par le flux du statorφ_s. L'équation (8) montre que le flux du stator doit être régulation en utilisant le courant magnétisanti_m.

L'équation qui décrit le courant magnétisant est comme suit:

$$i_m = i_{rd} + \frac{L_s}{M}i_{sd} \quad \text{(III.14)}$$

Ainsi, le courant de référence $i_{rd}{}^{*}$ peut être calculé par l'équation suivante:

$$i_{rd}{}^{*} = i_m - \frac{L_s}{M} i_{sd} \quad \text{(III.15)}$$

La boucle de contrôle de tension continue est conçue pour réguler grandeur de tension (Vdc) de la tension du bus DC. L'axe d le courant du rotor modifie le courant magnétisant, par conséquent le flux du stator qui modifie également les tensions du stator, modifie par conséquent la tension continue.

Le courant de référence$i_{rq}{}^{*}$ est donné par :

$$i_{rq}{}^{*} = -\frac{L_s}{M} i_{sq} \quad \text{(III.16)}$$

L'angle de glissement Θ_r est calculé à partir de l'équation suivante:

$$\Theta_r = \Theta_s - \Theta_m \quad \text{(III.17)}$$

Où (Θ_s) : est l'angle calculé en intégrant la fixe vitesse électrique($\omega_s{}^{*}$).

Les courants de rotor de l'axe d-q sont contrôlés en utilisant contrôleurs proportionnels-intégrales (PI) qui génèrent des références tensions de rotor ($V_{rd}{}^{*}$ et $V_{rq}{}^{*}$) .Les tensions de rotor de référence sont obtenues en ajoutant les conditions de compensation aux contrôleurs sorties ($V_{rd}{}'$ et $V_{rq}{}'$) selon (18) [10].

$$\begin{cases} V_{rd}{}^{*} = V_{rd}{}' + (\omega_s - \omega_r)\sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq}{}^{*} = V_{rq}{}' + (\omega_s - \omega_r)(\sigma L_r i_{rq} + M i_{ms} \end{cases} \quad \text{(III.18)}$$

Le diagramme de la stratégie de contrôle proposée associé au DFIG autonome connecté à une charge DC est illustré à la Figure.III.3.

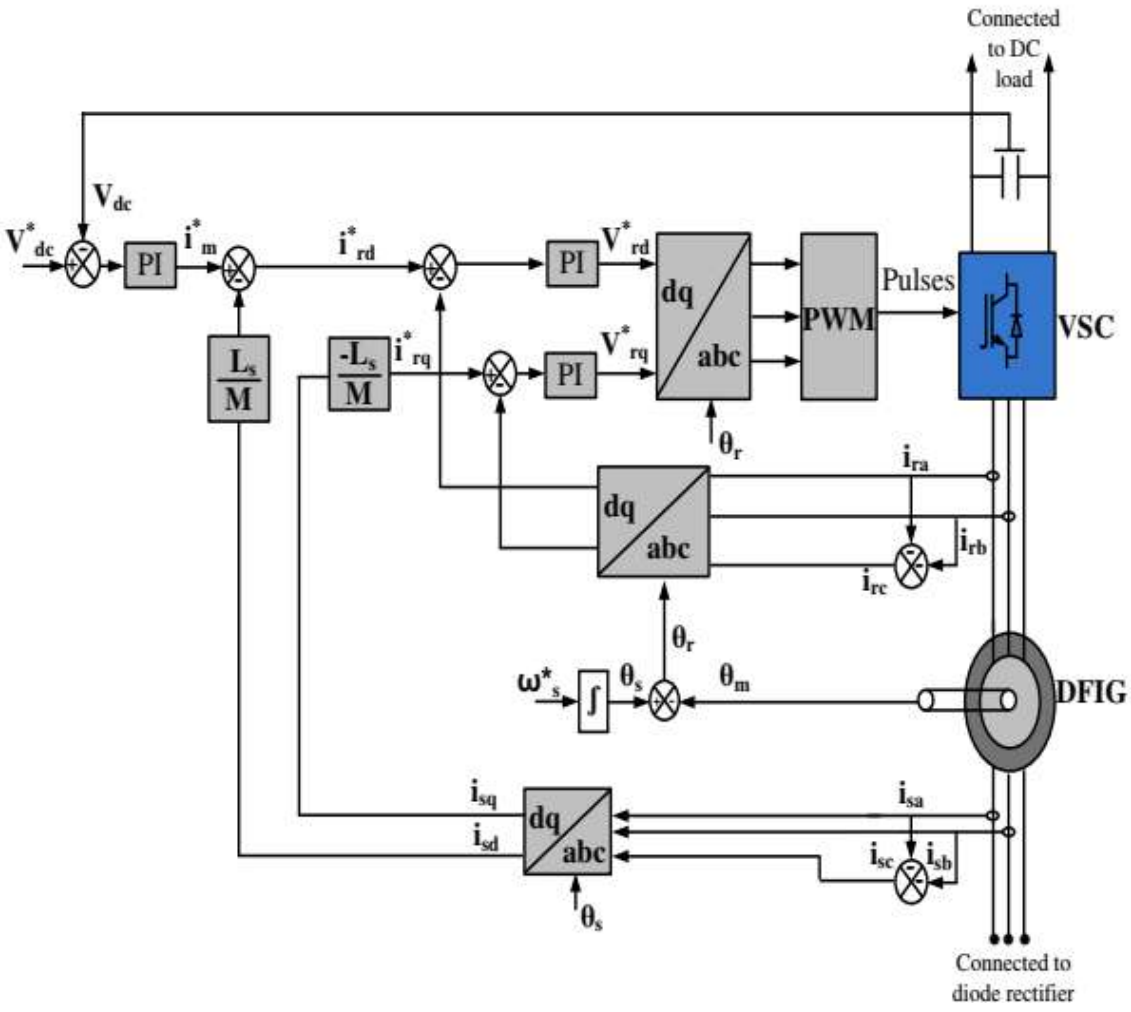


Figure III.3. Diagramme de contrôle du DFIG connecté à un contrôleur de domaine charge.

III.5. Résultats de Simulation

Le but de cette section est de tester le système pour détecter application de la charge continue lorsque le générateur de vitesse est constant. Les paramètres du système global sont définis dans le tableau I. Initialement, le système fonctionne avec une résistance de charge CC RL = 200Ω. A t = 1 s, une autre charge RL = 600Ω est connectée parallèle. La résistance totale égale à 150Ω. À t = 2 s ceci charge DC supplémentaire est déconnectée pour ajouter le système à son Etat initial.

Les différents résultats sont montrés ici sur les figures III (4, 5, 6, 7, 8,9).

Rs	1.32 Ω	Puissance nominale	3.7 kW
Rr	1.708 Ω	Tension nominale	400 V
Lfs	6.832 mH	Courant nominale de stator	12 A
Lfr	6.832 mH	Courant nominale de rotor	18 A
M	0.219 H	Fréquence nominale	50 Hz
J	0.1878 Kg.m²	Nombre de paires de pôles	2

Tableau III.1. Paramètre de GADA

Le résultat de la simulation de la tension continue figure .4 fonctionnement en régime permanent, l'erreur de la tension continue devient égal à zéro. Un petit dépassement apparaît après le soudain les changements de la résistance de charge DC qui est acceptable pour DC charger des applications. La puissance Active et réactive statorique représentée sur la Figure.III.5 Figure.III.6 est constante car la tension continue est égale à la valeur de référence quelle que soit la charge.

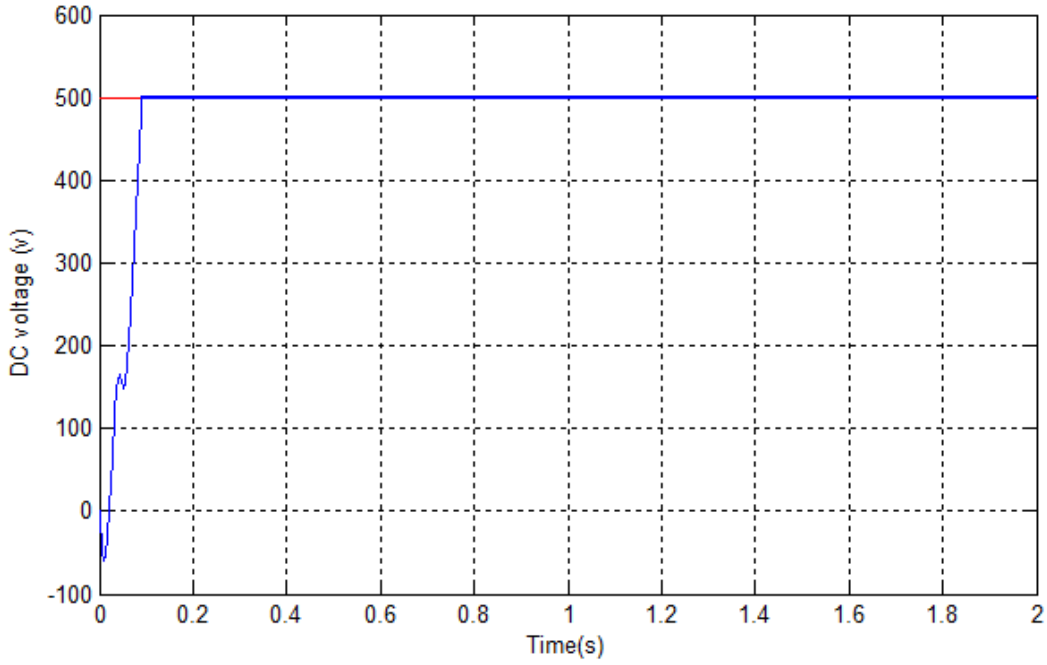


Figure III.4. Réponse en tension continue à un changement d'étape de la résistance de charge.

Le courant du stator varie en fonction de la variation de la puissance de charge. La diminution de la résistance à la charge donne l'augmentation de la valeur de le courant et ainsi de suite. La Figure.7 montre le temps agrandi. La fréquence du stator est représentée sur la Figure.8.il reste inchangé tout au long de la simulation. La fréquence de stator a de très petites variations à l'instant de changement de charge. L'impact du changement de charge sur l'évolution du courant de rotor est représenté sur la Figure.9.Quelques variations dans le courant de rotor est montré en raison du chargement variable.

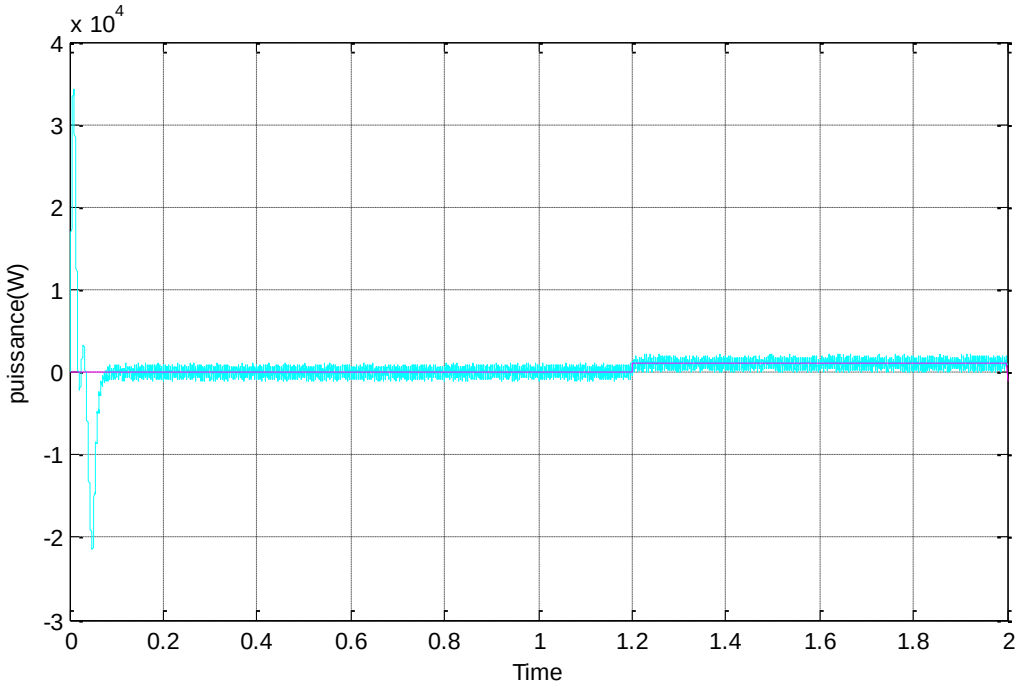


Figure III.5. La puissance Réactive Statorique

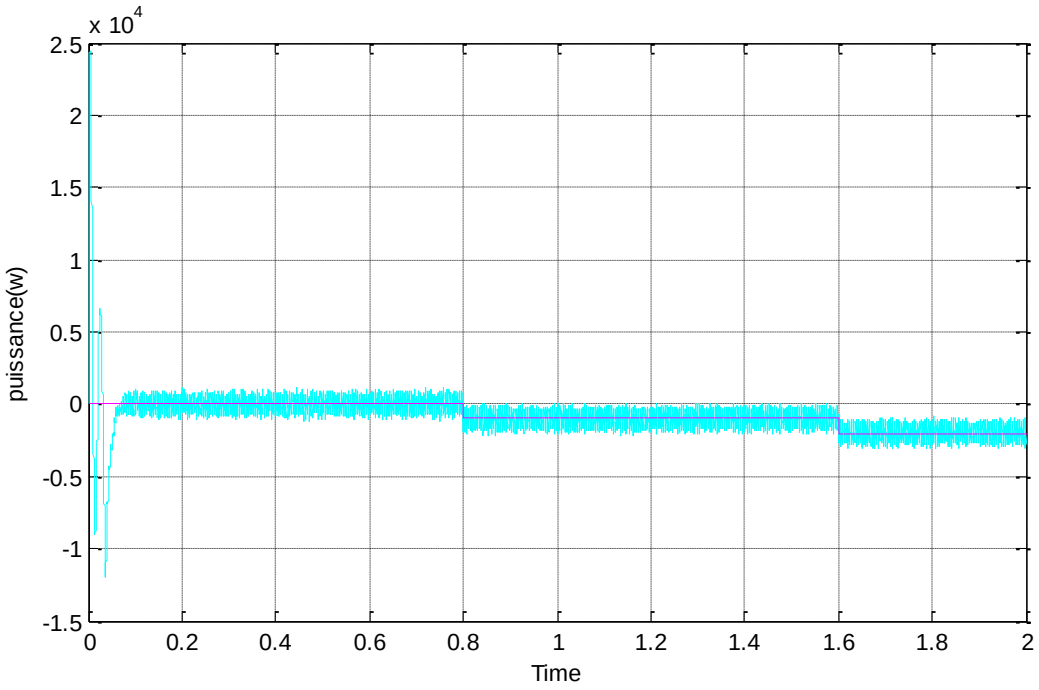


Figure III.6. La puissance active Statorique

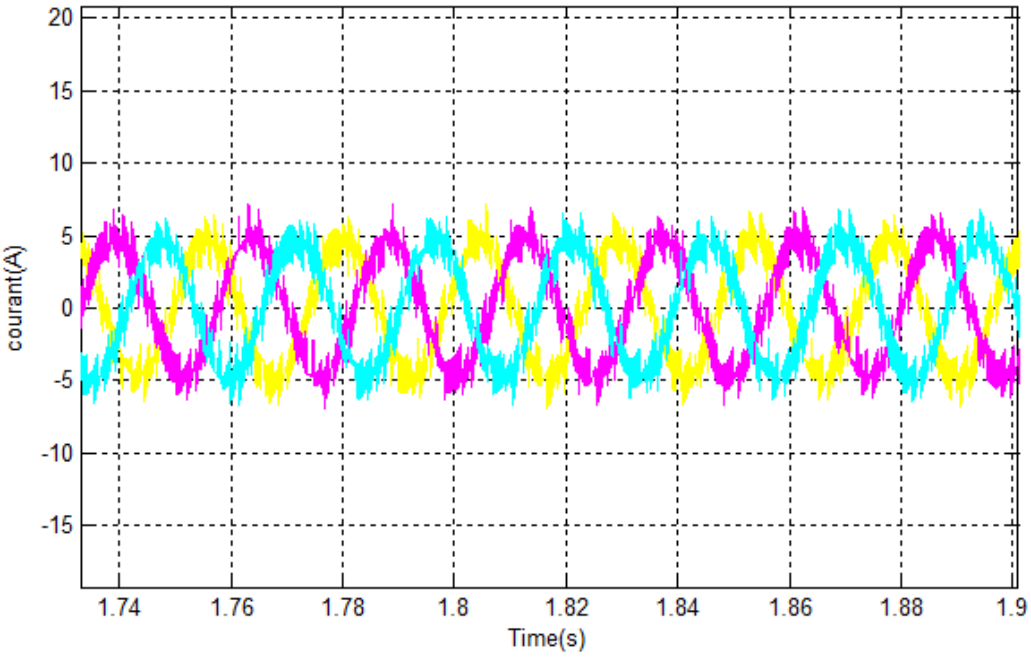


Figure III.7. Courants du stator triphasé.

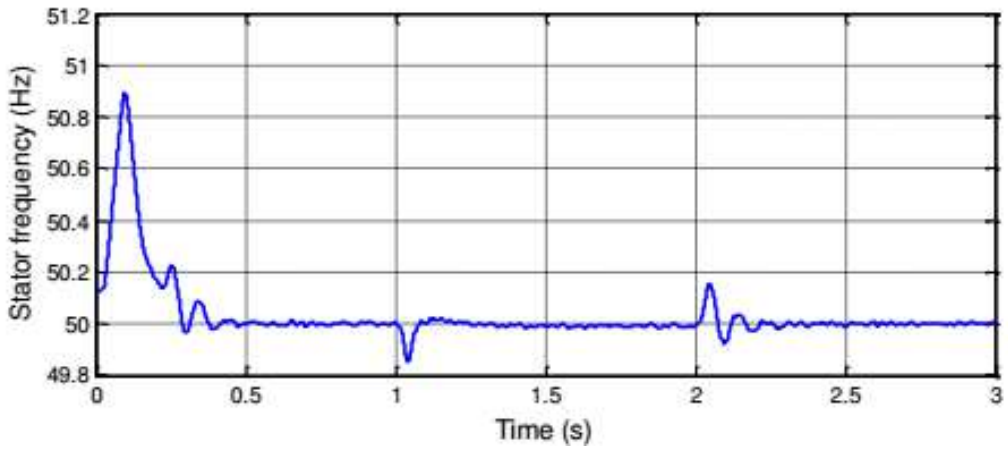


Figure III.8. la fréquence du stator.

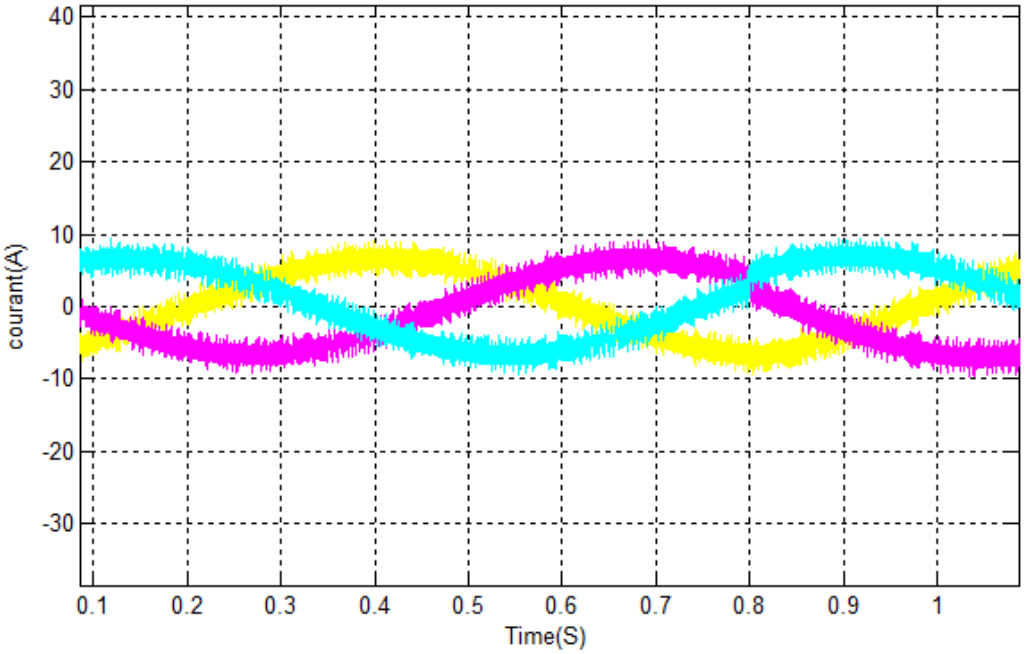


Figure III.9. Courants du rotor.

III.6. Interprétation des résultats :

Les performances du système autonome DFIG ont été évaluées par simulation Le système est stable aux variations de la charge DC. La proposition stratégie de contrôle montre de bonnes performances contre le changement de charge.

III.7. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe .La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA reste la méthode la plus répondue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. Dans ce chapitre, on à présenter les résultats de simulation dans le cas sans onduleur et dans le cas de l'association de l'onduleur avec la GADA.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne, la modélisation et la commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, ensuite utiliser ce modèle pour élaborer la stratégie de commande qui permet l'amélioration de la qualité de production de l'énergie électrique. Afin d'atteindre ces objectifs et vu la complexité du système, nous avons étudié chaque partie du système dans un chapitre séparé.

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits.

En suite dans le deuxième chapitre, notre objectif s'est orienté verset la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation « GADA », ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages. Nous avons exposé la modélisation de cette machine en utilisant la transformation de PARK, Les résultats de simulation de ce modèle nous confirment la possibilité de double alimentation par la stabilité des différentes grandeurs de la génératrice.

Dernièrement le troisième chapitre présente la commande vectorielle à orientation du flux statorique. Ou on a exprimé les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor.

Références bibliographiques

Liste de référence

[**BAA 16] :** Ben Amar Asma, "Etude du command d'un système éolienne base sur une GADA " mémoire de magister. Université El-Oued.24/04/2016.

[BOU 09] : A. BOULAHIA, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", mémoire de magister, université de Constantine. 28/04/ 2009.

[BOY 06] : A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne"**,** thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy. 11/12/2006.

[DEN 10] : A. DENDOUGA,"Contrôle de Puissance Active et Réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (DFIG) ", mémoire de magister, Université de Batna. 2010.

[HAS 12] : M.A HASSAD**,** "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques", Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).2012.

[**GA, GS 17] :** GUASMI Abdenour ; GUELMINE Saïd, «Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA" mémoire master académique. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA. 2017.

[GAN 11] : T. GHENNAM, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", Thèse de Doctorat, Université Polytechnique d'Alger, 29/09/2011

[GWE 10]: Global Wind Energie Council, *"Global Wind 2008 Report",* disponible sur le site: http://www.gwec.net.01/2010.

[KHO 06] : S. KHOJET EL KHIL, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)". Thèse doctorat, L'institut National Polytechnique de Toulouse 2006.

[LMRG 12] : Lina Maria Ruiz Gomez, "Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques approches techniques et économiques" Thèse de Doctorat. Université de Grenoble.2012.

[MEL 11] : A. MELLOUL, "Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne", mémoire de magister université Ferhat Abbas — Sétif. 07/06/2011.

[TG11] : Tarak GHENNAM, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation" Thèse de Doctorat. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger Ecole Centrale de Lille. 29/09/2011

[TMK 15] : Touati Mustapha Kamel " Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique" mémoire de magister. Université de Batna. 15/01/2015.

[TOU 15] : M. K. TOUATI, "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique", Mémoire de Magister, Université de Batna**,** 15/01/2015.

[TRI 13] : F.Z. TRIA, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", mémoire de magister, Université d'El- oued. 2013.

Annexe

Annexe

- Données de la machine asynchrone à double alimentation (GADA)

Valeurs nominales :

Puissance nominale : P_n = 3.7 kW

Tension nominale : U= 400 V

Courant nominale de stator : In_s =12 A

Courant nominale de rotor : In_r=18 A

Fréquence nominale : f =50 Hz

Nombre de pairs de pôles : P= 2

Paramètre :

R_s =1.32 Ω

R_r =1.708 Ω

Lf_s =6.832 mH

Lf_r =6.832 mH

M =0.219 H

Constantes mécaniques :

J = 0.1878 Kg.m²