

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SETIF 1
(ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté des sciences de l'ingénieur
Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

Magister en Electrotechnique

Option : Commande électrique

Par

HASSAD Mohamed Amine

Thème

**Influence de la commande d'une GADA des
systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux
électriques**

Soutenue le / / devant le jury composé de :

Dr. SAIT BELKACEM	M.C . Université de Sétif	Président
Dr. HEMSAS KAMEL EDDINE	M.C . Université de Sétif	Rapporteur
Dr. HACHEMI MABROUK	M.C . Université de Sétif	Examineur
Dr. HARMAS Med NAGUIB	M.C . Université de Sétif	Examineur

Sétif 2012

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Allah

Je tiens à remercier le Docteur HEMSES KAMEL EDDINE, Maître de conférences classe A à l'université FERHAT ABBAS de Sétif. Directeur de ce mémoire. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines et scientifiques. Son encadrement m'a offert la possibilité de réaliser ce travail et qui m'a permis d'élargir mon spectre de connaissances scientifiques.

Je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail

Merci à mes enseignants et à mes collègues depuis le primaire jusqu'à présent.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ceux qui sont les plus chers du monde : Mes parents

Mes frères et sœurs.

Toute la famille HASSAD

Tous mes amis sans exception

Tous ceux qui veulent lire

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités et description des systèmes éoliens	
I-1 Introduction	15
I-2 Descriptif et qualité de l'énergie éolienne.....	15
I-2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	15
I-2.1 Origine du vent	16
I-3. Développement de l'énergie éolienne.....	16
I-4 Emplacement des parcs éoliens.....	17
I-5 Taille des aérogénérateurs.....	18
I-6 Constituant d'une éolienne.....	19
I-7 Classement des Turbines Eoliennes.....	20
I-7.1 Eoliennes à axe vertical.....	20
I-7.1.1 Rotor de Savonius.....	21
I-7.1.2 Rotor de Darrieus.....	21
I-7.1.3 Inconvénient des éoliennes à axe vertical.....	22
I-7.2 Eoliennes à axe horizontal.....	22
I-7.2 .1 Caractéristique des éoliennes à axe horizontal.....	22
I-7.2.2 Avantage des éoliennes à axe horizontal.....	22
I-7.2.3.Eoliennes face au vent	23
I-7.2.4. Éoliennes sous le vent	23
I.8 Application des éoliennes.....	23
I.8.1 Systèmes Isolés.....	24
I.8.2 Systèmes Hybrides.....	24
I.8.3 Systèmes connectes au Réseau.....	24
I-9 Différents types aérogénérateurs.....	25
I-9.1 Aérogénérateur à vitesse fixe	25
I-9.1.1Caractéristiques de ce type	25
I-9.1.1 Avantage fonctionnement à vitesse fixe	26
I-9.2 Aérogénérateur a vitesse variable.....	26
I-9.2.1 Avantage fonctionnement à vitesse variable	27
I-9.2.2. Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable.	27
I-10. Etat de l'art sur la conversion électromécanique	28
I-10.1 Aérogénérateur utilisant la machine synchrone.....	28
I-10.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants.....	28
I-10.1.2 Machine synchrone à aimants permanents discoïde.....	29
I-10.2 Aérogénérateurs utilisant la machine asynchrone.....	30
I-10.2.1 Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless ».....	30
I-10.2.2 Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil.....	31
I-10.2.3 Machine asynchrone à double alimentation- montage de« Scherbius »	32
I-10.2.4 Machine asynchrone à double alimentation associée à deux convertisseurs.....	33
I-11 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	34
I-12. Conclusion	35

Chapitre II : Présentation, modélisation et commande des systèmes éoliens

II-1 Introduction	37
II-2 Modélisation de la partie mécanique	37
II-2.1 Introduction.....	37
II-2.2 Source primaire : le vent.....	37
II-2.2.1 Modélisation du vent	38
II-2.2.2 Loi de Betz	38
II-2.3 Modèle de la turbine.....	40
II-2.3.1 Modèle des pales.....	41
II-2.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	43
II-2.3.3 Modèle de l'arbre mécanique.....	44
II-2.4 Modélisation du système d'orientation des pales	45
II-2.5 Conclusion.....	46
II-3 Modélisation de la partie électrique.....	46
II-3.1 Introduction.....	46
II-3.2 Présentation de la MADA.....	47
II-3.2.1 Description des composants de la MADA.....	47
II-3.3 Différentes structures de MADA.....	47
II-3.3.1 MADA avec pont à diodes et pont à thyristors.....	47
II-3.3.2 MADA avec pont à diodes et pont à transistors.....	48
II-3.3.3 MADA avec cycloconvertisseur.....	48
II-3.3.4 MADA avec convertisseurs MLI	49
II-3.4. Description de machine asynchrone à double alimentation	50
II-3.5. Structure de la MADA.....	51
II-3.6. Modes de fonctionnement de la MADA.....	51
II-3.6.1. Mode moteur hypo-synchrone.....	51
II-3.6.2. Mode moteur hyper-synchrone.....	52
II-3.6.3. Mode génératrice hypo-synchrone.....	52
II-3.6.4. Mode génératrice hyper-synchrone.....	52
II-3.7. Avantage des éoliennes à base de la MADA.....	53
II-3.8. Modélisation de machine asynchrone à double alimentation	54
II-3.8.1 Hypothèses simplificatrices	54
II-3.8.2 Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant	57
II-3.8.3. Modèle de MADA pour la commande Independent des puissances.....	58
II-3.8.3.1 Modélisation diphasé de la machine.....	59
II-3.8.3.2 Puissances statoriques	60
II-3.8.3.3 Relations entre tensions et courants rotoriques.....	60
II-3.9. La Modélisation de l'onduleur de tension MLI	61
II-3.9.1 Stratégie de commande	63
II-3.10. La commande d'une éolienne à base de MADA à vitesse variable.....	63
II-3.10.1. La commande vectorielle.....	64
II-3.10.1.1 Commande directe.....	64
II-3.10.1.1.1. Résultats de simulations	65
II-3.10.2 Contrôle direct de puissance (CDP).....	67
II-3.10.2.1. Présentation et modélisation	67
II-3.10.2.2 Résultats de simulation.....	71
II-3.11. Conclusion.....	75

Chapitre III : Etude de l'impact de la commande de la MADA sur la stabilité des réseaux électriques

III-1. Introduction.....	77
III-2. Problème de la stabilité des réseaux électriques.....	77
III-2. 1. Introduction.....	77
III-2.2. Différents types de stabilité des réseaux électriques.....	78
III-2. 2.1. Stabilité statique.....	78
III-2. 2.2. Stabilité dynamique.....	78
III-2. 2.3. Stabilité transitoire.....	79
III-3. Etude de la stabilité transitoire des réseaux électriques.....	79
III-3.1. Cas d'une machine connecté à un réseau infini.....	80
III-4. Etude de la stabilité transitoire.....	81
III-4. 1. Raccordement des éoliennes aux réseaux électriques.....	81
III-4. 1.1.Nécessité de même fréquence nominale.....	81
III-4. 1.2.Nécessité de même tension.....	82
III-4. 1.3.Marche en parallèle des alternateurs.....	82
III-4.2 Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau Electrique	83
III-4.2.1 Production aléatoire et très peu prévisible.....	83
III-4.2.2 Déconnexions intempestives.....	83
III-4.3 Description des facteurs affectant la qualité énergétique.....	83
III-4.3.1.Fluctuation de tension.....	83
III-4.3.2.Variation de la fréquence.....	84
III-4.3.2.Harmoniques et inter-harmoniques.....	84
III-4. 4.Outils de simulation.....	84
III-4. 5.Sans l'intégration de la ferme éolienne.....	86
III-4. 5.1.Description du réseau étudié.....	86
III-4. 5.2.Simulation.....	86
III-4. 5.3. Interprétation des résultats obtenus.....	87
III-4. 6. Avec l'intégration de la ferme éolienne.....	88
III. 4.6.1. Introduction.....	88
III-4.6.2. Ferme éolienne : commande directe.....	88
III-4.6.2.1 Description du réseau étudié.....	88
III-4.6.2.2 Simulation.....	89
III-4.6.2.3. Interprétation des résultats obtenus.....	91
III-4.6.3. Ferme éolienne : Contrôle direct de puissance (CDP).....	92
III-4.6.3.1Simulation.....	92
III-4.6.3.2 Interprétation des résultats obtenus.....	94
III-5. Conclusion.....	94
Conclusions Générales et perspectives	95
Annexe s.....	97
Références bibliographiques.....	101

LISTE DES SYMBOLES

- β : Angle de calage des pales
- $[i_{sabc}]$: Courants statorique de la machine
- $[i_{rabc}]$: Courants rotorique de la machine.
- C_p : Coefficient de puissance
- C_{em} : Couple électromagnétique.
- C_r : Couple résistant
- f_v : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.
- C : Capacité du condensateur dans l'étape continue
- C_{p_max} : Coefficient de puissance maximal
- C_g : Couple de la génératrice électrique
- C_m : Couple mécanique total
- C_{vic} : Couple par le fait de frètement
- $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$: Courants statoriques dans le référentiel α, β
- i_s : Courant statorique de la machine
- i_r : Courants rotorique de la machine
- I_e : Courants injectés au réseau
- τ_U : Constante de temps de réponse désiré de la tension redressé
- τ_i : Constante de temps de réponse désiré des courants injectés au réseau
- i_{ci} : Courant commuté
- I_c : Courant traversant la capacité
- I_e : Courants injectés au réseau

I_{ch}	: Courant de charge
i_{ci}	: Courant commuté
ρ	: Densité de l'air $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$
E_{cv}	: Energie cinétique
S_{il}	: Etat passant des interrupteurs K_{i1}
l	: Epaisseur de la pale (m).
f_{ci}	: Etat d'interrupteur
$[\Phi_{sabc}]$: Flux statorique de la machine
$[\Phi_{rabc}]$: Flux rotorique de la machine
g	: Glissement
G	: Gain de multiplication
L_s	: Inductance cyclique de stator
L_r	: Inductance cyclique de Rotor
l_s	: Inductance propre des enroulements statoriques
l_r	: Inductance propre des enroulements rotoriques
m_s	: Inductance mutuelle des enroulements statoriques
m_r	: Inductance mutuelle des enroulements rotorique
M	: Inductance Mutuelle
J	: Inertie des parties tournantes
O	: Indice de l'axe homopolaire
d	: Indice de l'axe direct
q	: Indice de l'axe en quadrature

K_{il}	: Interrupteurs
E_r	: La f.e.m de rotor de la machine
E_s	: La f.e.m de stator de la machine
$[Ap]^l$: Matrice de Park inverse
J_{tur}	: Moment d'inertie d'arbre d'entraînement des pales
J	: Moment d'inertie Le rotor de la génératrice
$[Ap]$: Matrice de Park
m	: Masse d'air
N_s	: Nombre de spires des bobinages statoriques
N_r	: Nombre de spires des bobinages rotoriques
P_m	: Puissance
P_{mt}	: Puissance théoriquement
P_v	: Puissance du vent récupérable (en watts)
P_{max}	: Puissance maximale pouvant être recueillie par un e éolienne
P_{nom}	: Puissance nominale
P	: Puissance Active
Q	: Puissance réactive
P_r	: Puissance active transmise par le rotor de la machine électrique
P_s	: Puissance active transmise par le stator de la machine électrique
P_t	: Puissance captée par la turbine
Q_s	: Puissance réactive statorique
Q_r	: Puissance réactive transmise par le rotor

w_s	: pulsation de synchronisme de la machine
P_{res}	: puissance de réseau
P_{mec}	: Puissance mécanique
Sn	: puissance de la centrale
K_{pi}, K_{li}	: Paramètres de régulateur de PI
R_s	: Résistance des enroulements statorique.
R_r	: Résistance des enroulements rotoriques
r	: Rayon de l'aérogénérateur
R	: Résistance de la ligne du réseau
X	: Réactance de la ligne du réseau
X_d, X'_d	: Réactance synchrone et transitoire selon l'axe d
X_q, X'_q	: Réactance synchrone et transitoire selon l'axe q
S	: Surface des pales (en m ²)
$[V_{sabc}]$: Tensions simple triphasées au stator de la machine
$[V_{rabc}]$: Tensions simples triphasées au rotor de la machine.
V_{dr}	: Tension rotorique dans l'axe (d)
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$: tensions statoriques dans le référentiel α, β
V_{qr}	: Tension rotorique dans l'axe (q)
U_c	: Tension continu
x	: Tension, courant ou flux
v_{ci}	: Tension commuté
U	: Tension délivré par la centrale

M_{max} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle

ω_m : Vitesse de rotation de l'axe de la MADA

V_v : Vitesse du vent(m/s)

V_m : Vitesse du vent traversant le rotor

$[X]$: Vecteur de tension, courant ou flux

V_1 : Vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne

V_2 : Vitesse du vent après passage à travers le rotor

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur

Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur.

v : Volume limité par les ailes (en m^3)

Ω_{tur} : Vitesse de rotation de la turbine

λ : Vitesse relative de l'éolienne

V_e : Valeurs efficaces des tensions du réseau

Introduction générale

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est devenue une réalité mondiale incontournable. L'évolution de la capacité de production d'électricité par éoliennes n'a pas cessé d'augmenter depuis 1980. L'industrie éolienne est en mesure de devenir une industrie énergétique mondiale si on se base sur l'accélération des installations dans les dernières décennies.

Les énergies éoliennes peuvent contribuer avec une part significative aux nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre.

Le développement de l'énergie éolienne connaît un essor important vu la diversité des zones exploitables et aux coûts relativement intéressants [1]. Les systèmes éoliens se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées. De plus, le potentiel énergétique mondial de cette énergie est estimé à une puissance de 5300 TWh, ce qui représente un gisement énergétique non négligeable et très prometteur.

Dans le domaine des entraînements des grandes puissances, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier. Il s'agit de la machine à double alimentation « double feed asynchronous machine » (DFAM) en Anglais et (MADA) en français : le stator est alimenté par un réseau fixe et le rotor par une alimentation variable qui peut être une source de tension ou une source de courant, cette dernière présente beaucoup d'avantage par rapport à celle en tension car elle procure une grande souplesse et une plus grande simplicité de fonctionnement

Notre objectif dans ce travail consiste à l'étude de différentes commandes d'une éolienne à vitesse variable basée sur une MADA et leur impact de ces commandes sur les réseaux électriques, on a choisi deux type de commande une classique (commande vectorielle direct), l'outre plus modernes (control direct de puissance)

Pour obtenir des hautes performances et une meilleure exécution de la génératrice à double alimentation, il faut concevoir une commande robuste adéquate, qui rend le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques. Il existe différentes stratégies dans littérature pour résoudre le problème de la commande de la MADA, Ce mémoire est alors divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre fait l'objet de description et généralités sur les systèmes l'éoliens. Il donne un aperçu sur les différents types d'éoliennes (à l'axe vertical, horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation et de

protection, ainsi que les différents types de génératrices utilisées dans l'éolien ont été présentés.

Le second chapitre est consacré à la modélisation du système éolien comportant essentiellement les caractéristiques et stratégies de fonctionnement de l'éolienne. Des modèles analytiques de la turbine éolienne ainsi la topologie et les domaines d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation fonctionnement en génératrice à vitesse variable ainsi que les grandeurs de commande utilisées lorsqu'elle est intégrée à un système éolien sont détaillées.

. Une modélisation dans un repère diphasé lié au champ tournant pour la commande direct et rotor pour la commande control direct de puissance (DTC).

Le troisième chapitre présente le modèle proposé pour la chaîne de conversion éolienne basée sur la machine à double alimentation fonctionnant a vitesse variable démontre l'impact d'intégration de la commande d'un fermes éoliennes dans les réseaux test présenté, en appliquant un défaut symétrique pour étudier la stabilité transitoire à partir de l'analyse des résultats obtenus.

Les résultats obtenus dans ces investigations, nous permettrons de conclure sur les méthodes et outils utilisés, et envisager les perspectives à ce travail.

Pour une bonne compréhension du contenu du présent mémoire, quelques annexes et références sont insérées à la fin. Ces annexes regroupent les paramètres d'une chaîne de conversion éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation, ainsi que les données numériques du réseau électrique test.

CHAPITRE I

Généralités et description des systèmes éoliens

I-1. Introduction

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

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes (turbines à vent). En cherchant surtout à les utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques : l'entraînement d'une turbine reliée mécaniquement à une machine électrique, génératrice, permet de générer le courant électrique [2].

Une grande partie des éoliennes utilise les machines asynchrones à double alimentation. Cette génératrice qui peut fonctionner à vitesse variable. Elle permet, alors, de mieux contrôler les ressources éoliennes pour les différentes conditions de vent. Bon nombre de configurations existent aujourd'hui, elles utilisent divers types de convertisseurs statiques. Pour chaque configuration nous disposons d'une commande adaptée ainsi que de performances spécifiques. Ces différents points seront plus détaillés dans les paragraphes qui suivent.

Dans ce chapitre, on présente les éoliennes d'une manière générale et les différents types des machines utilisées dans les éoliennes ainsi que le choix de la machine qui sera utilisé pour l'étude menée dans ce mémoire.

I-2. Descriptif et qualité de l'énergie éolienne :

I-2.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie dite "renouvelable" (non dégradée), géographiquement diffusées, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent dans cette période que les vitesses moyennes des vents sont les plus élevées). 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 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [2].

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, et leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles [2].

I-2.1. Origine du vent :

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre.

Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud.

On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques [3].

I-3. Développement de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante : + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans (+ 28,8 % en 2008).

En 2008, plus de 27 000 MW de nouvelles capacités éoliennes ont été installés dans le monde, et les 100 000 MW installés ont été dépassés début 2008.

L'éolien représente désormais 260 millions de MWh de production électrique par an, soit 1,3 % de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 47,5 milliards de dollars. Les experts du GWEC (Conseil mondial de

l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien, conduisant à un parc installé de près de 170 000 MW en 2010. [4]

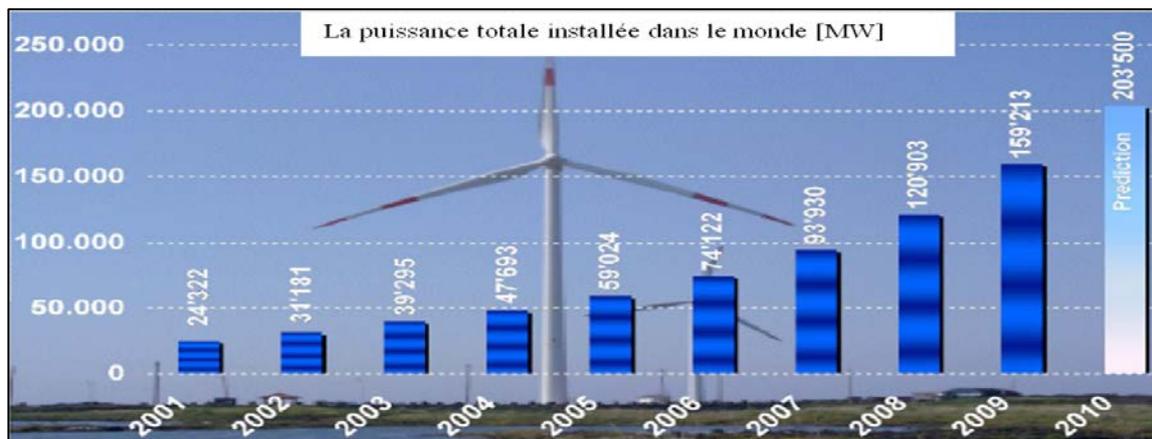


Figure (I.1) : Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en(MW).

I-4. Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année et pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits. Ces derniers comportent des dizaines comme on peut le voir sur la figure I-2[5]



Figure (I-2) : Installation d'éoliennes offshore en Mer du Nord (Photo Gunnar Brilse)

I-5. Taille des aérogénérateurs

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce qui présente la figure I-3 .pour utiliser le maximum de la force du vent, en cherche a ce que l'hélice balaie une surface ou le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

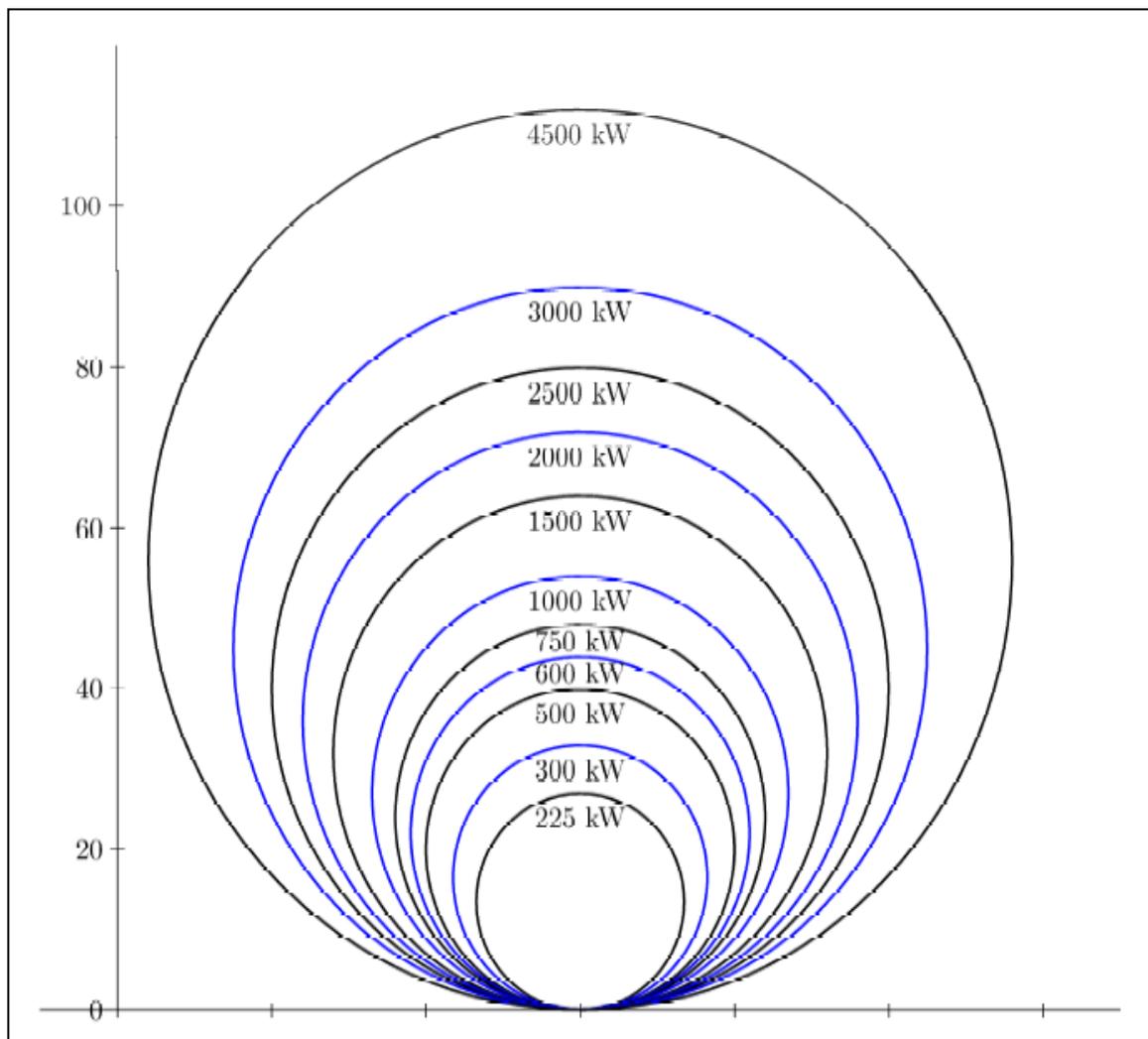


Figure (I-3) : Taille des hélices en m et puissance en KW [5]

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètres .cette hélice est perchée a plus de 100 mètre de hauteur pour produire jusqu'à 4.5 MW [5]

I-6. Constituant d'une éolienne

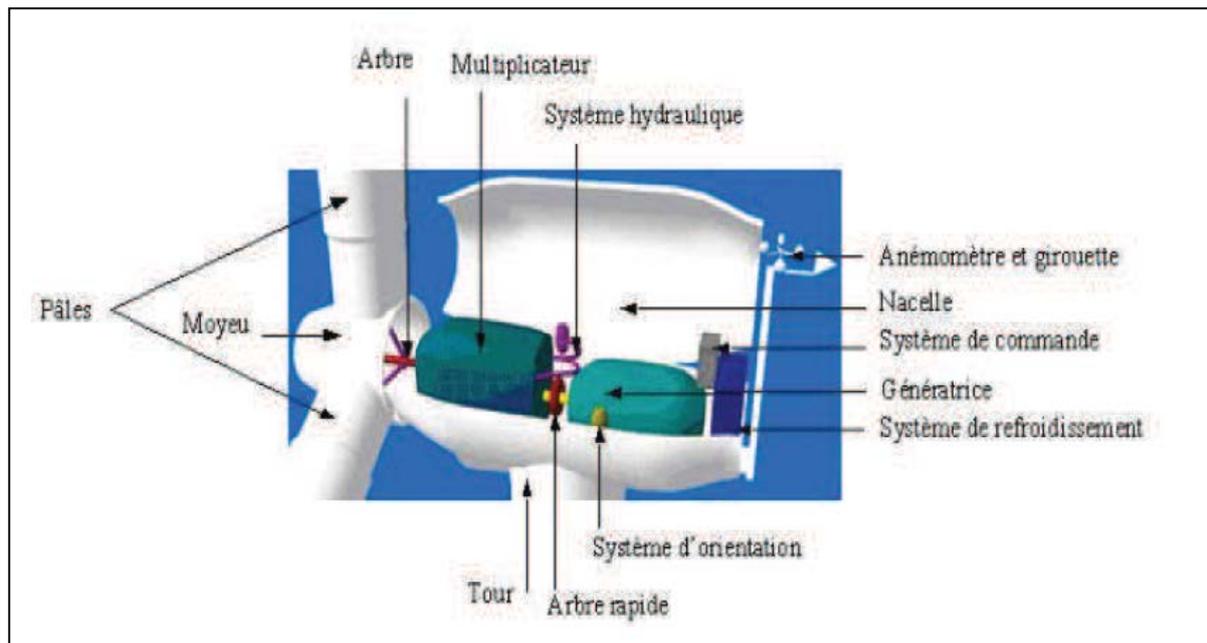


Figure (I-4) : **Éléments constituant une éolienne.**

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

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

➤ **La nacelle**, regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge :

- ✓ Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone
- ✓ les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique)
- ✓ La nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur)

perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

➤ **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (**concept danois**) étant de loin le plus répandu car : [6]

- Il représente un bon compromis entre le coût.
- le comportement vibratoire.
- la pollution visuelle
- le bruit.

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant :

✓ à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme

✓ D'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [6]

I-7. Classement des Turbines Eoliennes

I-7.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été

testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation [6] :

I-7.1.1. Rotor de Savonius : (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres :

- les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente
- Il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble.
- L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I-4).

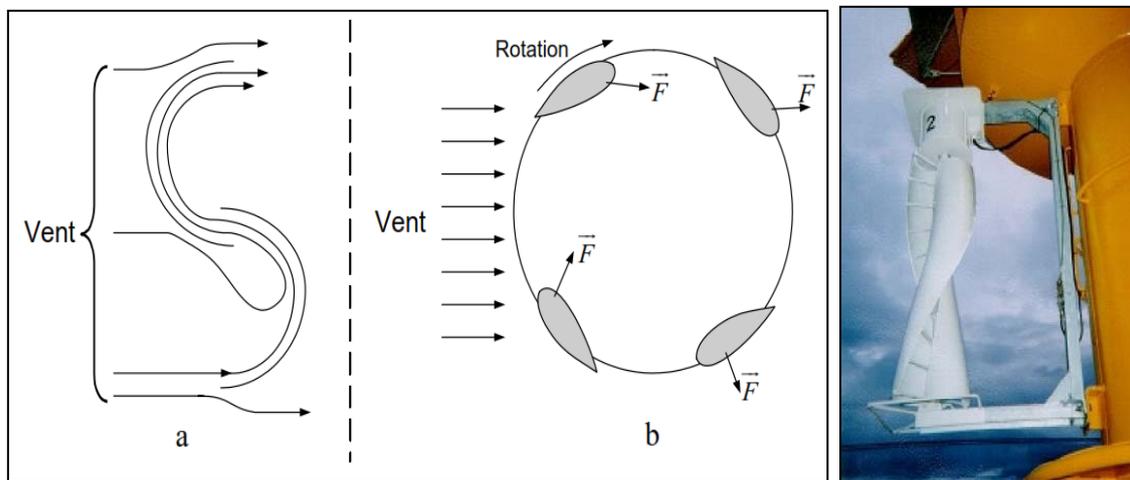


Figure (I-4) : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable. [6]

I-7.1.2. Rotor de Darrieus: inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1925-1935 repose sur l'effet de la portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif, il existe quatre types de rotors de Darrieus:

- ❖ Le rotor cylindrique
- ❖ Le rotor tronconique
- ❖ Le rotor à variation cyclique
- ❖ Le rotor parabolique

Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces

sont créés par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

I-7.1.3. Inconvénient des éoliennes à axe vertical

- En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité.
- Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent.
- la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées. [6]

I-7.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion.

I-7.2 .1. Caractéristique des éoliennes à axe horizontal

- La portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation.
- Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3,
- le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [6].

I-7.2.2. Avantage des éoliennes à axe horizontal

- Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important,
- elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques
- La position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères [6]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

I-7.2.3. Éoliennes face au vent :

- le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle.
- Les pales sont rigides,
- le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif (Figure I-5-b).

I-7.2.4. Éoliennes sous le vent :

- le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle.
- Le rotor est flexible, auto-orientable (Figure I-5-a).



Figure (I-5-a) : éolienne sous le vent

Figure (I-5-b) : éolienne face au vent

I.8. Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- ❖ Systèmes isolés.
- ❖ Systèmes hybrides.
- ❖ Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

1.8.1. Systèmes Isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par

Exemple :

- ❖ pour produire de l'électricité dans les îles,
- ❖ pour le pompage de l'eau dans des champs,
- ❖ Pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [7].

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

1.8.2. Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple :

- ❖ turbines éoliennes,
- ❖ génératrices Diesel,
- ❖ modules photovoltaïques, entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

1.8.3. Systèmes connectés au Réseau

- ❖ Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ;
- ❖ toute la génération est livrée directement au réseau électrique.
- ❖ Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique

I-9. Différents types aérogénérateurs

I-9.1. Aérogénérateur à vitesse fixe :

I-9.1.1. Caractéristiques de ce type :

- ❖ Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Fig. I.6).
- ❖ Cette machine est entraînée par un multiplicateur
- ❖ sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).
- ❖ La machine fonctionne alors en hyper synchronisme c'est-à-dire à une vitesse $\Omega_s(1-g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme (souvent $N_s = 1500$ trs.min⁻¹) et g le glissement, avec $g < 0$ pour un fonctionnement en génératrice avec une convention moteur ($|g| \leq 1\%$).
- ❖ La rotation des pales par des actionneurs, hydrauliques ou électriques, permet l'augmentation de l'angle de calage β . La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de fort vent, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\beta=90^\circ$) [8]

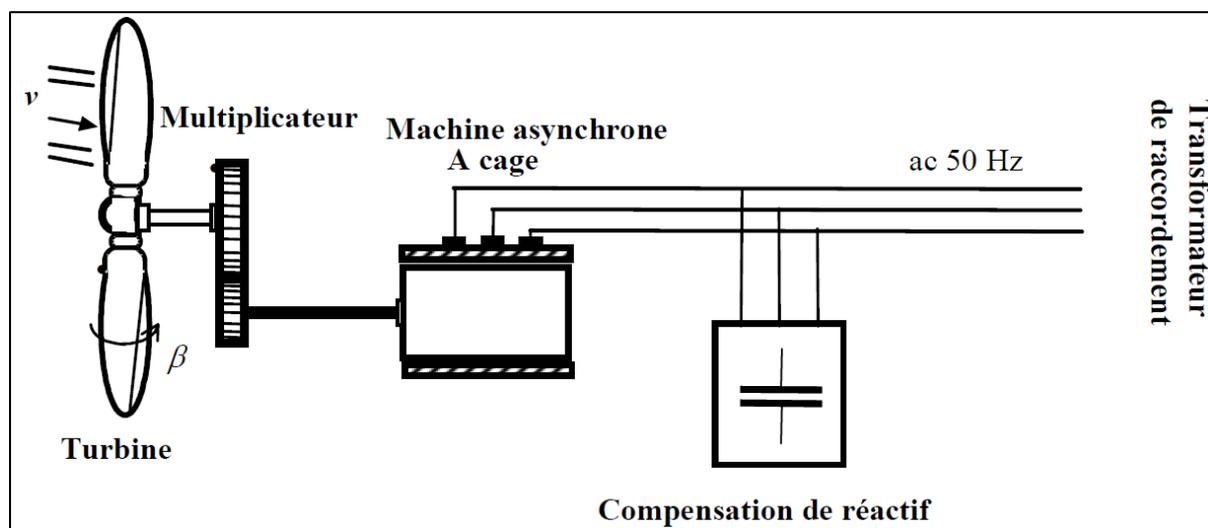


Figure (I-6) : éolienne à vitesse fixe

- ❖ Ce type d'éolienne n'offre donc quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée,
- ❖ La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.
- ❖ Certaines éoliennes de ce type sont équipées d'un système à décrochage

aérodynamique des pales :

«*stall control*» : L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale appelée « Passive Stall ».

- ✓ La puissance captée est alors réduite.
- ✓ La structure du rotor de la turbine est ainsi plus simple,
- ✓ les possibilités de réglage de la puissance sont encore plus limitées.

Une solution intermédiaire appelée :

« *active stall* » a également été développée.

- ✓ Elle garde les avantages du système « stall » (décrochage aérodynamique des pales)
- ✓ intégrant un système d'orientation des pales simplifié. Les possibilités de réglages de la puissance générée par ce type d'éolienne restent toutefois marginales [8].

1-9.1.1. Avantage fonctionnement à vitesse fixe :

Les avantages principaux de fonctionnement à vitesse fixe sont les suivants [9]:

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

1-9.2. Aérogénérateurs à vitesse variable

Le contrôle au niveau de la génératrice permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens. La génératrice peut être liée directement ou indirectement au réseau

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 machine électrique.

Avec la meilleure qualité et la baisse des coûts de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées.[10]

I-9.2.1. Avantage du fonctionnement à vitesse variable :

- la production d'énergie peut être augmentée de 2-6% pour une éolienne à vitesse variable par rapport à une éolienne à vitesse fixe,
- l'augmentation de l'énergie peut être de 39%. La littérature montre que le gain de production d'énergie de l'éolienne à vitesse variable par rapport à l'éolienne à vitesse fixe le plus simple peut varier entre 3-28% selon les conditions du site et les paramètres de conception
- le captage de l'énergie peut être considérablement augmenté en utilisant une MADA. Ils affirment que la capture de l'énergie a augmenté d'un MADA de plus de 20% par rapport à un système à vitesse variable en utilisant une machine à induction à cage-bar et de plus de 60% par rapport à un système à vitesse fixe
- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti,
- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n ,
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie,
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

I-9.2.2. Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable:

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure I.7. Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées.

- a) **La zone A** : correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- b) **La zone B** : correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer.
- c) **La zone C** : correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de

rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale [11]

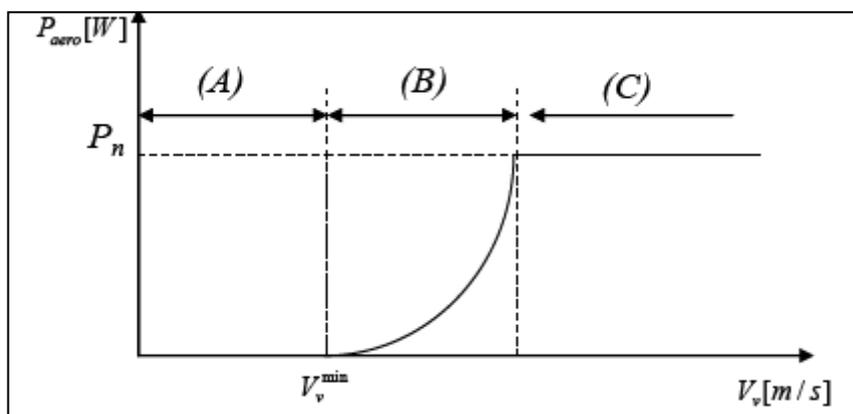


Figure. (I-7) : Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne par la suite les principales caractéristiques de chacun de ces types de machine [9]

I-10. Etat de l'art sur la conversion électromécanique :

I-10.1. Aérogénérateur utilisant la machine synchrone

I-10.1.1. Machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants permanents

L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes :

- ✓ pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe
- ✓ pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion.

Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure 1-8) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [6],

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations

importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [6].

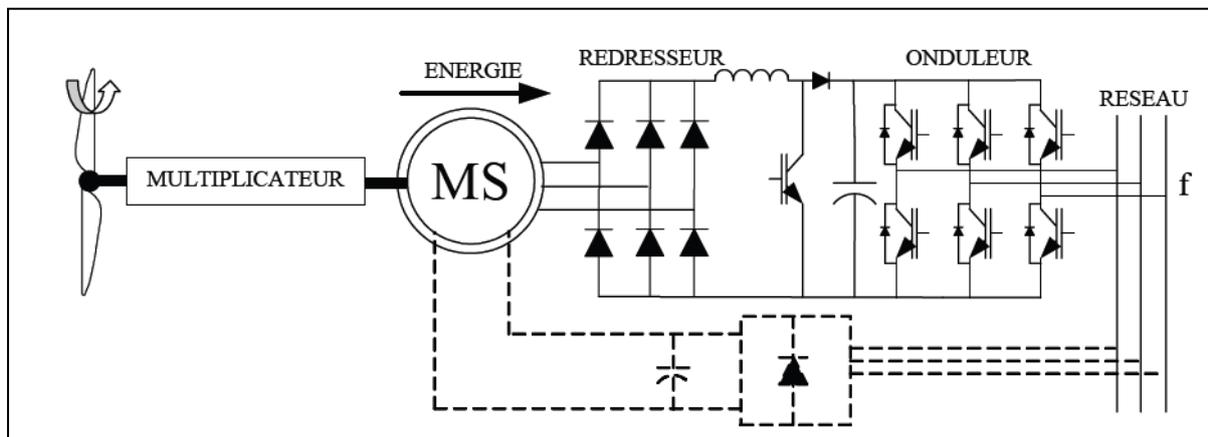


Figure (I-8) : Alternateur synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

I-10.1.2. Machine synchrone à aimants permanents discoïdes

Cette machine possède la particularité d'avoir un champ magnétique axial contrairement aux machines synchrones classiques où le champ est radial (Figure 1-9) [6]. La société "Jeumont " a récemment développé cette machine (750 kW) à attaque directe destinée à la production d'électricité par éoliennes.

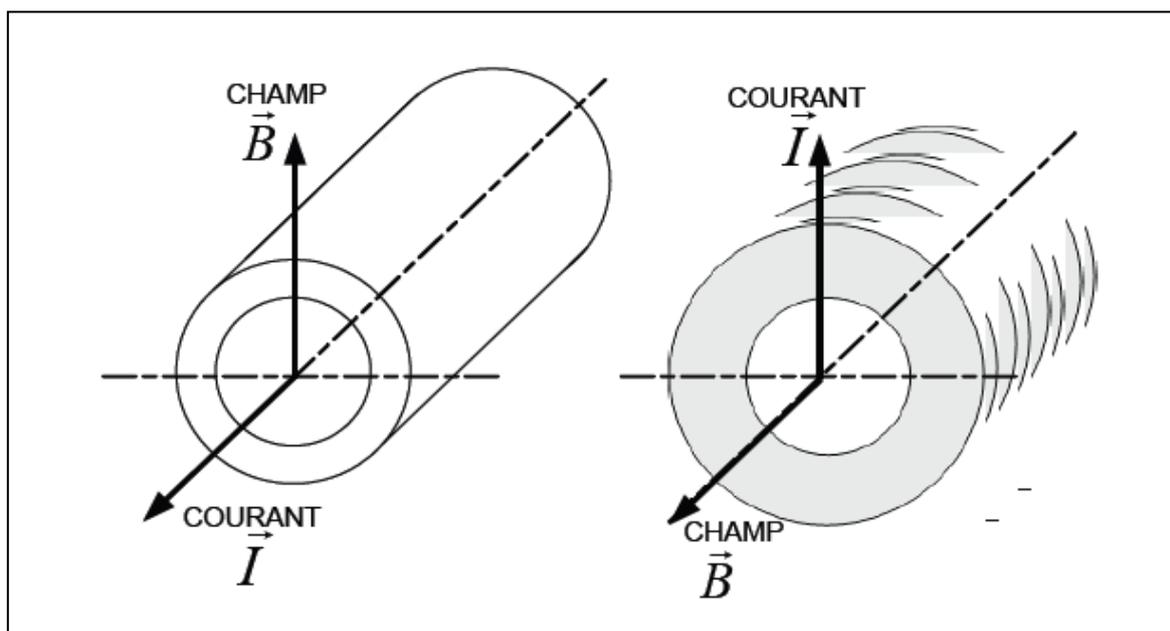


Figure (1-9) : Machine à champ radial classique et machine discoïde à champ axial

I-10.2. Aérogénérateurs utilisant la machine asynchrone

I-10.2.1. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless »

- Cette machine est à double stator .Un bobinage de grande section est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante (Figure 1.10).
- Il est connecté à un onduleur pour contrôler les flux d'excitation.
- Le rotor de cette machine est à cage d'écureuil,

Cependant, il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques [12]

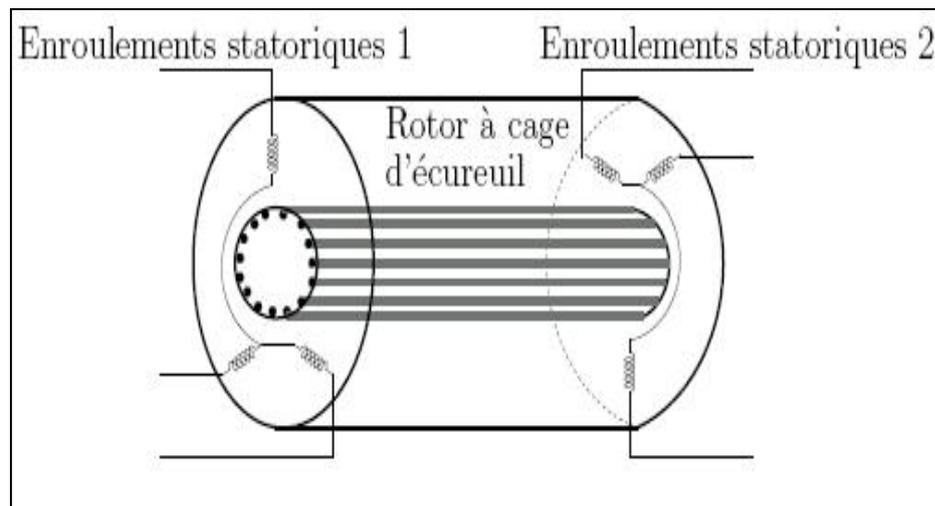


Figure (1.10) : MADA à double stator.

a) Avantages de ce type de machines :

- Cette machine présente l'intérêt de fonctionner à vitesse variable.
- Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux.
- Le convertisseur permet de contrôler le facteur de puissance ainsi que le courant rotorique d'où l'optimisation du rendement
- La taille du convertisseur est proportionnelle au glissement maximum

b) Inconvénients de ce type de machines :

- la machine a un stator plus volumineux
- plus complexe à réaliser (Figure 1.11)
- si le glissement dépasse une valeur de 30%, le système devient peu attractif à cause de la diminution de rendement et l'augmentation du coût du convertisseur [6].

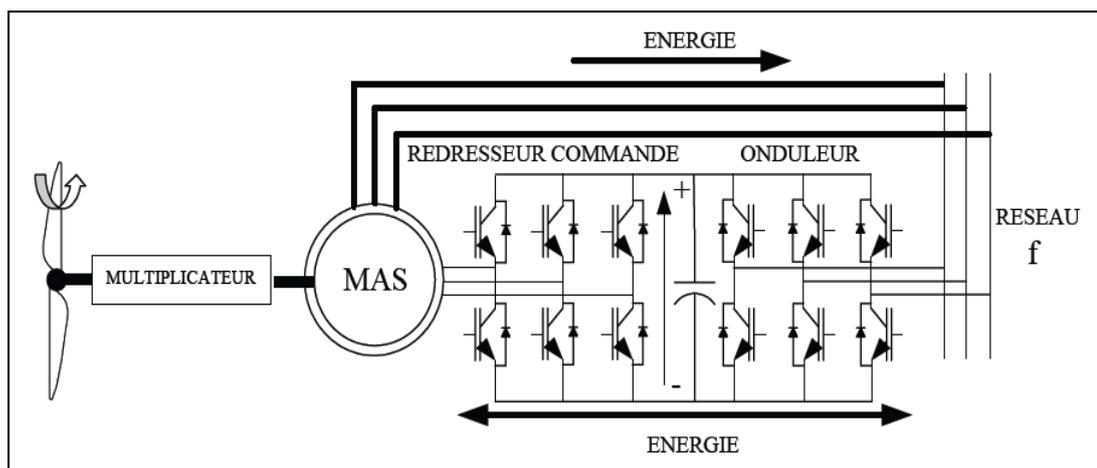


Figure (1-11) : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.

I-10.2.2. Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité) [6].

a) Avantages de ce type de machines :

- grande robustesse.
- faible coût.
- réversible.
- l'absence de balais-collecteurs. [6].
- l'excitation peut être commandée par un redresseur qui permet aussi de contrôler la vitesse de rotation pour extraire le maximum de puissance.

b) Inconvénients de ce type de machines :

- le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales.
- n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées [6].

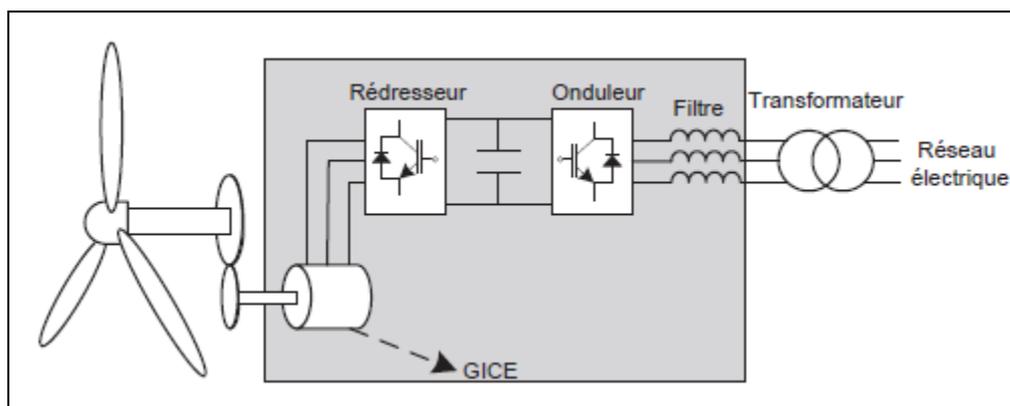


Figure (I-13) : Machine à cage d'écureuil connecte au réseau

I-10.2.3. Machine asynchrone à double alimentation- montage de« Scherbius »

Ce type de montages permettant de récupérer l'énergie de glissement dissipée dans des résistances rotoriques

La partie qui traite de la récupération de l'énergie de glissement d'un moteur asynchrone à rotor bobiné, présente le fonctionnement des montages dits montage de « Scherbius ». La figure I.14 présente le principe de ce montage.

Le schéma de la figure I.15 illustre ce montage. Comme dans, ce montage est plus communément appelé cascade hyposynchrone. [13]

On définit une cascade hyposynchrone comme étant un dispositif faisant appel à l'électronique de puissance et permettant de réduire de manière significative la vitesse d'une machine asynchrone à rotor bobiné tout en conservant une valeur acceptable du rendement.

a) Avantages de ce type de machines :

- Dans ce montage, l'énergie de glissement est conservée sous forme électrique dans le but d'être renvoyée sur le réseau.
- Les courants rotoriques sont alors redressés par l'intermédiaire du redresseur à diodes.
- Contrôler la quantité de puissance rotorique injectée sur le réseau par l'intermédiaire de l'onduleur non autonome. [13]

En effet, la tension de cet onduleur étant imposée par le secondaire du transformateur, le réglage de la puissance s'effectue grâce au réglage du courant dans l'inductance du bus continu.

Ce type de variation de vitesse a été totalement supplanté par l'utilisation d'onduleurs autonomes.

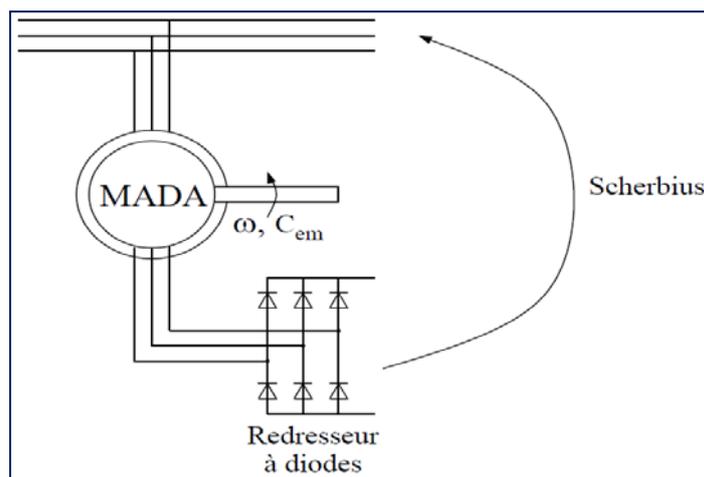


Figure (I-14) : Principe des montages de Scherbius

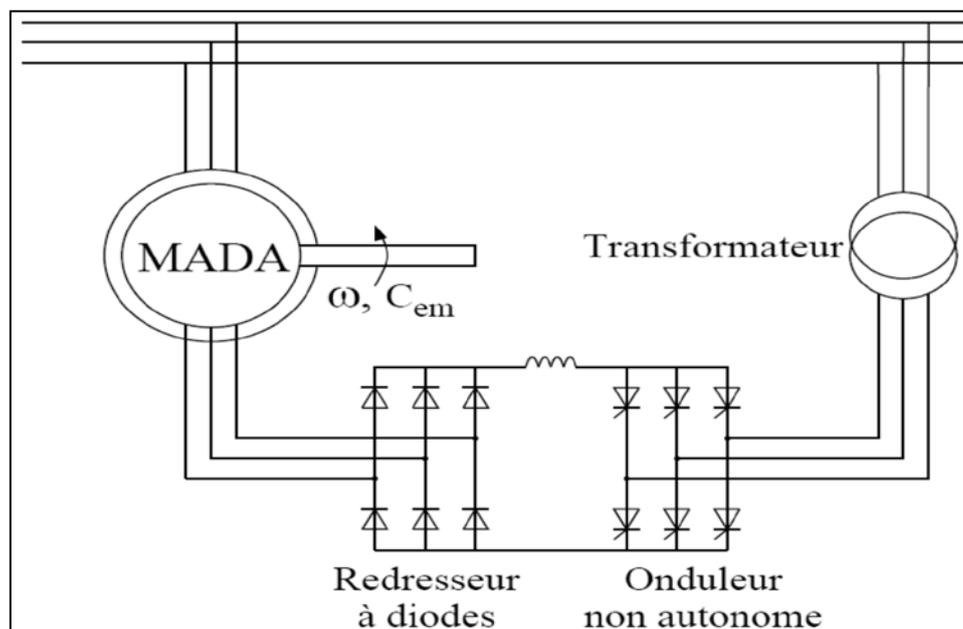
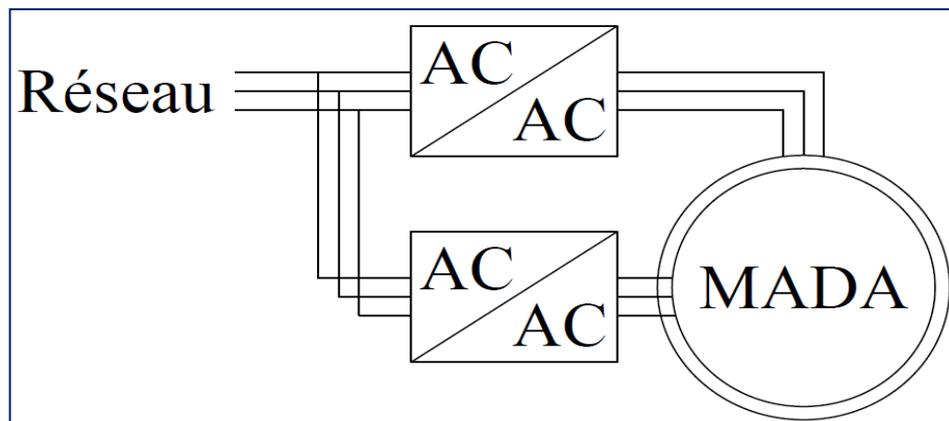


Figure (I-15) : Montage de Scherbius.

I-10.2.4. Machine asynchrone à double alimentation associée à deux convertisseurs.

L'électronique de puissance a connu un tel essor qu'aujourd'hui près de 15% de l'énergie électrique produite est convertie sous une forme ou une autre. Au cours de ces années, la taille, le poids et le coût des convertisseurs n'ont fait que diminuer, en grande partie grâce aux progrès faits dans le domaine des interrupteurs électroniques. Il est donc possible d'envisager l'utilisation de deux convertisseurs (à la place d'un seul) pour des applications nécessitant un fonctionnement à vitesse variable.

On considère alors qu'un onduleur alimente les enroulements statoriques (stator) et l'autre alimente le rotor. Le schéma de la figure I.16 présente cette configuration



Figure(I.16) : MADA associée à deux convertisseurs

I-11 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients, les avantages et les inconvénients de la conversion éolienne sont:

a) Avantages

- non polluante,
- inépuisable (énergie du vent),
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés),
- peut être complémentaire des filières traditionnelles.

b) Inconvénients

- aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent),
- bruit des pales,
- impact visuel,
- interférences électromagnétiques.

I-12. Conclusion

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéressé de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable

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 recherche sont faites en ce moment sur les stratégies des différentes chaines de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne

Ainsi des machines autres que synchrone et asynchrone classique sont en développement et en test pour exploiter différemment la puissance disponible dans le vent .ces machines à réluctance ou multipolaire par exemple, permettront d'extraire de la puissance même pour des vents faibles tout en réduisant les installations mécaniques par suppression du multiplicateur. Ceci augmentera le rendement du convertisseur tout en limitant l'entretien.

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne Puis, un bref aperçu sur les différents éléments associés, et a travers la synthèse bibliographique relative à la machine asynchrone à double alimentation, nous avons pu noter le rôle de celle-ci et ses avantages par rapport aux autres convertisseurs conventionnels.

CHAPITRE II

**Présentation, modélisation et commande
des systèmes éoliens**

II-1. Introduction :

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. Ses différents composants sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique

II-2. Modélisation de la partie mécanique

II-2.1. Introduction:

Dans ce partie, nous allons examiner et modéliser tous les éléments mécaniques qui interviennent dans la conversion éolienne .notamment, notre étude s'est focalisée sur l'élaboration d'une modélisation de l'hélice de l'éolienne en calculant les efforts créés par le vent sur les pales. Cette modélisation se démarque de la plupart des modélisations établies pour l'étude des éoliennes qui utilisent le calcul de la puissance disponible dans le vent et y affecte un coefficient pour obtenir la puissance disponible sur l'axe de l'hélice

Les autre parties comme multiplicateur ainsi que les systèmes de régulation intervenant sur l'hélice, seront aussi développées ici

Pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, trois facteurs sont essentiels :

- La densité de l'air,
- La surface balayée par le rotor,
- La vitesse du vent

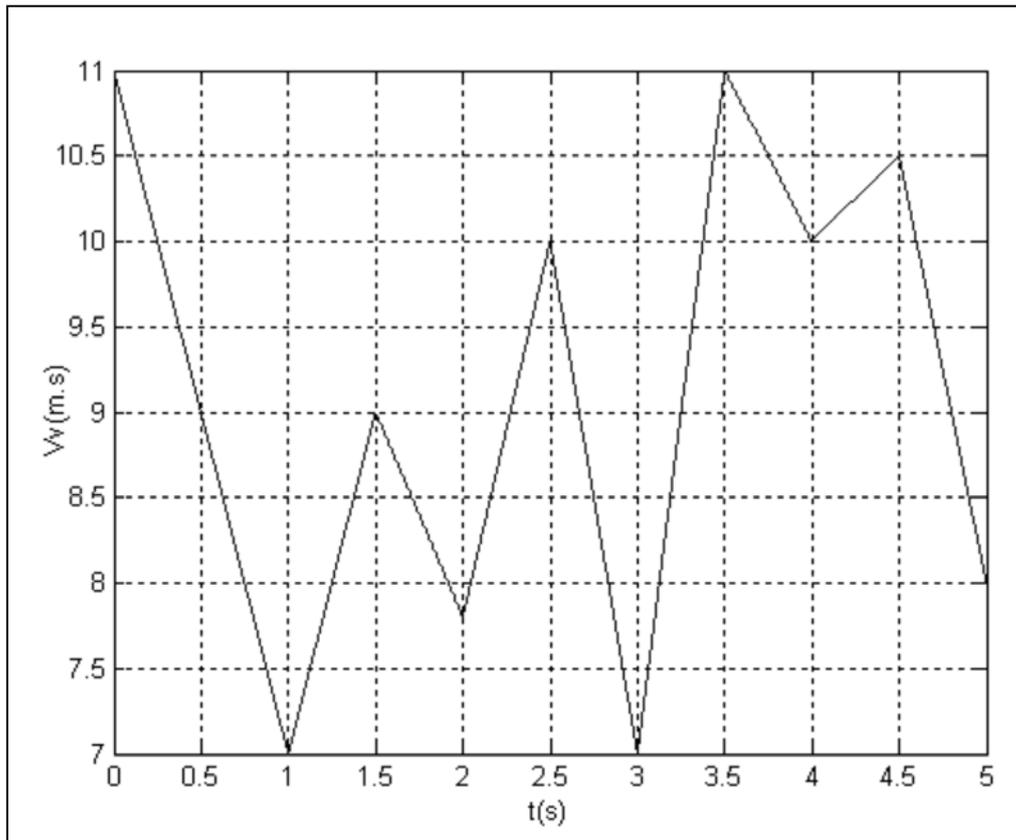
II-2.2. Source primaire : le vent

L'énergie cinétique du vent constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air. La distribution spatiale de ce champ au niveau de la turbine éolienne est complexe et son évolution au cours du temps présente de fortes variations. Le champ de vitesse qui traverse la surface discoïdale verticale balayée par La turbine va être en particulier affecté par le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour. [14]

II-2.2.1. Modélisation du vent :

La modélisation des aérogénérateurs nécessite une connaissance de la variation de la vitesse du vent au cours du temps. Cependant, cette source reste imprédictible et difficilement reproductible sur un site.

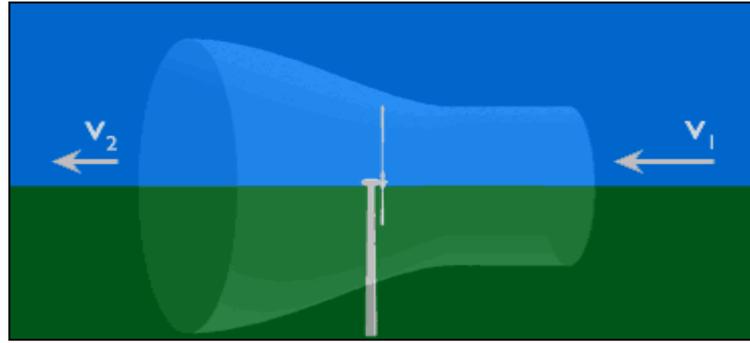
La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps : $V_v = f(t)$ comme montre la figure II-1



Figure(II.1) : Profil du vent

II-2.2.2. Loi de Betz

Il paraît évident que plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus petite sera la vitesse du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne (Figure. II.2). Si nous tentions d'extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à une vitesse nulle, ce qui, en réalité signifierait qu'il n'arriverait pas à abandonner le rotor [10]



Figure(II.2) : Déplacement du vent.

Le résultat serait dans ce cas tout le contraire de ce que nous aurions cherché à obtenir :

- aucune énergie ne serait extraite du vent
- l'entrée de l'air dans le rotor étant évidemment également empêchée.
- L'autre cas extrême serait que le vent passerait à travers le tube ci-dessus sans aucune perturbation, mais avec le même résultat : l'énergie extraite serait absolument nulle.

Nous pouvons donc penser qu'il doit y avoir une manière de freiner le vent qui se trouve entre ces deux extrémités et qui permette de façon bien plus efficace de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique

La loi de Betz stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent [10]

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor soit égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , la masse d'air en mouvement traversant la surface des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad \text{II-1}$$

En utilisant la seconde loi de Newton, on pourra exprimer la puissance par :

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad \text{II-2}$$

Soit en remplaçant m par son expression :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)}{4} \quad \text{II-3}$$

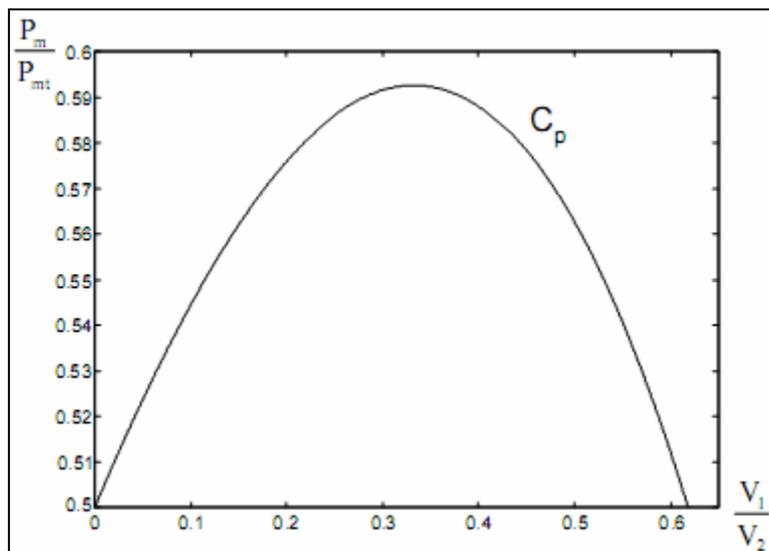
Un vent théoriquement non perturbé traversant cette même surface S sans diminution de vitesse donnerait :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad \text{II-4}$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad \text{II-5}$$

En traçant le ratio des puissances en fonction du ratio des vitesses nous obtenons la courbe illustrée par la Figure. II.3. Ce ratio présente un maximum, c'est la limite de Betz. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance C_p exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse du vent :



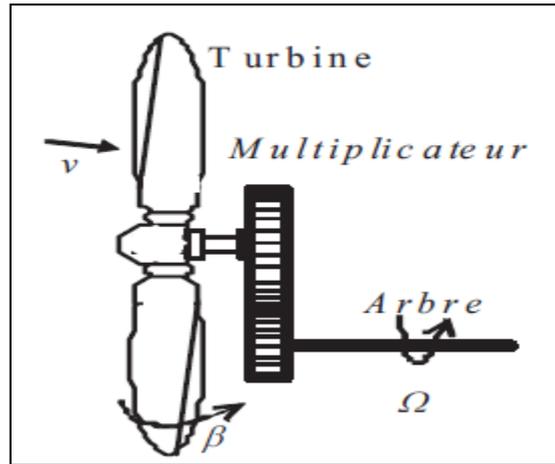
Figure(II.3) : Coefficient de puissance.

C'est-à-dire que C_p dépend de la vitesse spécifique $\lambda = \frac{r\omega}{v}$

On peut aussi définir le coefficient de couple : $C_q = \frac{C_p}{\lambda}$

II-2.3. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pâles de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure. II.4).



Figure(II- 4) : Turbine éolienne.

II-2.3.1. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad \text{II-6}$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique.

Son couple aérodynamique T_{aero} est donné par l'expression suivante [11] :

$$T_{aero} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \quad \text{II-7}$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S v^3}{2} \quad \text{II-8}$$

Ω_t : est la vitesse de la turbine,

ρ : est la densité de l'air, $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$.

S : est l'aire balayée par la turbine, $S = \pi \cdot R^2$

v : est la vitesse du vent.

C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine (Figure.II.5). Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β)

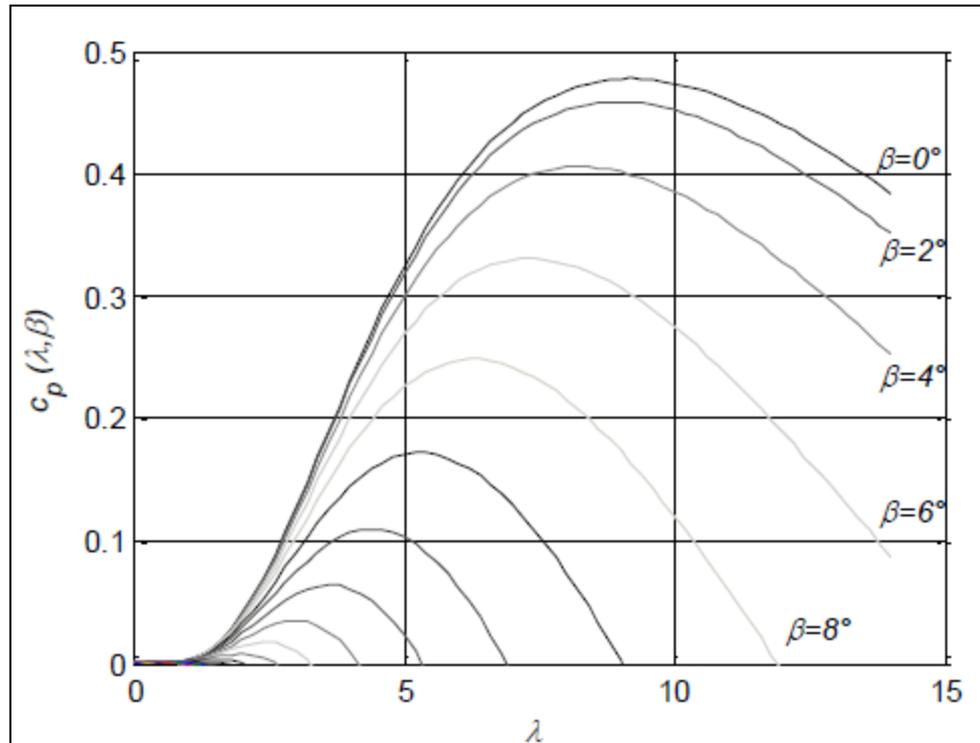


Figure II-5. Courbes de C_p en fonction de λ et β

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine Ω_r et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit : [11]

$$\lambda = \frac{\Omega_r \cdot R}{v}$$

II-9

Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure II.6.

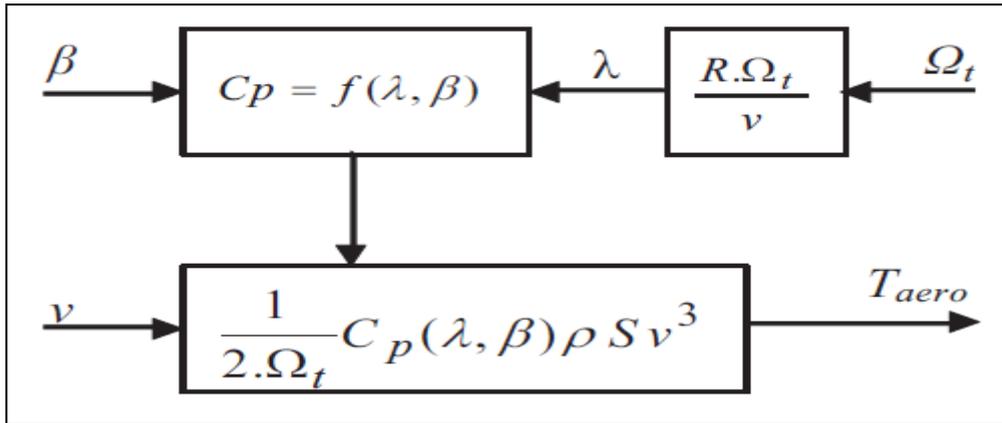


Figure (II-6) : Schéma bloc du modèle des pales [11]

II-2.3.2. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t , assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω . Il est modélisé par les deux équations suivantes : [11]

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega \tag{II-10}$$

$$T_g = \frac{1}{G} T_{aero} \tag{II-11}$$

T_{em} est le couple électromagnétique du rotor de la génératrice.

Le schéma bloc du multiplicateur de vitesse sont représentés en Figure II.7. [11]

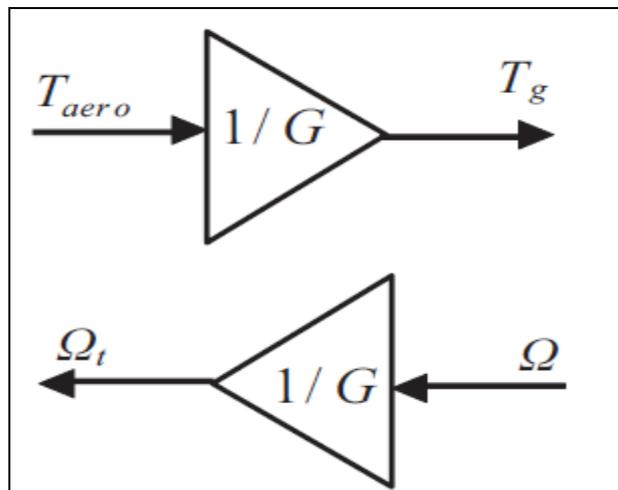


Figure (II-7) : Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse

II-2.3.3. Modèle de l'arbre mécanique

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor de la génératrice

$$J = J_g + J_t G^2 \quad \text{II-12}$$

L'évolution de la vitesse mécanique Ω dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice T_{mec} qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice T_{em} , d'un couple de frottement visqueux T_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse T_g [11]

$$T_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{II-13}$$

$$T_{mec} = T_g - T_{em} - T_{vis} \quad \text{II-14}$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f

$$T_{vis} = f \cdot \Omega \quad \text{II-15}$$

En remplaçant (II-13) et (II-15) dans (II-14), nous aurons :

$$T_g - T_{em} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad \text{II-16}$$

A partir des équations précédentes le schéma bloc de l'arbre mécanique sont représentés comme suit

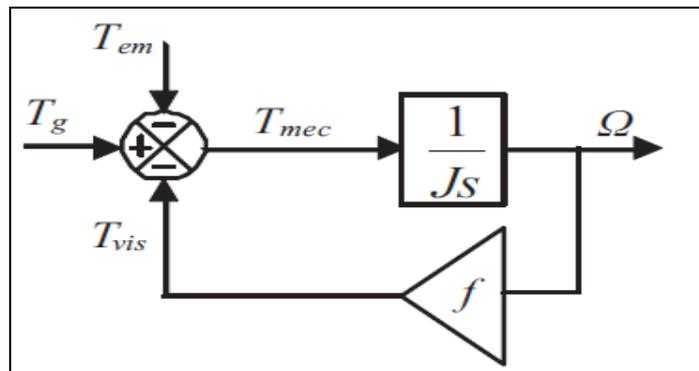


Figure (II-8) : Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique

le schéma bloc représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine (Figure. II.9), sont obtenus en regroupant les composantes respectives développées précédemment (Figure. II.6, 7 et 8)

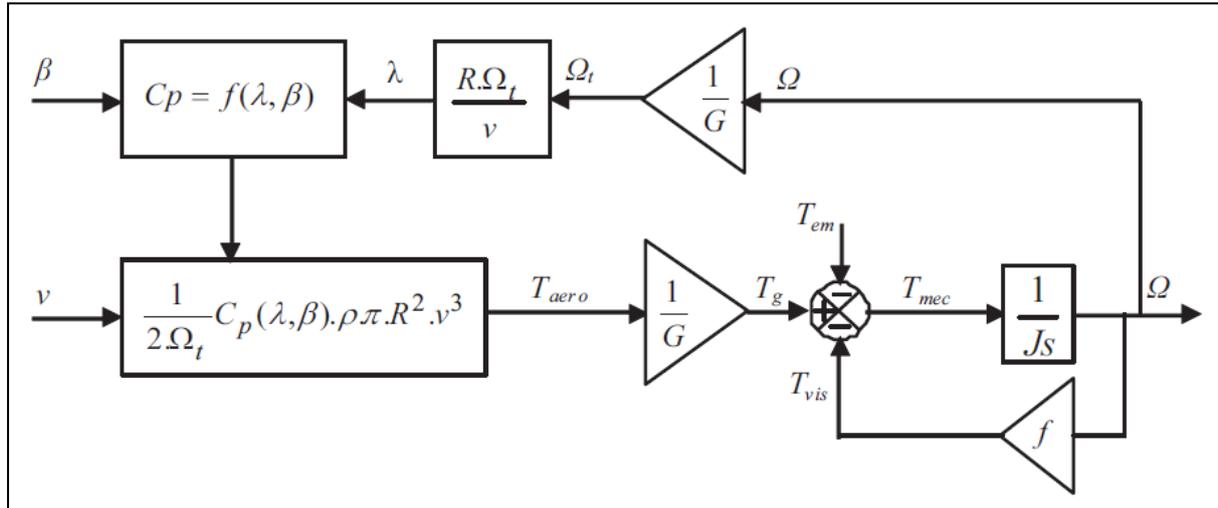


Figure (II -9) : Schéma bloc du modèle de toute la turbine éolienne

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique T_{aero} à partir de la puissance cinétique P_v du vent et par action de l'angle d'orientation des pales β . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique T_{aero} de la turbine en couple du multiplicateur T_g , et en même temps, il transforme la vitesse mécanique Ω en vitesse de la turbine Ω_t .

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice Ω résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur T_g auquel s'oppose le couple électromagnétique [11]

T_{em} . Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

II-2.4. Modélisation du système d'orientation des pales :

Le système d'orientation des pales permet d'ajuster la portance des pales afin de maintenir la puissance autour de sa valeur nominale. En réglant l'angle de calage, on agit sur les performances de l'éolienne et plus précisément sur le coefficient de puissance.

Le système d'orientation des pales génère alors un angle de calage de référence qu'on note : β_{reg} . La dynamique de l'actionneur pitch est généralement décrite par la

fonction de transfert de premier ordre suivante :

$$\beta = J \frac{1}{1 + \tau_{\beta} s} B_{reg} \quad \text{II-17}$$

τ_{β} étant la constante de temps du système de premier ordre de l'actionneur pitch.

Lors de la modélisation du système d'orientation de pales, il est très important de modéliser la vitesse de variation de cet angle. En effet, compte tenu des efforts subis par les pales, la variation de l'angle de calage doit être limitée à 10°/s. La valeur de saturation de l'angle de calage en position est de 45°.[15]

La Figure II-10 présente le modèle de l'actionneur de l'angle de calage :

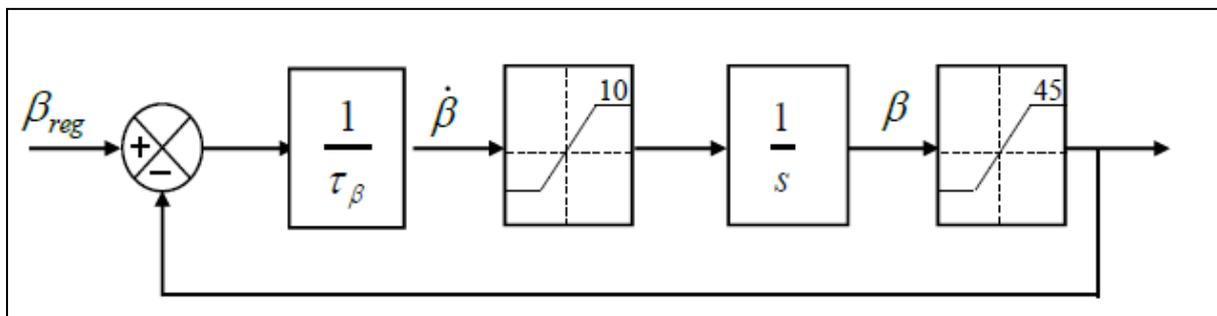


Figure II-10. Modèle de l'actionneur de l'angle de calage

II-2.5. Conclusion

Nous avons détaillé dans ce partie une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et modélise l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettent l'interconnexions avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne

Nous allons maintenant nous intéresser aux autre partie de l'éolienne qui la partie électrique

II-3. Modélisation de la partie électrique

II-3.1. Introduction

Maintenant que nous déposons d'une modélisation mécanique, il nous faut choisir et modéliser la génératrice .après avoir présenté les différentes structure de conversion au chapitre 1, nous cherchons un type de génératrice qui nous permettra de commander indépendamment des puissances actives et réactives

Ainsi nous nous somme oriente vert le Choix d'une machine asynchrone a double alimentation afin de permettre de production optimal de l'électricité quelque soient les

condition de vent et le vitesse de l'éolienne .la plupart des éoliennes de forte puissance étaient équipés de MADA cette machine présente des avantages de par son contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus de son prix et sa grande robustesse

II-3.2. Présentation de la MADA

II-3.2.1. Description des composants de la MADA

Le circuit statorique est directement connecté au réseau. Le circuit rotorique est quant à lui relié au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance .

La partie convertisseurs de puissance est principalement constituée par :

- Un redresseur : C'est le convertisseur côté rotor qui permet de contrôler le couple électromagnétique T_g et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau ;
- Un bus continu .
- Un onduleur : C'est le convertisseur côté réseau qui contrôle la tension (bus continu) et la puissance réactive Q_r échangée entre le rotor et le réseau.

Les convertisseurs sont bien évidemment commandés en MLI (PWM). [10]

II-3.3. Différentes structures de MADA

II-3.3.1. MADA avec pont à diodes et pont à thyristors

Cette structure, appelé *montage Kramer*, utilise un pont à diodes et un pont à thyristors (Figure II.11) [10]

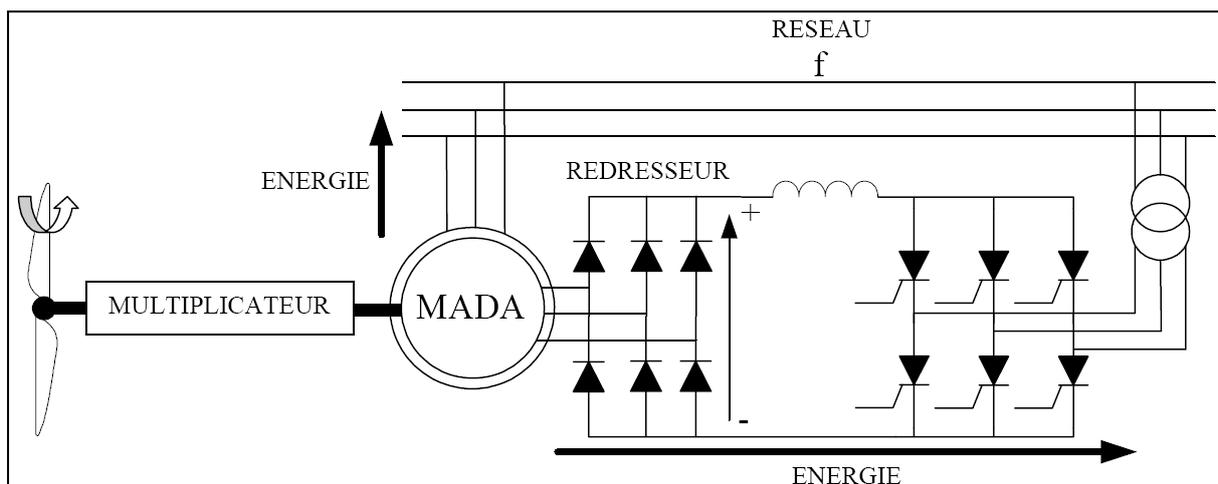


Figure (II.11) : MADA avec pont à diodes et pont à thyristors

Les tensions entre les bagues sont redressées par le pont à diodes. L'onduleur à thyristors

applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de :

- faire varier la plage de conduction des diodes,
- de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone.

a). Avantage de cette structure:

- L'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

b). Inconvénient de cette structure :

- Cette structure ne permet cependant pas l'asservissement électrique de la vitesse de la MADA.
- L'onduleur utilisé injecte des courants harmoniques basses fréquences d'amplitude importante. Cette injection d'harmoniques multiples de 50 Hz est préjudiciable aux appareillages électriques raccordés sur le réseau. D'autres structures sont alors privilégiées.

II-3.3.2. MADA avec pont à diodes et pont à transistors

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

a). Avantage de cette structure:

- Ce type d'onduleur fonctionnant à fréquence de découpage élevé,
- n'injecte pratiquement pas de courants harmoniques en basses fréquences.
- Cette structure permet aussi de contrôler le flux de puissance réactive.

b). Inconvénient de cette structure :

- elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la MADA étant donné l'utilisation d'un pont de diodes. [10]

II-3.3.3. MADA avec cycloconvertisseur

- Structure autorise un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (Figure. II-12).

- Cette structure est utilisée pour des valeurs de fréquence rotorique largement inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles. [10]
- Elle permet l'utilisation de thyristors qui sont intéressants d'un point de vue coût.

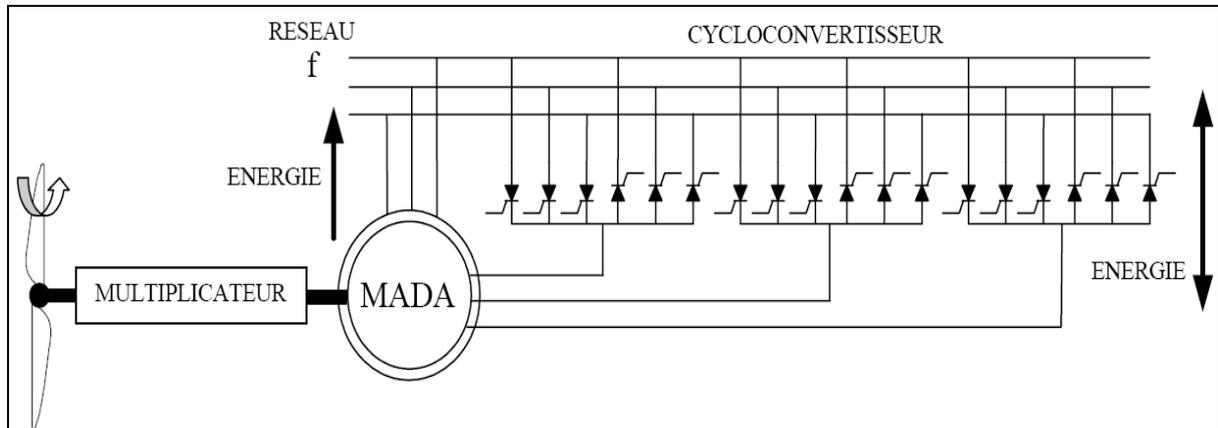


Figure (II-12) : MADA avec cycloconvertisseur.

II-3.3.4. MADA avec convertisseurs MLI

- Cette structure utilise deux onduleurs de tension en cascades équipés d'IGBT et Connectés au travers d'un bus continu (Figure. II.13) [10]
- Les onduleurs sont commandés en MLI. Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur :
 - ✓ un contrôle du flux et de la vitesse de la MADA du côté de la machine
 - ✓ un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau.

a). Avantages de cette cascade de convertisseurs :

- Le contrôle du couple de la génératrice est indépendant de celui de la puissance réactive injectée par le rotor
- Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Les limites de ce flux reposent sur la marge de variation de la vitesse de rotation
- Il y a une faible distorsion des tensions et courants rotoriques ainsi que les courants statoriques
- Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat.
- Cette structure de conversion offre un contrôle de quatre grandeurs, à savoir le flux et la vitesse de la génératrice et les flux des puissances transitées au réseau.
- Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse en utilisant des pôles

orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 25% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans le convertisseur sont peu importantes.

Cette structure est par conséquent la plus intéressante en termes de coût et de performances. Elle a donc été choisie comme structure de base pour la suite de nos travaux.

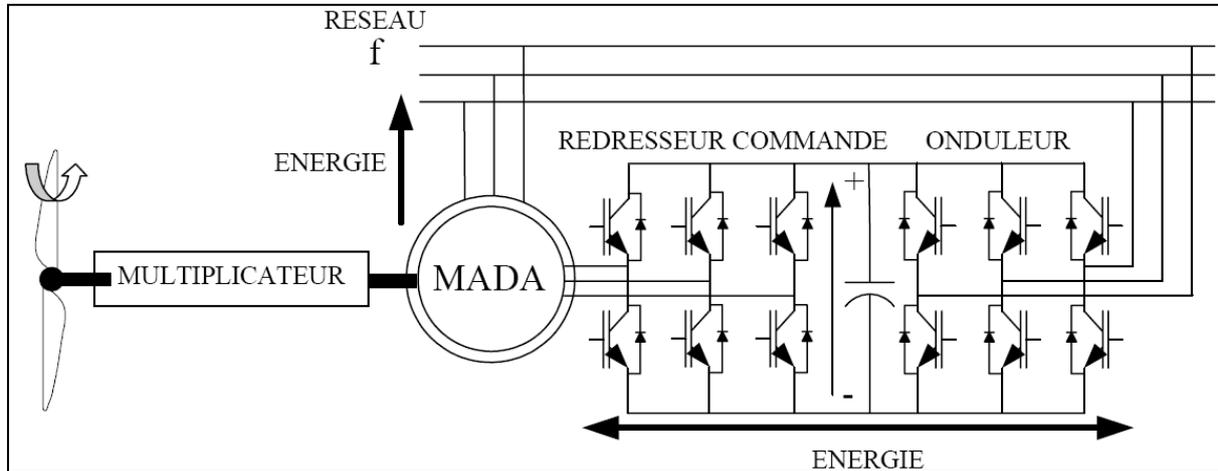


Figure (II-13) : MADA avec convertisseurs MLI.

II-3.4. Description de machine asynchrone à double alimentation :

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) a suscité un intérêt particulier surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) (figure II.14). Cette machine sera adoptée pour le reste du travail de thèse. [11]

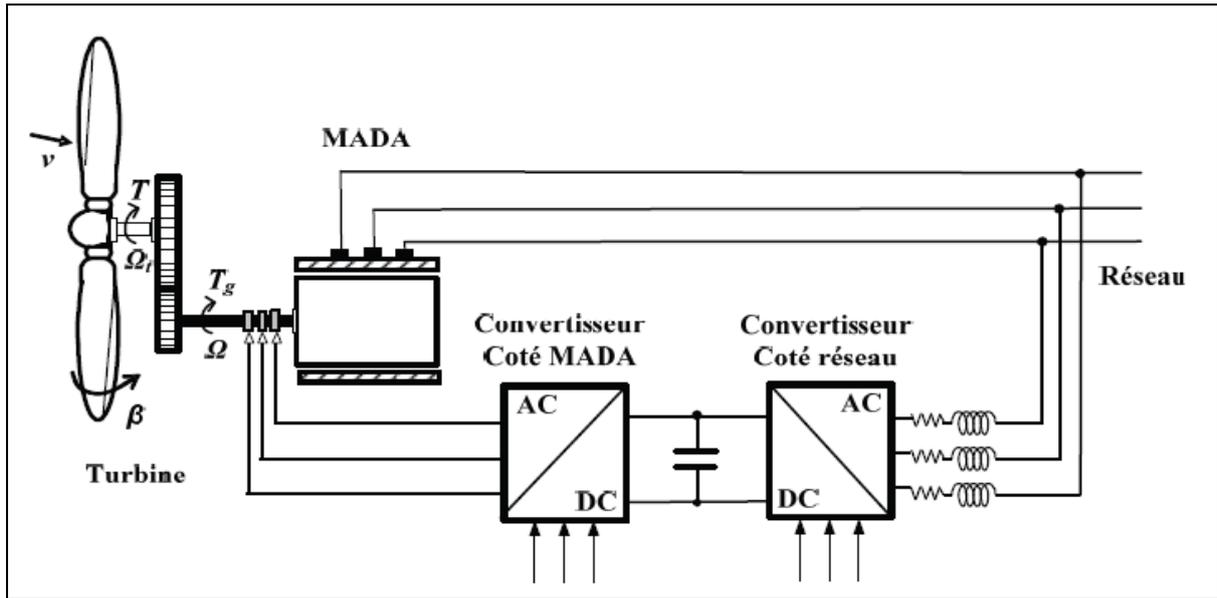


Figure (II-14) : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA

II-3.5. Structure de la MADA

- Elle possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone.
- La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile.
- Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais (Figure. II.15), ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques. [11]

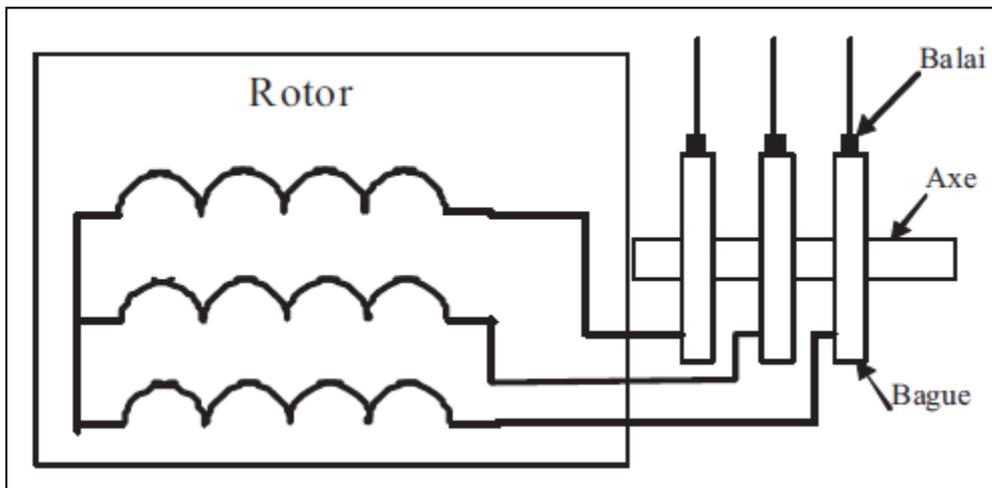


Figure (I- 15) : Structure du rotor de la MADA.

II-3.6. Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants (Figure. I.16). C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur. [11]

II-3.6.1. Mode moteur hypo-synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur,
- La puissance P_s est fournie par le réseau au stator de cette dernière.
- La vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme,
- La puissance de glissement P_r transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau (Figure. I-16.a),

II-3.6.2. Mode moteur hyper-synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en moteur,
- Le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA.
- La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au dessus de la vitesse de synchronisme e
- Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator. (Figure. I-16.b),

II-3.6.3. Mode génératrice hypo-synchrone

- Le fonctionnement de la MADA en génératrice,
- La turbine fournit une puissance mécanique P_m à La machine.
- une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. (Figure. I-16.c),

II-3.6.4. Mode génératrice hyper-synchrone

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

- Une partie de cette puissance correspondant à $\frac{S}{1-S}P_m$ est transmise par l'intermédiaire du rotor. (Figure. I-16.d),

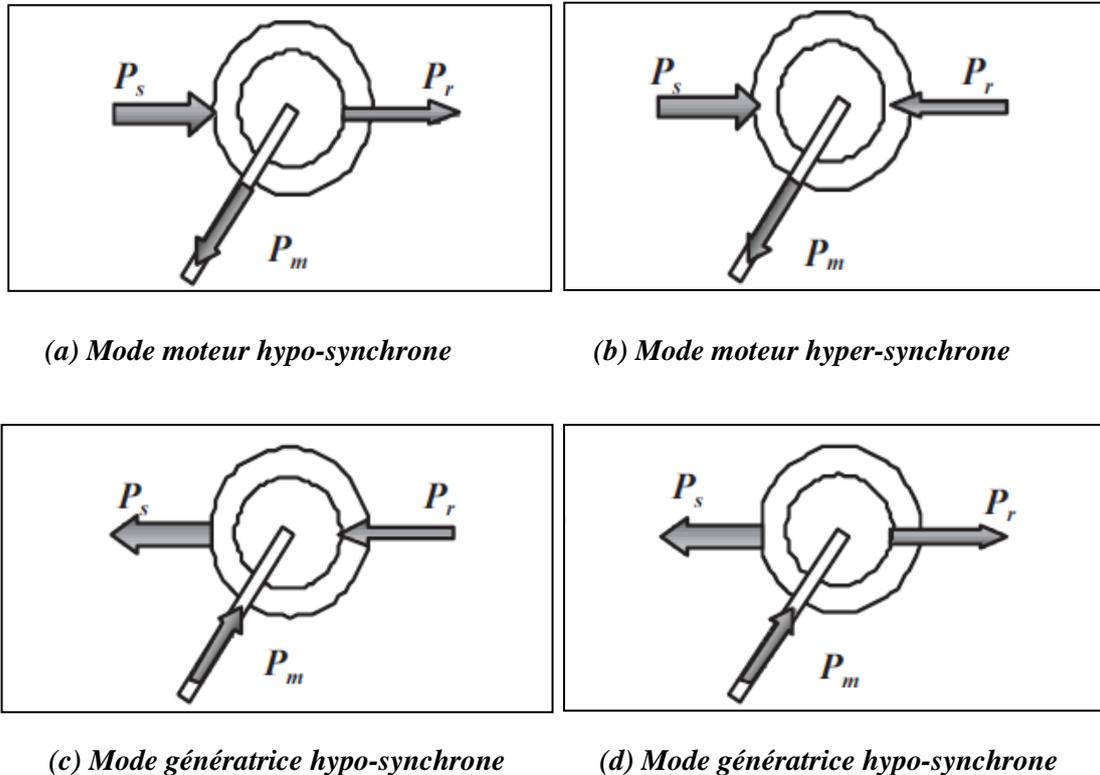


Figure (II-16) : Modes de fonctionnement de la MADA.

II-3.7. Avantages des éoliennes à base de la MADA

- Les convertisseurs statiques utilisés sont :
- ✓ moins volumineux,
 - ✓ moins coûteux,
 - ✓ nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd.
 - ✓ Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent [6],
 - ✓ Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré,
- Le dimensionnement des filtres est réduit et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri,
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone [11]. En effet, les puissances

active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la MADA [11]

II-3.8. Modélisation de machine asynchrone à double alimentation :

Dans cette conception :

- Le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau.
- Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique.
- Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande.
- L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. (figure II-17) [16]

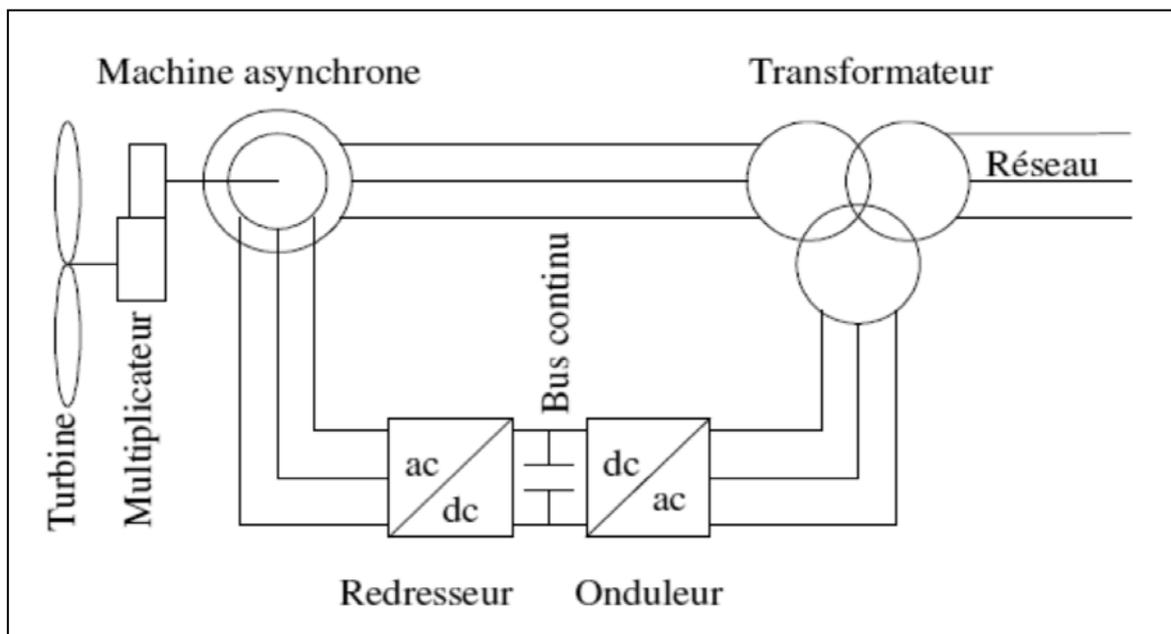


Figure (II-17) : Eolienne à MADA pilotée au rotor

Avant la mise en équations de la machine asynchrone dans les axes d et q prenons en compte les hypothèses suivantes :

II-3.8.1. Hypothèses simplificatrices :

- ✓ La saturation est négligée ; il en résulte que les inductances propres et mutuelles sont indépendantes des courants qui circulent dans les enroulements.
- ✓ Les f.m.m. sont réparties sinusoidalement dans l'entrefer de la machine, il y a symétrie par rapport à l'axe magnétique des enroulements.

- ✓ Les encoches sont supposées inexistantes (entrefer uniforme et constant).
- ✓ On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques.

A. Model triphasé de la MADA

Afin d'établir la modélisation du MADA, nous allons déterminer le model d'une machine asynchrone a rotor bobine .ce modèle sera établi de la même manière que le model e de la machine asynchrone a cage avec comme différence l'existence de tension rotoriques non nulles nous partons les équations générales de la machine asynchrone a rotor bobiné qui s'écrivent dans un repère triphasé, de la manière suivante [5]

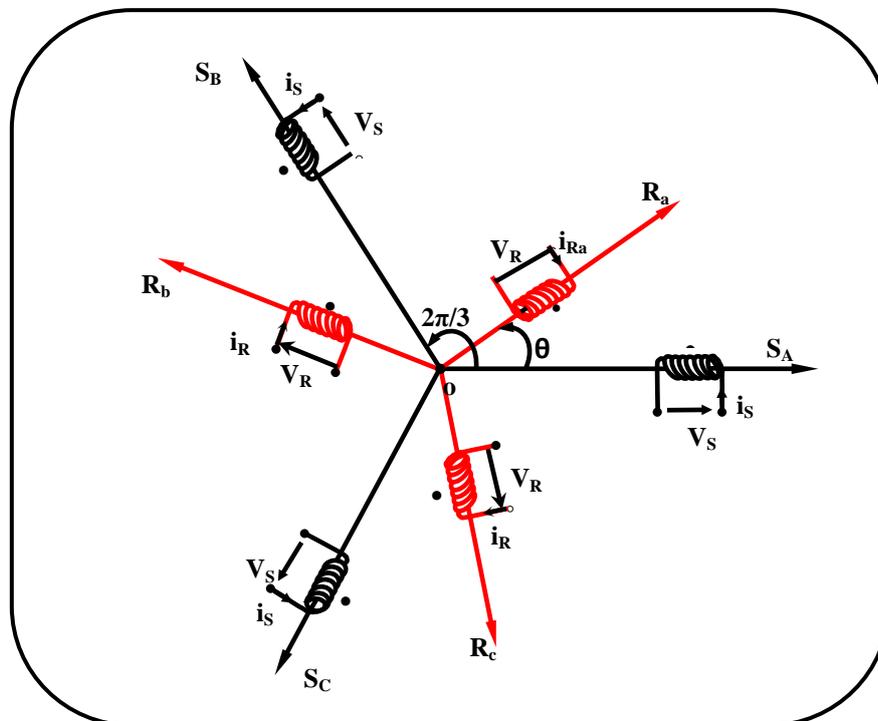


Figure (II-18): position des axes des phases statoriques et rotoriques

A-1) Equations électriques de la MADA :

nous partons les equation generale Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

$$\begin{cases} [V_s]_3 = R_s [I_s]_3 + \frac{d[\Phi_s]_3}{dt} \\ [V_r]_3 = R_r [I_r]_3 + \frac{d[\Phi_r]_3}{dt} \end{cases} \quad \text{II-18}$$

Ou $[X_j]_3 = (X_a, X_b, X_c)^t$ $X = V$ ou I ou Φ et $j = s$ ou r

Avec :

- $[V_s]$ et $[V_r]$ les tensions statoriques et rotoriques de la machine
- $[I_s]$ et $[I_r]$ les courants statoriques et rotoriques de la machine
- $[\Phi_s]$ et $[\Phi_r]$ les flux statoriques et rotoriques de la machine .[5]
- $[R_s]$ et $[R_r]$ les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine .

A-2) Equations magnétiques:

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des inductances de la machine par :

$$\begin{cases} [\Phi_s]_3 = L_s [I_s]_3 + M [I_r]_3 \\ [\Phi_r]_3 = M [I_s]_3 + L_r [I_r]_3 \end{cases} \quad \text{II-19}$$

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_r = l_r - M_r \\ M = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad \text{II-20}$$

Avec :

- L_s et L_r les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine.
- l_s et l_r les inductances propres statoriques et rotoriques de la machine.
- M_s et M_r les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine
- M les l'inductance magnétisante
- M_{sr} la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.[5]

$$\text{Avec: } [L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{sr} = \mathbf{M}_{rs} = \mathbf{M}_{\max} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) \\ \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\Pi/3) \\ \cos(\theta + 2\Pi/3) & \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad \text{II-21}$$

A-3) Equation mécanique:

Le couple électromagnétique de la machine peut s'exprimer sous différentes formes.

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\omega_m}{dt} + f_v \cdot \omega_m \quad \text{II-22}$$

II-3.8.2. Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant :

nous allons maintenant décrire la modélisation dans un repère tournant diphasé (d,q) en utilisant les transformation de Park et de Concordia permettant la conservation des puissance .soit θ l'angle électrique entre l'axe d du repère diphasé et le repère fixe lie a la phase a du stator[5]

La matrice de park est donne par :

$$[Ap] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\Pi/3) & \cos(\theta + 2\Pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\Pi/3) & -\sin(\theta + 2\Pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-23}$$

Pour les grandeurs statoriques: $\theta = \theta_s$

Et pour les grandeurs rotorique: $\theta = (\theta_s - \theta_m)$

$$[Ap]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\Pi/3) & -\sin(\theta - 2\Pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\Pi/3) & -\sin(\theta + 2\Pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{II-24}$$

Si l'on applique ces transformation aux flux et tension intervenant dans les équations de la MADA, nous obtenons le modèle diphasé de celle –ci qui s'écrit sous la forme : [5]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II-25}$$

avec :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{II-26}$$

$$\theta_r = \theta_s - \theta_m \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_m)}{dt} = \omega_s - \omega_m \quad \text{II-27}$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{II-28}$$

Avec :

- $V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$ les tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature du system diphasé
- $I_{ds}, I_{qs}, I_{dr}, I_{qr}$ les courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature du system diphasé
- θ_s l'angle électrique du champ tournant statorique
- θ_r l'angle électrique du champ tournant par rapport au rotor
- $\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}$ les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du system diphasé.[5]

Le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} (I_{dr} \Phi_{qs} - I_{qr} \Phi_{ds}) \quad \text{II-29}$$

P nombre de paires de poles de la MADA

II-3.8.3. Modèle de la MADA pour la commande Independent des puissances:

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs de tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [5]

II-3.8.3.1. Modélisation diphasé de la machine:

En choisissant un référentiel diphasé d-q lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique Φ_s avec l'axe (d) ,

$$\Phi_{ds} = \Phi_s \quad \text{et} \quad \Phi_{qs} = 0 \quad \text{II-30}$$

• L'équation (II.29) devient alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{qs} \Phi_{ds} \quad \text{II-31}$$

• La tension statorique dans le repère (a, b, c) écrire:

$$V_{sn} = R_s I_{sn} + \frac{d\Phi_{sn}}{dt} \quad \text{II-32}$$

Pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne, on néglige la résistance du bobinage statorique ($R_s=0$)

$$V_s \approx \frac{d\Phi_s}{dt} \quad \text{II-33}$$

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$V_{ds} = 0 \quad \text{et} \quad V_{qs} = V_s \quad \text{II-34}$$

Les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad \text{II-35}$$

Les équations des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad \text{II-36}$$

A l'aide de l'équation (II.35), en écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad \text{II-37}$$

II-3.8.3.2. Puissances statoriques

Les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad \text{II-38}$$

Ou bien encore d'après l'équations II-36 [5]

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad \text{II-39}$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leur expressions données l'équation (II-37), nous obtenons :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{II-40}$$

En approximant Φ_s par (V_s/ω_s) l'expression des puissances devinent alors :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad \text{II-41}$$

si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, on remarque que l'équations II-41 fait apparaitre que la puissance active P statorique est directement proportionnelle au courant rotorique d en quadrature I_{dr} , la puissance réactive est directement proportionnelle au courant rotorique d'axe (d) à une constante près $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ [5]

II-3.8.3.3. Relations entre tensions et courants rotoriques:

en remplaçant dans l'équations des flux II-28 les courants statoriques par leur expression dans l'équation II-37 : [5]

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{cases} \quad \text{II-42}$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe (d) et (q) sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (II.20). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{II-43}$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{II-44}$$

Les équations, (II-43) et (II-44) permettent d'établir le schéma bloc de la (Figure II-16) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

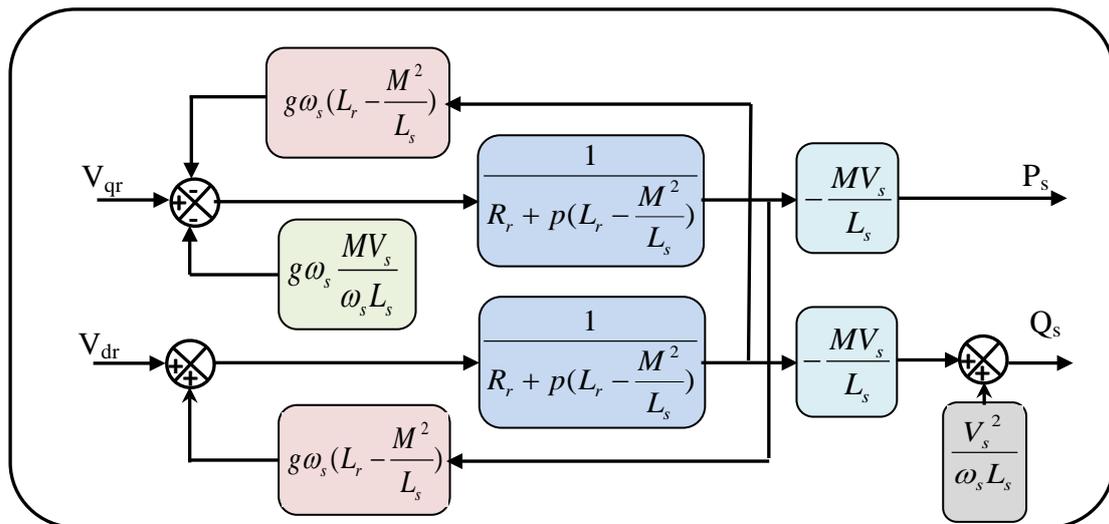


Figure (II-16): Schéma bloc de MADA

II-3.9. La Modélisation de l'onduleur de tension MLI :

Le rotor de la MADA est alimenté par une tension continue à travers un onduleur de tension qui est supposé constante, la tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur [17]

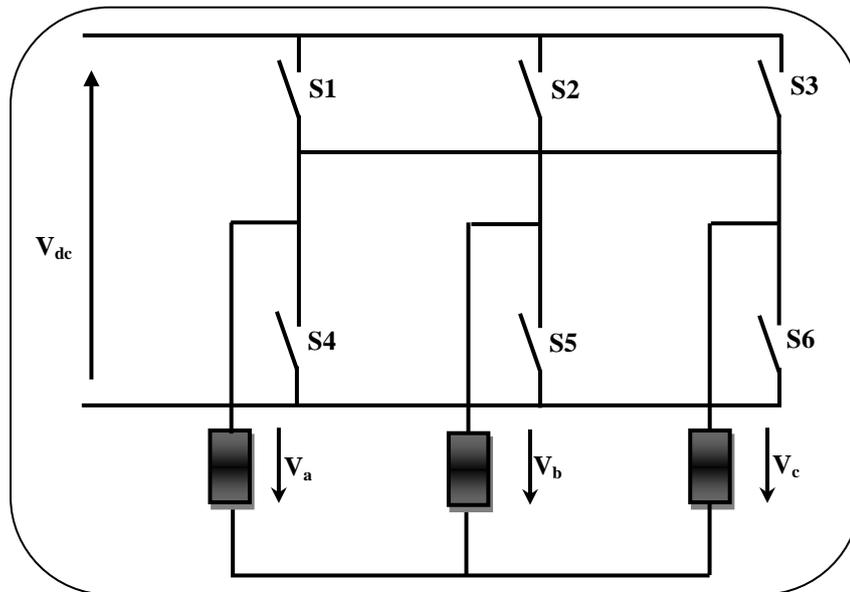


Figure (II-17): Modèle équivalent de l'onduleur.

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables S_a , S_b et S_c se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches

- **Branche1 :**

$S_a=0$ Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;

$S_a=1$ Si S1 est fermé et S4 est ouvert.

- **Branche2 :**

$S_b=0$ Si S2 est ouvert et S5 est fermé;

$S_b=1$ Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

- **Branche3 :**

$S_c=0$ Si S3 est ouvert et S6 est fermé;

$S_c=1$ Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II-45})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3} \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = \frac{1}{3} \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II-46})$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-47})$$

Pour déterminer les instants de fermeture et de d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique de M.L.I (modulation de largeur d'impulsion) qui consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale et une tension de modulation triangulaire.

II-3.9.1. Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulosinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation " m " égale au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence .
- Le coefficient de réglage en tension " r " égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation .

II-3.10. La commande d'une éolienne à base de MADA à vitesse variable:

La structure d'alimentation à deux convertisseurs MLI offre un contrôle de quatre grandeurs, à savoir le flux et la vitesse de la génératrice et les flux des puissances transitées au réseau. Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse en utilisant des pales orientables.

Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 25% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans le convertisseur sont peu importantes. Par conséquent, cette structure d'alimentation est la plus intéressante du point de vue cout et performance et celle-ci qui est plus amplement étudiée maintenant.[5]

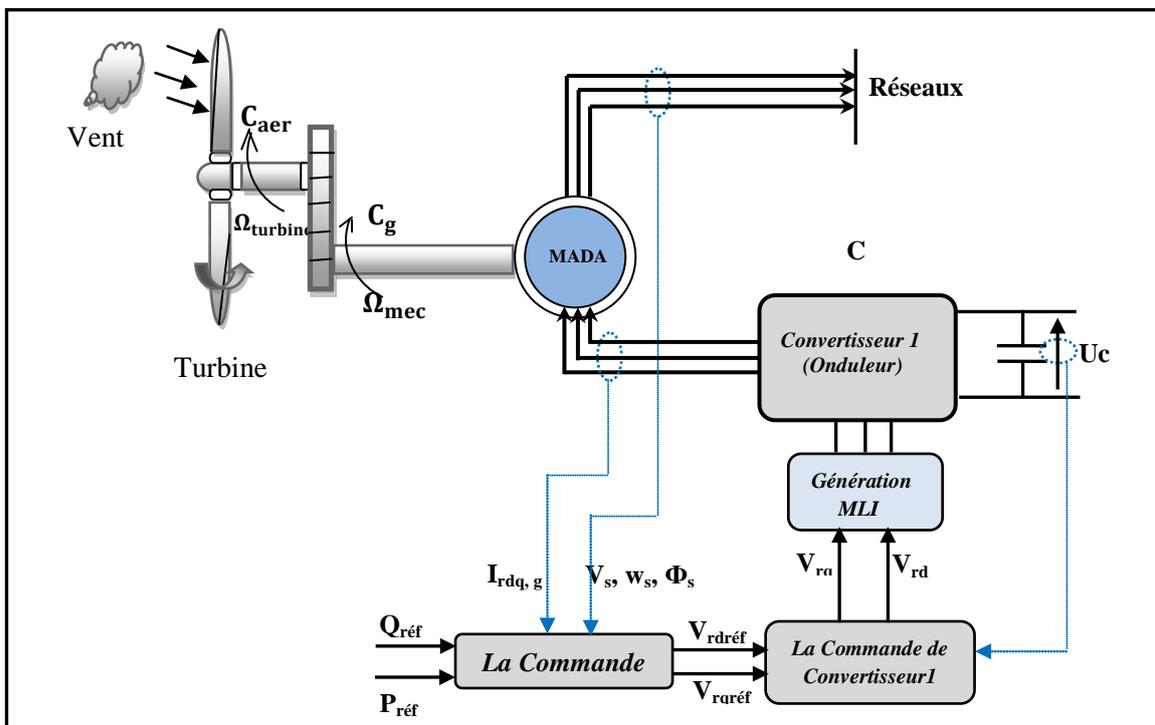


Figure (II-18):Commande d'une éolienne à base de MADA à vitesse variable

II-3.10.1. Commande vectorielle:

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (I_{ds} , I_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes (I_{qs}) commande le couple et l'autre (I_{ds}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée.[5]

II-3.10.1.1. Commande directe:

Dans cette section, nous présentons la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine, il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{qr} et d'autre par la puissance réactive et la tension V_{dr}

Pour régler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en composant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure II-16

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe présente sur la figure II-19.[5]

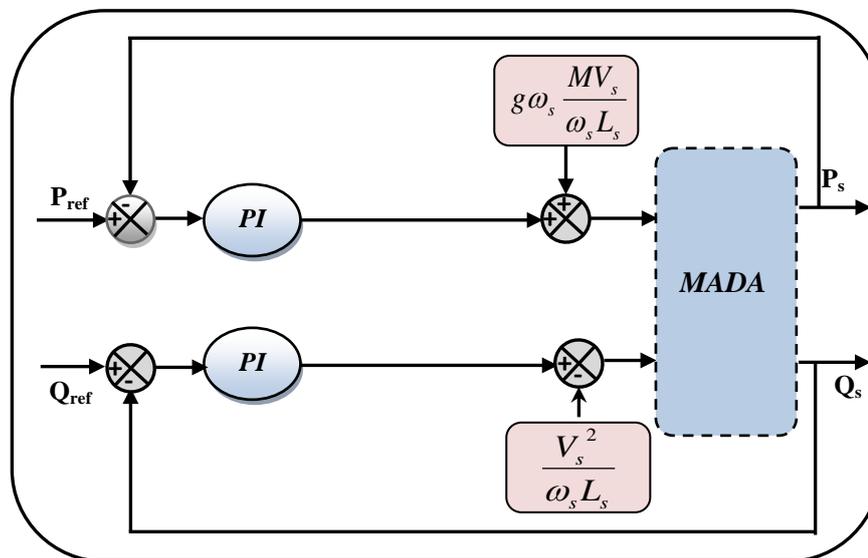


Figure (II-19) : la commande directe avec boucle de puissance

II-3.10.1.1.1. Résultats de simulations :

Nous avons simulé le système défini dans l'annexe

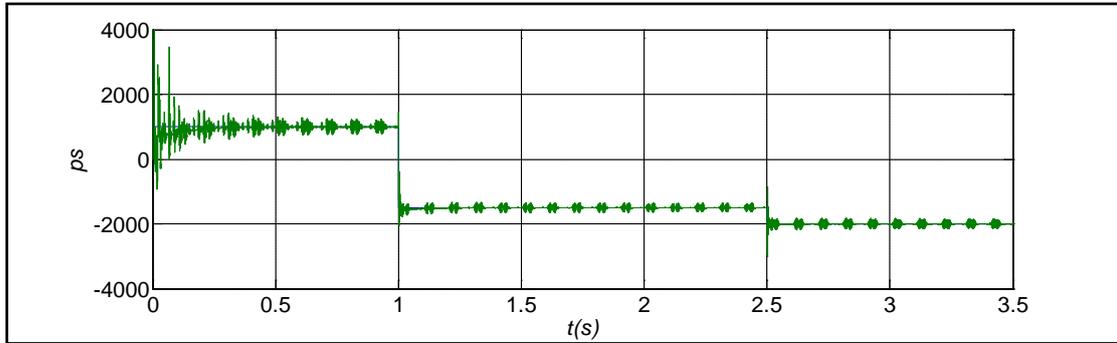
a) Test de Suivi de consigne:

- machine entraînée à 1500 tr/min.
- à $t = 1$ s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de 1KW à -1.5KW)
- à $t = 2.5$ s : échelon de puissance réactive (P_{ref} passe de -1.5KW à -2KW)

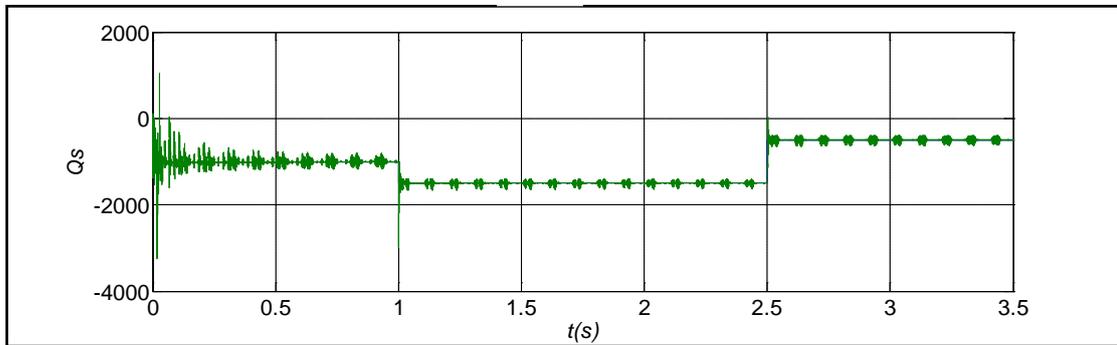
b) Interprétation des résultats.

On remarque que les échelons de la puissance sont bien suivis par la génératrice avec dépassement à l'instant (1s et 2.5s) pour la puissance active et réactive et des oscillations à

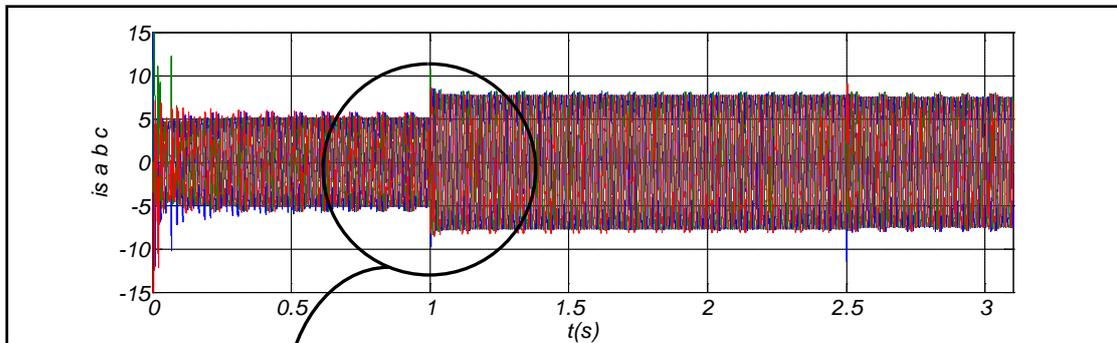
régime permanent figure (II-20) (a) et (b), On voit que la variation de la puissance active et réactive influence directement sur l'amplitude du courant rotorique, les courants rotoriques suivent la variation du consigne de puissance figure (II-20)(e) implique directement sur le couple électromagnétique figure (II-20)(e).



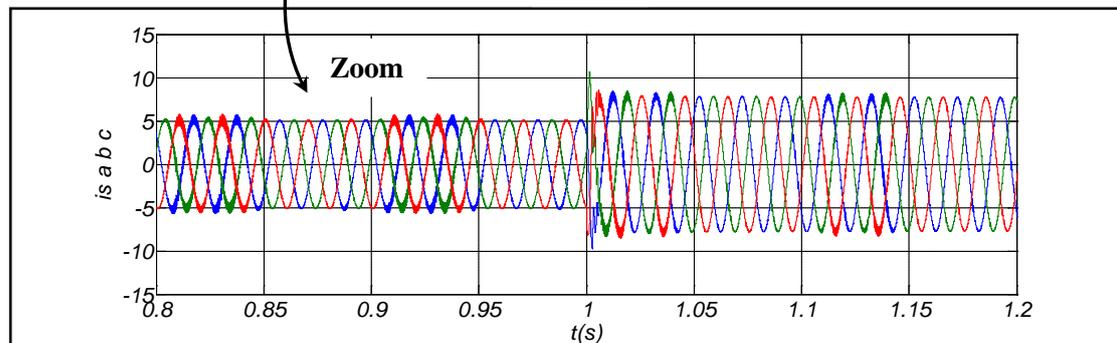
(a)



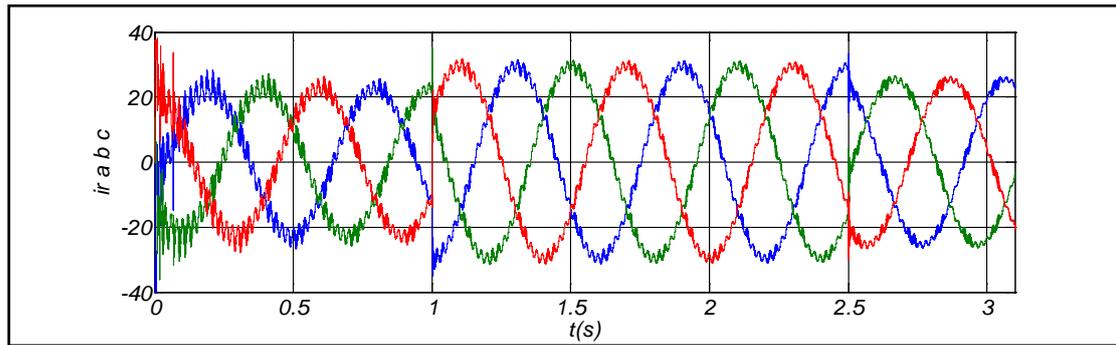
(b)



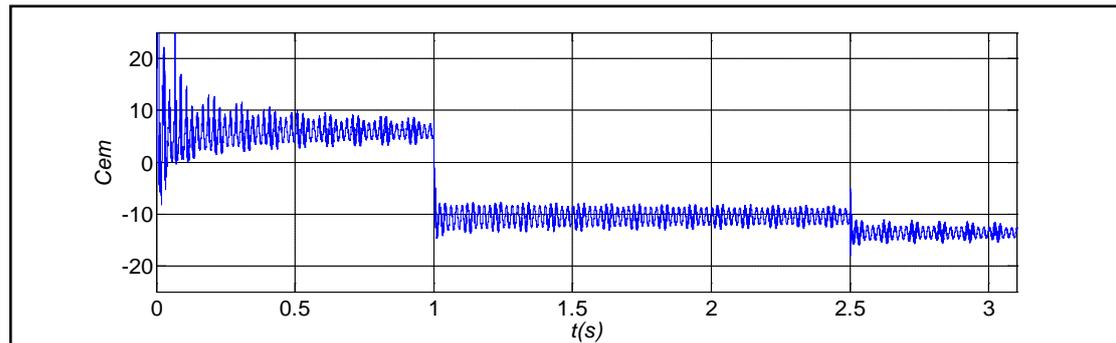
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure (II-20) résultat de simulation avec la commande vectorielle direct

II-3.10.2. Contrôle direct de puissance (CDP):

II-3.10.2.1. Présentation et modélisation

Le principe du contrôle direct de puissance (CDP) a été développé après le contrôle direct de couple (CDC) proposé par Takahashi et Depenbrock.

Concernant la stratégie du CDC, le flux et le couple sont contrôlés à l'aide des régulateurs à hystérésis. La technique du CDP propose de contrôler directement la puissance active et la puissance réactive, en faisant l'analogie avec le CDC. Ces stratégies de contrôle sont plus simples et plus robustes que le contrôle vectoriel à cause de la moindre dépendance de paramètres de la MADA. Seulement la valeur de la résistance statorique est nécessaire pour calculer la valeur et la position du flux statorique. CDP et CDC pour les machines asynchrones sont basés sur la sélection d'un vecteur de tension de telle manière que les erreurs entre les grandeurs mesurées et de référence sont réduites et maintenues entre les limites des bandes d'hystérésis.

Le CDP pour MADA est basé sur la sélection des vecteurs de tension rotorique. Le référentiel tourne solidaires avec le rotor de la MADA. Les puissances active et réactive sont contrôlées par deux régulateurs à hystérésis, les valeurs mesurées des puissances étant estimées à partir de relations [18]:

$$\begin{aligned} P_{mes} &= V_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + V_{s\beta} \cdot I_{s\beta} \\ Q_{mes} &= V_{s\beta} \cdot I_{s\alpha} - V_{s\alpha} \cdot I_{s\beta} \end{aligned} \quad (\text{II-48})$$

avec $V_{s\alpha}$, $V_{s\beta}$ les tensions statoriques et $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$ les courants statoriques dans le référentiel α, β fixé en stator.

Pour sélectionner le vecteur de tension rotorique optimum, il faut connaître la position relative du flux statorique dans les six sextants Figure (II-21).

Un onduleur triphasé peut produire huit combinaisons différentes, comme suit: $V_0(0\ 0\ 0)$, $V_1(1\ 0\ 0)$, $V_2(1\ 1\ 0)$, $V_3(0\ 1\ 0)$, $V_4(0\ 1\ 1)$, $V_5(0\ 0\ 1)$, $V_6(1\ 0\ 1)$, $V_7(1\ 1\ 1)$.

Les huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tension qui peuvent être appliqués aux bornes rotoriques de la MADA. Il y a six vecteurs actifs et deux vecteurs nuls. Les positions spatiales (dans le plan α, β) des vecteurs actifs de tensions sont montrées dans la Figure (II-21).[18]

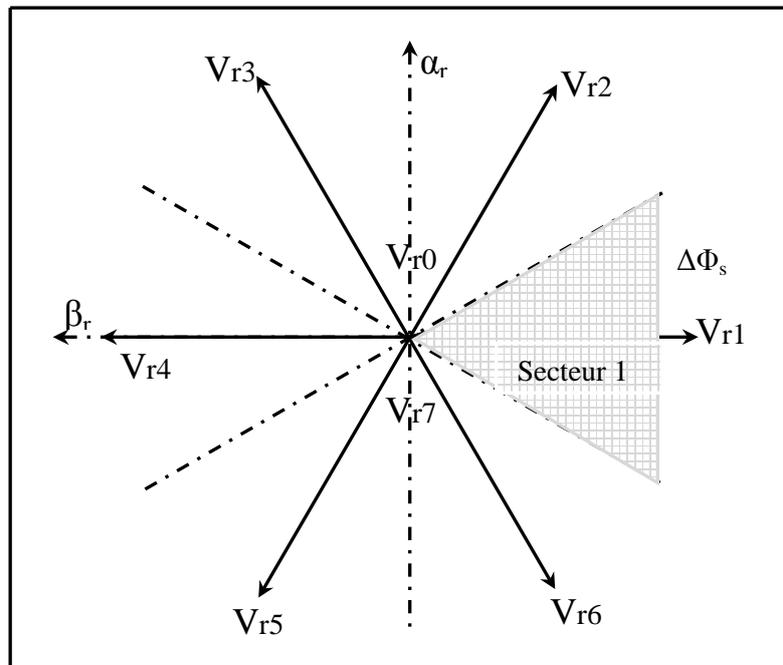


Figure (II-22): Les variations du flux statorique dans le Secteur 1.

Les composants du flux statorique $\Phi_{s\alpha}$, $\Phi_{s\beta}$ et la valeur du flux sont calculés à l'aide des relations suivantes, où R_s désigne la résistance statorique:

$$\Phi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s \cdot I_{s\alpha}) dt \quad (\text{II-49})$$

$$\Phi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s \cdot I_{s\beta}) dt \quad (\text{II-50})$$

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \quad (\text{II-51})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s\alpha}^r \\ \Phi_{s\beta}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_r & -\cos \theta_r \\ \cos \theta_r & \sin \theta_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{s\alpha}^s \\ \Phi_{s\beta}^s \end{bmatrix} \quad (\text{II-52})$$

Le tableau suivant détermine du secteur d'appartenance

secteur	$\Phi_{s\alpha}^r$	$\Phi_{s\beta}^r$
1	>0	$\frac{-\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r < \Phi_{s\beta}^r < \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r$
2	>0	$\Phi_{s\beta}^r > \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r$
3	<0	$\Phi_{s\beta}^r > \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r$
4	<0	$\frac{-\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r < \Phi_{s\beta}^r < \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r$
5	<0	$\Phi_{s\beta}^r < \frac{-\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r$
6	>0	$\Phi_{s\beta}^r < \frac{-\sqrt{3}}{2} \Phi_s^r$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-53})$$

Dans le précédent on a présenté la solution pour déterminer l'appartenance du flux statorique à un des six secteurs.

Comme déjà précisé, on utilise des régulateurs à hystérésis pour contrôler les puissances active et réactive (Figure (III-23)). Les régulateurs analogiques ont un désavantage notable : la fréquence d'échantillonnage est variable. Mais, ce problème peut être éliminé, si on utilise des régulateurs discrets. Par cela, les variations des puissances ne sont pas maintenues exactement dans la bande d'hystérésis, mais on fonctionne à temps d'échantillonnage fixe. [18]

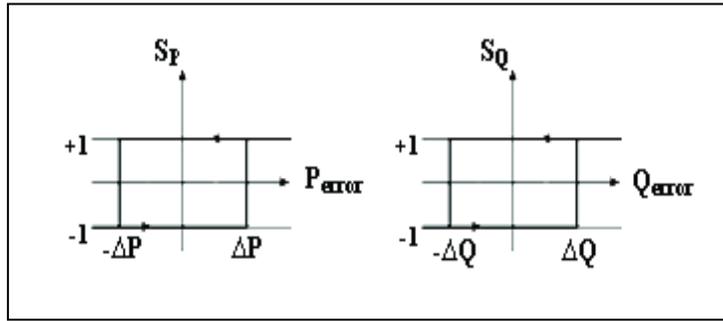


Figure (II-23): Régulateurs à hystérésis

secteur SQ Sp		1	2	3	4	5	6
		+1	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}
+1	-1	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}
-1	+1	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}
-1	-1	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}	V_{r5}

Tableau II.1 Sélection des vecteurs de tension rotorique

Dans cette application, on a choisi d'utiliser seulement les vecteurs actifs de tension pour des raisons de simplicité. L'utilisation des vecteurs zéro peut compliquer la stratégie de contrôle à cause du comportement différent de la MADA entre hypersynchronisme et hyposynchronisme.

Le Tableau président exprime la sélection des vecteurs de tension rotorique en correspondance avec l'état des régulateurs à hystérésis (1 ou -1).

Sachant la valeur de tension du bus continu, on peut écrire les expressions des tensions rotoriques : [\[18\]](#)

$$\begin{aligned}
 V_a &= \frac{V_{bc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\
 V_b &= \frac{V_{bc}}{3} (-S_a + 2S_b - S_c) \\
 V_c &= \frac{V_{bc}}{3} (-S_a - S_b + S_c)
 \end{aligned}
 \tag{II-54}$$

La Figure (II-24): présente la structure de contrôle détaillée.

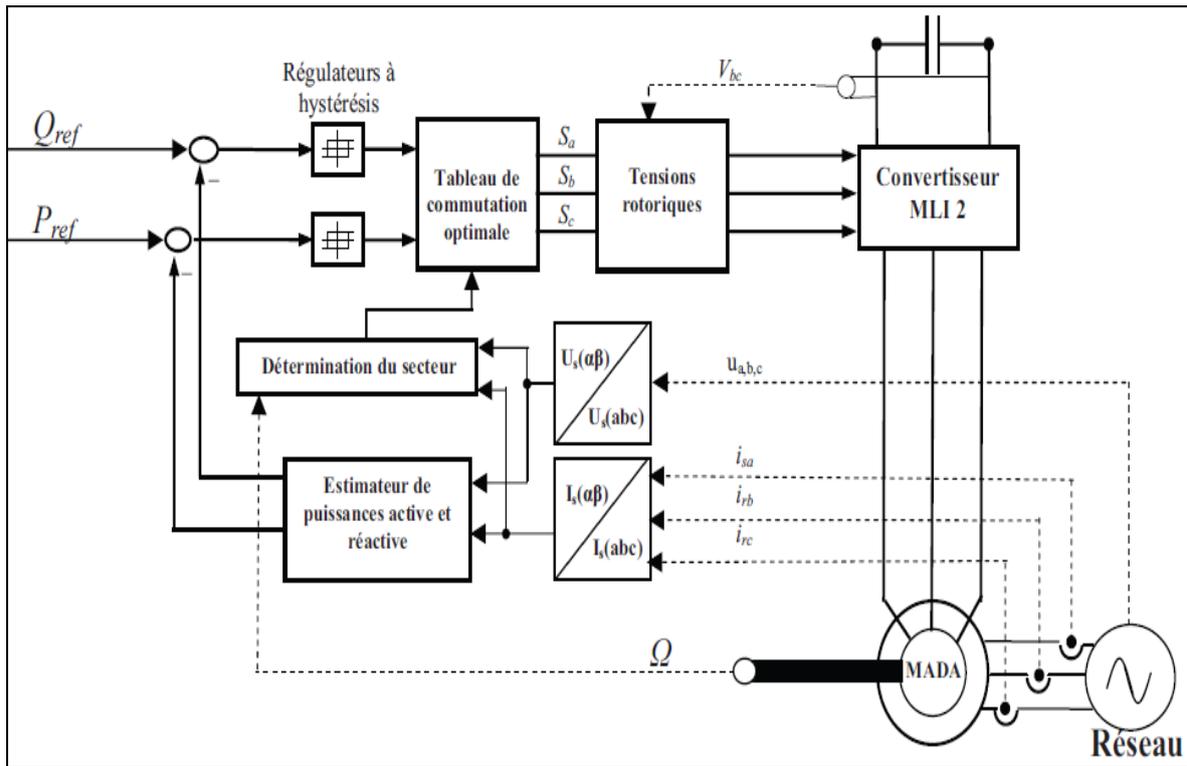


Figure (II-24): Schéma du CDP pour la MADA

II-3.10.2.2. Résultats de simulation

La simulation est effectuée en correspondance avec la simulation sur réseau, qui utilise le modèle de contrôle vectoriel. La valeur efficace de la tension composée du réseau est toujours 130 V. Le temps d'échantillonnage utilisé dans la simulation est 20 kHz. La valeur de référence pour la tension du bus continu est 100 V. Un temps d'échantillonnage maximisé et une tension du bus continu minimisée peuvent réduire les oscillations de la puissance débitée sur réseau [18].

La procédure suivie dans la simulation est :

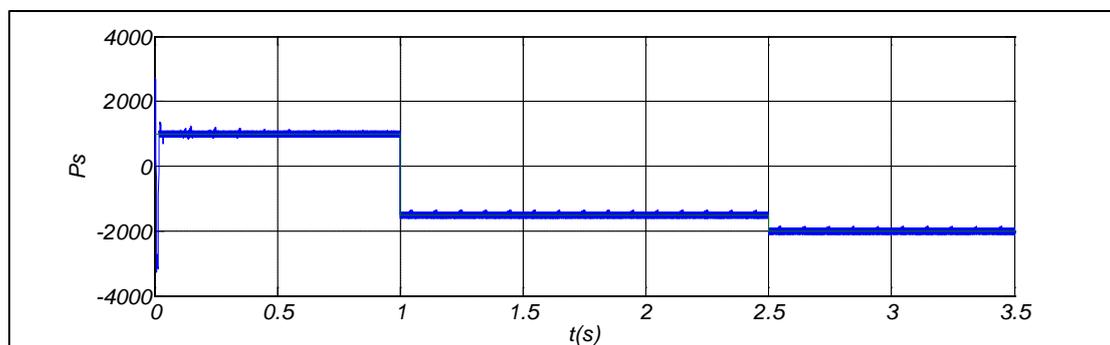
à $t = 0$ s, le système est connecté sur réseau avec les consignes des puissances $P_{sref} = 1$ kW et $Q_{sref} = -1000$ kVar ;

à $t = 1$ s, les consignes de puissances suivantes sont appliquées : $P_{sref} = -1.5$ kW et $Q_{sref} = -1500$ kVar;

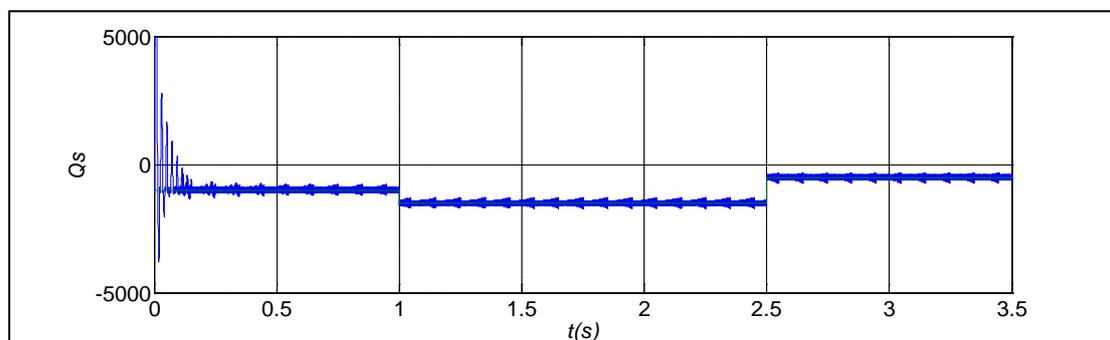
à $t = 2$ s, les consignes de puissances deviennent : $P_{sref} = -2$ kW et $Q_{sref} = -0.5$ kVar ;

Les vecteurs des tensions appliqués au rotor de la MADA permettent de maintenir les puissances autour des valeurs de référence. Les oscillations sont provoquées par la commutation des vecteurs appliqués. Ces oscillations sont visibles aussi au niveau des tensions statoriques V_a , V_b et V_c imposées par le réseau figure (II-25) (d). Au, la tension du bus continu est bien régulée

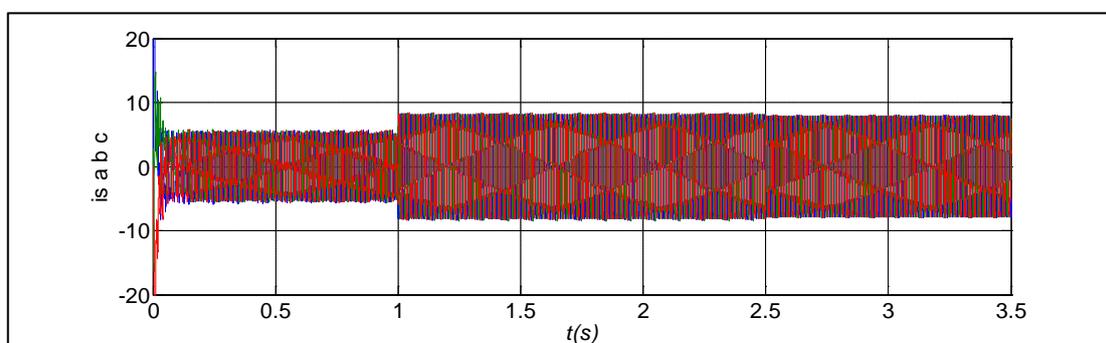
à 100 V, les perturbations étant déterminées par les commutations et les changements de consigne des puissances.



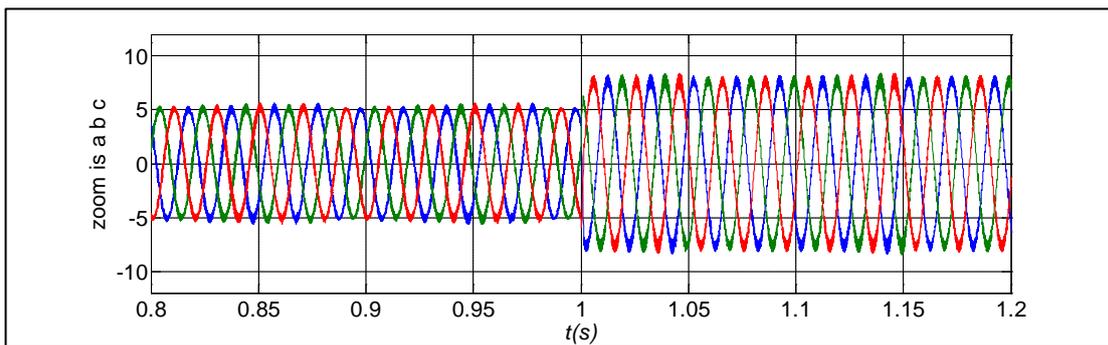
(a)



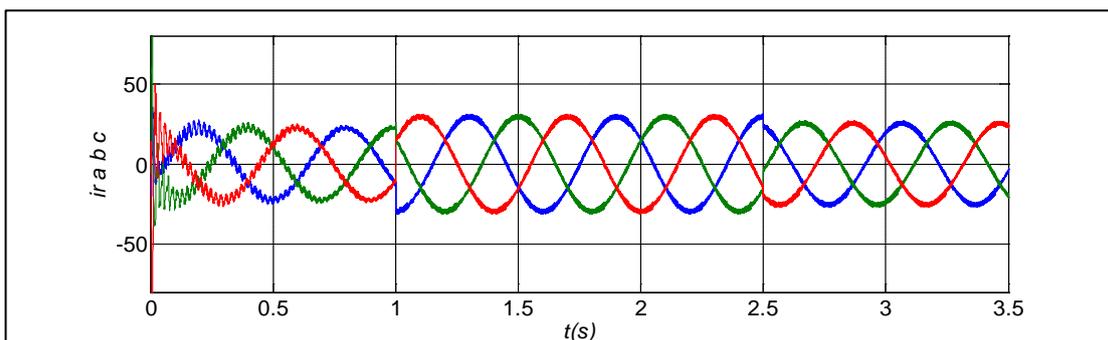
(b)



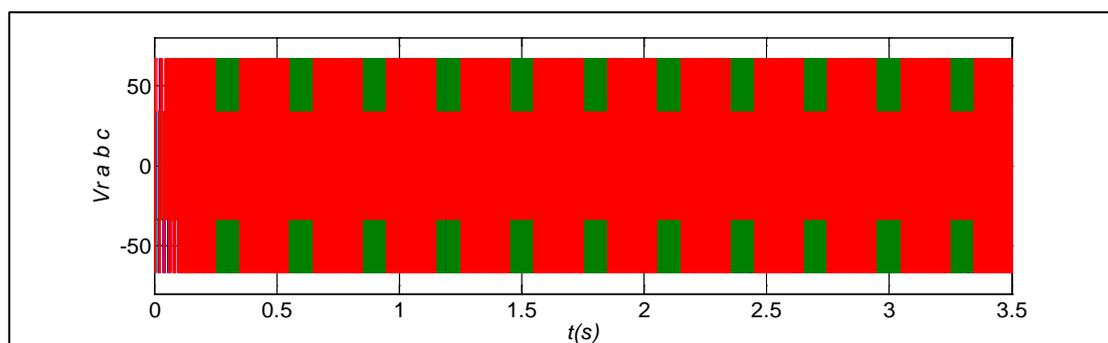
(c)



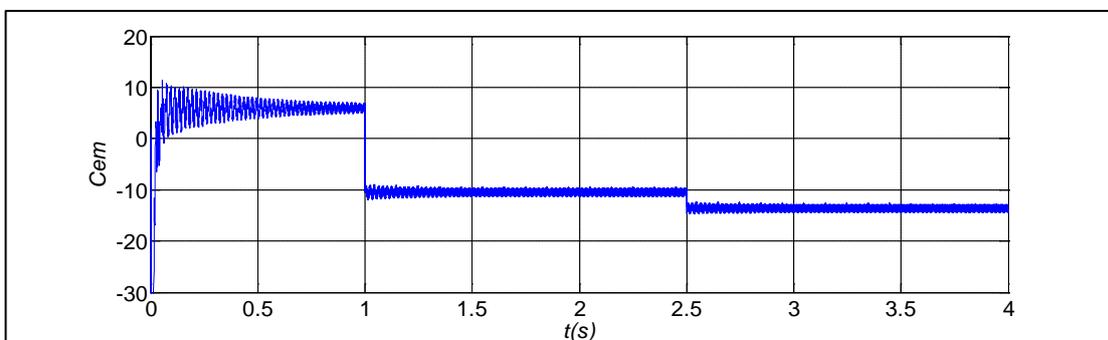
(d)



(e)



(f)



(g)

Figure (II-25) résultat de simulation avec la commande CDP

Le tableau suivant représente une petite comparaisant entre la commande vectorielle et la commande par contrôle direct de la puissance (CDP) :

interprétation Types de commande	Avantage et inconvénient	Résultat de simulation
Commande vectorielle	<ul style="list-style-type: none"> -Il ya un control du couple a l'arrêt -Le contrôle de la grandeur se fait en amplitude et en phase -elle simple et plus facile a implémente -Elle consiste a estimer le flux (mesure) pour pouvoir le régler -estimer θ_s pour l'utilisation de la transformation de park -faible robustesse aux variations paramétriques et en particulier à celle de constante du temps rotorique 	<ul style="list-style-type: none"> Ps , Qs: elles suivent ces consignes avec des petites oscillation en régime statique et un pique en régime dynamique -variation au niveau du couple est suffisante par rapport CDP en régime statique -Les courant statorique sont quasi sinusoïdal -pulsation du couple grand que telle de la CDP grâce à des oscillations au niveau du courant rotorique
Contrôle direct de la puissance	<ul style="list-style-type: none"> - la maitrise de la variation des puissances et les contrôle en temps réel. - la CDP Independent de la variation paramétrique - les courant rotorique ne sont pas mesure implique que les capteurs sont minimise - l'implémentation pratique de la commande exige un temps d'échantillonnage très réduit 	<ul style="list-style-type: none"> -Ps , Qs: elles suivent ces consignes avec très petites oscillation en régime statique et sans pique en régime dynamique - temps de repense est petit par rapport au CV en régime dynamique -Les courant statorique sont quasi sinusoïdal

II-3.11. Conclusion.

Dans ce chapitre on a modélisé le système global d'une éolienne de 3kW de puissance à vitesse variable. Cette modélisation nous a montré un fort couplage entre les puissances actives et réactive. Ainsi que le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander. Pour ça, nous avons développé un modèle de la machine dans le référentiel lié au champ tournant (d, q), en vu de la commande des puissances active et réactive.

Le développement de différentes méthodes de commande a permis de mettre en évidence des aspects intéressants pour la poursuite de l'étude du système éolien. Effectivement, nous avons pu voir que la commande directe, la plus simple à mettre en œuvre, présentait des résultats convenables avec une faible complexité de mise en œuvre.

En revanche, la méthode Contrôle direct de puissance (CDP) nous permet, d'obtenir un système performant. Cette commande, certes, plus complexe à mettre en œuvre, permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres.

CHAPITRE III

**Etude de l'impact de la commande de la
MADA sur la stabilité des réseaux
électriques**

III-1. Introduction.

L'augmentation de la puissance éolienne installée en Europe a un impact croissant sur le réseau de transport du fait de la difficulté à prévoir la production, de la capacité d'accueil limitée du réseau, du risque de déconnexions intempestives des fermes d'éoliennes et d'une dégradation de la qualité de l'électricité. Ce chapitre propose alors dans un premier temps une synthèse de cette problématique et en particulier des contraintes liées au raccordement des éoliennes au réseau. Ainsi, nous allons analyser les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de l'énergie

L'étude de la stabilité transitoire consiste à analyser la réponse des machines à la suite d'une forte perturbation en diverses positions du système électrique. Pour cela, des simulations sont effectuées sur quelques réseaux électriques avec et sans l'intégration de la MADA.

La simulation effectuée sous environnement Matlab, en utilisant le PSAT, le comportement dynamique d'un système électro- énergétique et le problème de la stabilité est prévue pour nous donner des informations prédictives sur : La stabilité des machines (angle rotorique, les oscillations des vitesses angulaire), les valeurs crêtes de tension, les puissances actives et réactives générée... etc, à la suite des différentes types des défauts.

Dans ce chapitre, on étudie l'influence de l'intégration d'une ferme éolienne dans le réseau électrique, vis-à-vis de la stabilité transitoire. Pour se faire, on a considéré un réseau tests

III-2. Le problème de la stabilité des réseaux électriques

III-2.1. Introduction

L'un des problèmes les plus importants lors de l'étude d'un réseau d'énergie électrique complexe, est celui de sa stabilité. Ceci est dû au développement important des réseaux ces dernières années, mais aussi à l'objectif de ce type d'étude qui est d'examiner le comportement du réseau face à des faibles ou importantes perturbations. Les variations continues de charge sont un exemple de petites perturbations, les défauts comme les court-circuits et la perte de synchronisme d'un générateur de forte puissance sont des exemples de grandes perturbations. Ces perturbations sont à l'origine de l'apparition d'une différence entre la puissance mécanique (la production) et la puissance électrique (la consommation). Cet écart doit être absorbé sous forme d'énergie et à l'heure actuelle on sait stocker l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique dans des volants d'inertie. Leur défaut est un très mauvais rendement. L'écart en terme de puissance va se traduire par une modification de la vitesse de rotation de l'alternateur

ou en d'autres termes par des variations de sa vitesse autour de la vitesse de synchronisme. Après l'élimination de la perturbation, le réseau sera stable si la valeur moyenne des écarts de vitesse est nulle. Dans ce cas, le réseau continue à fonctionner en satisfaisant ses limites d'exploitation et en alimentant ses consommateurs. [19]

On distingue deux types de stabilité du réseau électrique : celle de son angle rotorique des alternateurs ou celle de la tension. Suivant la valeur de la perturbation, on classe la stabilité des réseaux électriques : la stabilité dynamique, la stabilité statique et la stabilité transitoire. [20]

Dans notre travail et pour les fermes éoliennes, la principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité, c'est pourquoi, il est important d'évaluer l'impact de la commande des fermes éoliennes sur la stabilité des réseaux électriques et en particulier, sur sa stabilité transitoire à la suite d'une perturbation donnée.

III-2.2. Différents types de stabilité des réseaux électriques

III-2. 2.1. Stabilité statique

En général, à la fin d'un régime transitoire provoqué par une perturbation, le système atteint son régime permanent. Dans ce cas, l'étude de la stabilité du système, porte sur l'évaluation de l'état statique du réseau. Le système n'est pas en état de stabilité statique si les contraintes de fonctionnement ne sont pas respectées. Cet état est appelé : état instable ou état d'urgence. Dans un réseau qui est dans un état d'urgence, les opérateurs du centre de contrôle ont suffisamment de temps pour ramener le système à l'état stable ou au régime normal en apportant des modifications supplémentaires. Si certaines contraintes d'exploitation ne sont pas respectées, l'une des parties du réseau se sépare du système, le reste continuant son fonctionnement normal.

Une autre définition peut être donnée à la stabilité statique qui consiste à dire qu'un réseau d'énergie électrique est dit stable en régime statique si suite à une perturbation quelconque infiniment petite, il retrouve un état de marche synchrone, identique ou infiniment voisin de l'état d'origine. [19]

III-2. 2.2. Stabilité dynamique

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. [19]

III-2. 2.3. Stabilité transitoire

La stabilité transitoire d'un réseau électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines.
- La perte d'ouvrages.
- La perte de groupes de production, etc.

La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation.
- de la durée de perturbation.
- du lieu de perturbation.
- de la performance des systèmes de protection (relais, réenclenchement).
- du point de fonctionnement avant défaut. [19]

Le tableau suivant résume les caractéristiques des différents types de stabilité :

<i>Caractéristiques des types de stabilité</i>				
Caractéristiques stabilité	<i>Modèle</i>	<i>Constante de temps</i>	<i>Types de perturbation</i>	<i>Phénomènes à observer</i>
<i>statique</i>	En petits mouvements	5 à 10 [s]	petites	-Insuffisance du couple synchrone
<i>dynamique</i>	En petits mouvements	5 à 30 [s]	petites	-insuffisance du couple d'amortissement -action du contrôle instable
<i>transitoire</i>	transitoire	≥ 10 [s]	grandes	-mouvement aperiodique -premiere oscillation

III-3. Etude de la stabilité transitoire des réseaux électriques

L'objectif est de détecter le cas le plus défavorable pour la stabilité transitoire d'un réseau et c'est ce cas qui sera retenu dans les chapitres suivants où nous étudierons l'intégration des fermes éoliennes dans les réseaux électriques pour étudier cette stabilité. Dans un premier

temps nous allons écrire l'équation électromécanique d'un générateur connecté au réseau pour un système mono machine puis multi machine.

Les figures (III-1) et (III-2) montrent les courbes d'angle rotorique des machines du réseau en fonction du temps dans le cas d'un system stable et instable.

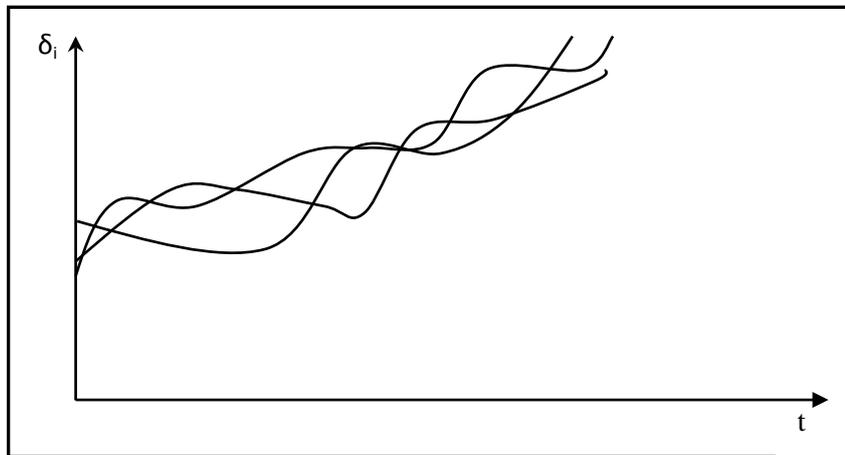
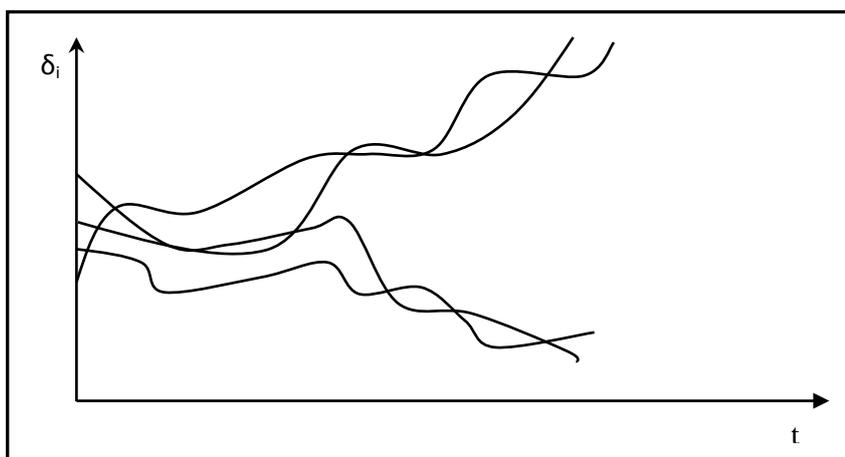


Figure (III-1): system stable



Figure(III-2): system instable

III-3.1. Cas d'une machine connecté à un réseau infini

Usuellement la puissance fournie par l'ensemble des machines compense exactement la totalité des puissances demandées et les pertes dans le réseau. Tant qu'aucune perturbation n'affecte le système, les écarts entre les angles internes des différents alternateurs demeurent constants. [20]

L'apparition d'un défaut provoque une rupture entre la production et la consommation. Deux cas se présentent :

- La perturbation est de faible amplitude et lente. Les organes de régulation se chargent de rétablir l'équilibre.

➤ La perturbation est de grande amplitude comme un court-circuit. Le déséquilibre entre la production et la consommation est responsable de l'évolution des angles internes. Les automates de protection interviennent alors en éliminant l'organe affecté. Un régime transitoire va s'instaurer conduisant à un nouveau régime d'équilibre ou à une désynchronisation des machines. [20], On considère le système de la figure (III-3) :

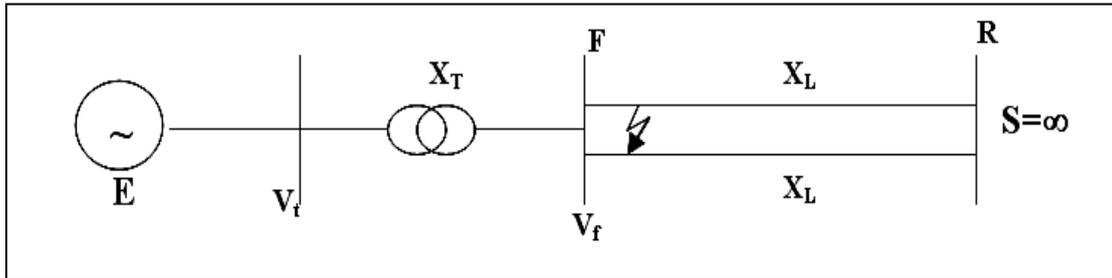


Figure (III-3) : Schéma unifilaire de raccordement d'une machine à un réseau infini

III-4. Etude de la stabilité transitoire :

III-4. 1. Raccordement des éoliennes aux réseaux électriques

Une fois l'éolienne produit l'électricité, l'énergie électrique est transportée aux consommateurs par des réseaux électriques. Typiquement, pour les machines d'une puissance supérieure à 100 kW, la tension produite en sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur de puissance élévateur de tension qui permet de se raccorder aux réseaux de moyennes tensions pour les fermes éoliennes de petites puissances, ou aux réseaux d'interconnexions pour les fermes éoliennes de fortes puissances (fermes éoliennes offshore), où la présence du vent est plus régulière. [20]

Cependant, le raccordement aux réseaux doit prendre en compte les conditions de couplage, qui se résument comme suit :

- L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces ;
- L'égalité de fréquences ;
- Un déphasage nul entre elles ;
- En triphasé, même succession des phases.

III-4. 1.1. Nécessité de même fréquence nominale

Les électriciens se rendent bien compte que, s'ils veulent interconnecter leurs réseaux, il faut faire le choix d'une fréquence nominale commune, ce qui à l'avantage supplémentaire

d'harmoniser la construction des matériels.

III-4. 1.2. Nécessité de même tension

Ce problème est moins grave, à l'intérieur de la même tension normalisée, les écarts de tension entre les points de jonction des deux réseaux interconnectés doivent être très faibles, sinon l'interconnexion est traversée par des transits de puissance réactive excessifs.

III-4. 1.3. Marche en parallèle des alternateurs

Cette question doit être étudiée très tôt, dès qu'il s'agit de réunir électriquement plusieurs alternateurs, situés à quelque distance les uns des autres. Et toute une génération d'électrotechniciens s'évertue à établir la théorie du fonctionnement en parallèle des machines synchrones, et particulièrement des conditions de stabilité.

On peut regrouper ces conditions et classer les problèmes de la stabilité dans le plan suivant :

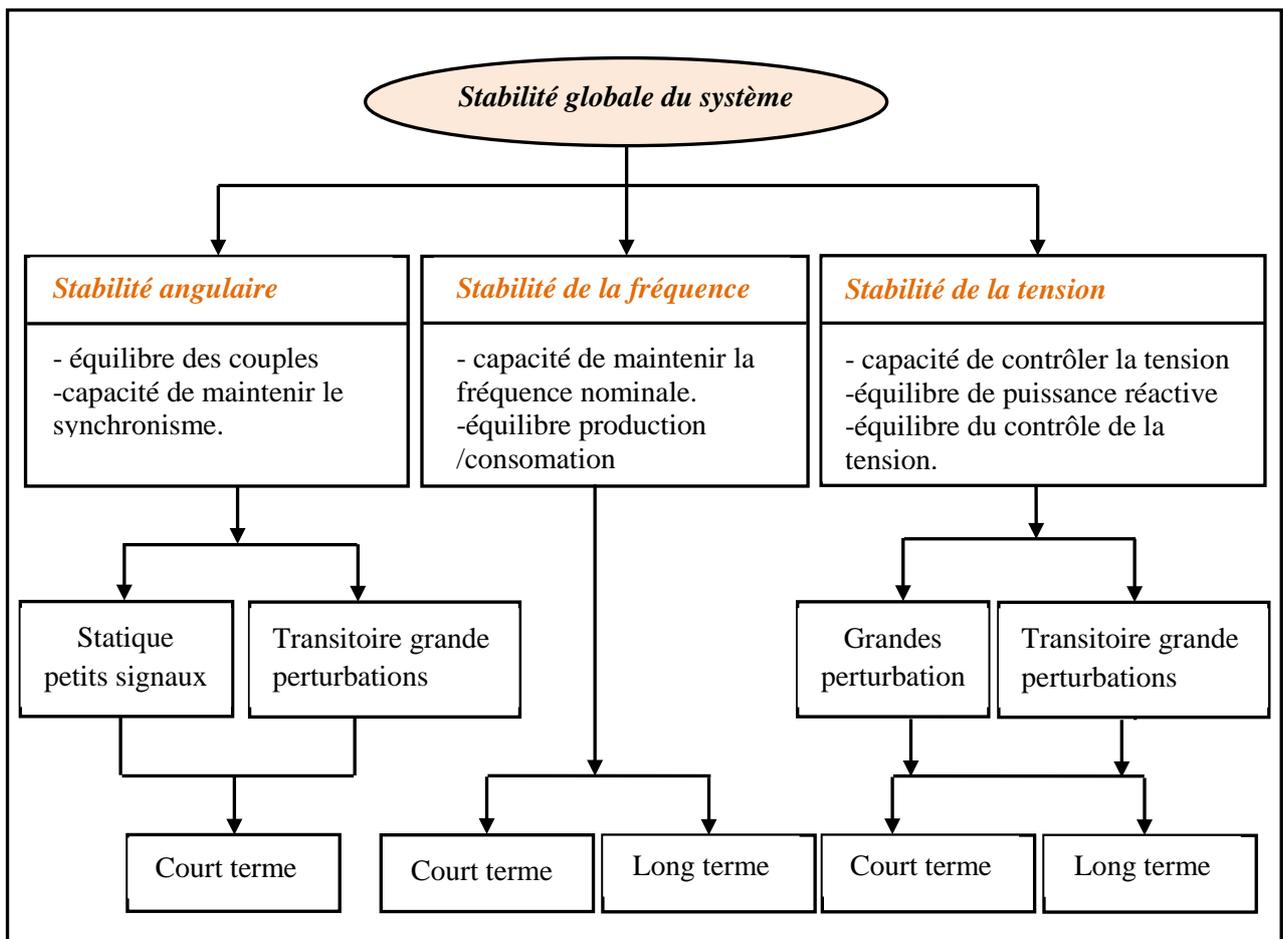


Figure (III-4) Classification des problèmes de la stabilité

III-4.2. Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans un réseau Electrique

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

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

III-4.2.1. 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 [10] 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

III-4.2.2. 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. [10]

III-4.3. Description des facteurs affectant la qualité énergétique

III-4.3.1. Fluctuation de tension

Le problème principal est le creux de tension dont l'origine est liée aux courts-circuits qui peuvent être provoqués par l'enclenchement de gros moteurs, d'appels de charges importantes, etc. 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) [10].

Les autres applications de l'électricité ne sont, normalement, pas affectées par ces phénomènes tant que la variation d'amplitude reste inférieure à 10%.

III-4.3.2. 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 voluant 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.

III-4.3.2. 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 haute fréquence (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.[10]

III-4.4. Outils de simulation

Dans notre étude, on a choisi le PSAT comme logiciel de simulation pour valider les modèles étudiés. Le PSAT (Power System Analysis Toolbox), figure (III.5), est une boîte à outils dans le Matlab qui sert à analyser les systèmes électro-énergétiques et leur contrôle. Le PSAT inclut : [21]

- ❖ L'écoulement de puissance basé sur la méthode de Newton Raphson.
- ❖ L'écoulement de puissance continu.
- ❖ L'écoulement de puissance optimal.

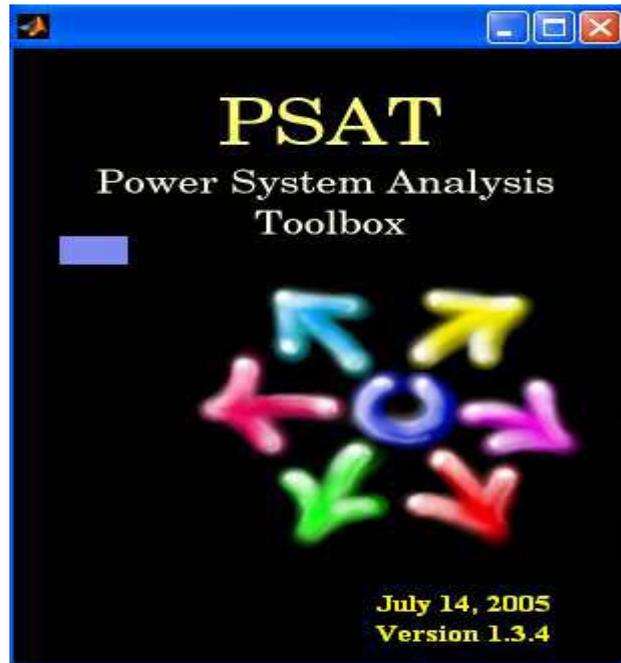
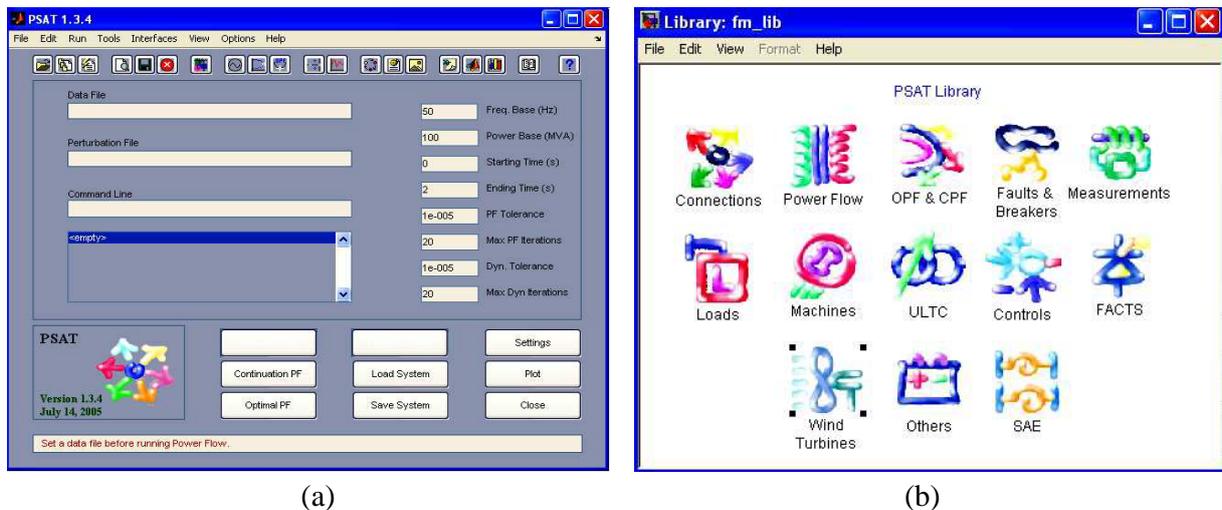


Figure (III-5) : Fenêtre de PSAT

Toutes les opérations de PSAT peuvent être réparties en deux genres d'analyse :

- ❖ Le premier analyse est de résoudre les problèmes de l'écoulement de puissance. Cette application s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la figure (III-6(a)).
- ❖ Le second analyse est d'implanter le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque de Simulink qui contient de nombreux modèle pour l'implantation les systèmes électriques, figure (III-6(b)).



(a)

(b)

Figure (III-6) : L'éditeur de PSAT (a) et bibliothèque de simulink (b)

III-4.5. Sans l'intégration de la ferme éolienne

III-4. 5.1. Description du réseau étudié

Cette application consiste à simuler le comportement de réseau test figure (III-7) constitué de:

- ❖ 3 machines
- ❖ 9 jeux de barres
- ❖ 3 charges statiques

En affectant un défaut symétrique au niveau de jeux de barres 7 de durée de 5 périodes à 50 Hz. Toutes les données sont exprimées en (pu) dans la base de puissance de : $S = 100$ MVA.

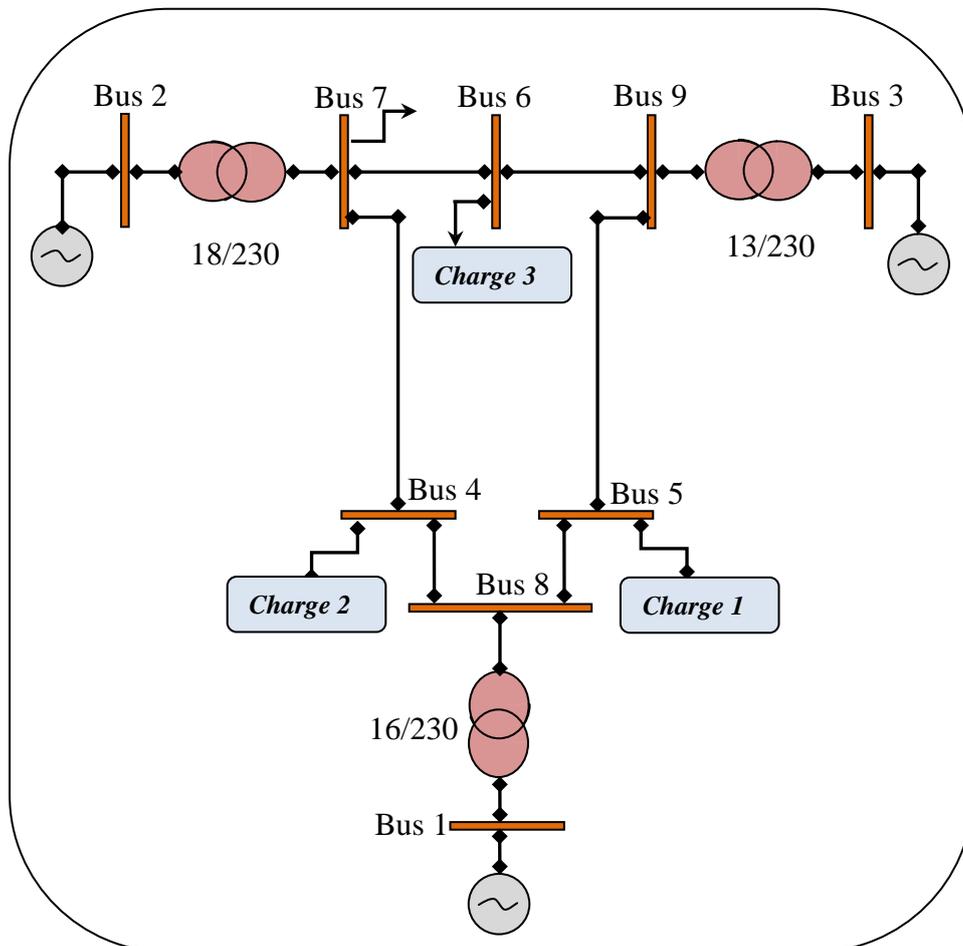


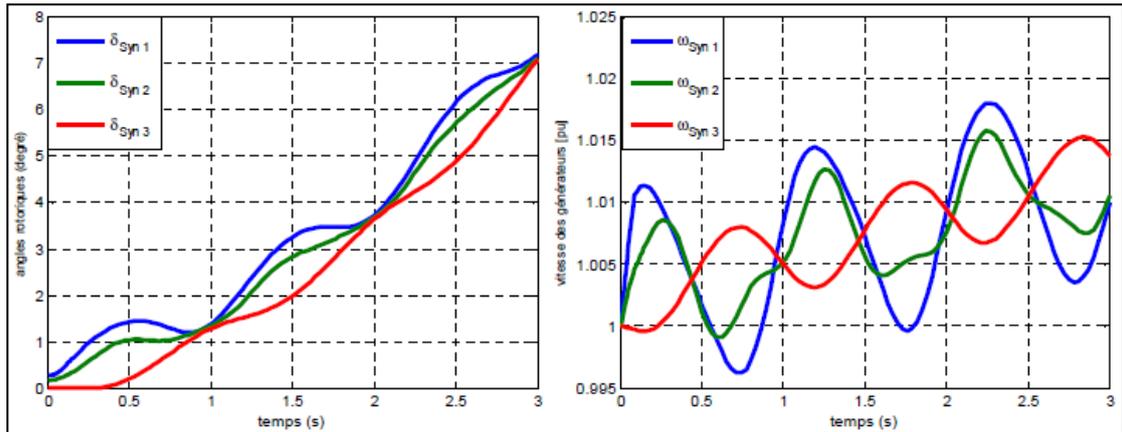
Figure (III-7) : Réseau 3 générateurs 9 jeux de barres [22]

Pour valider les résultats du programme simulation, Le PSAT permet de résoudre le problème de l'écoulement de puissance.

III.4. 5.2. Simulation

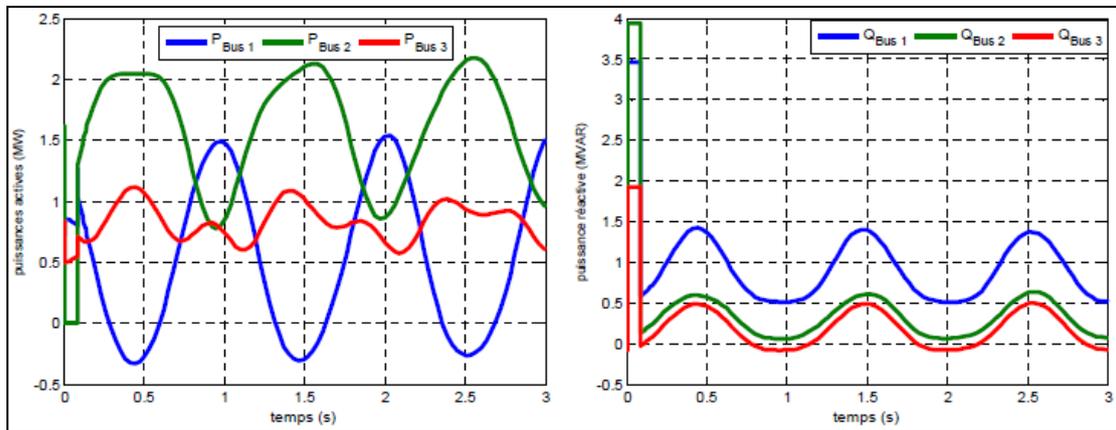
L'exécution de programme PSAT nous a permis d'obtenir les résultats de simulations

représentées dans la figure (III-8)



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure (III-8) : Simulation d'un réseau de 3 générateurs 9 jeux de barres

- a- Les angles rotoriques des trois générateurs [degré].
- b- Les vitesses angulaires des trois générateurs [pu].
- c- Les puissances actives aux jeux de barres de connexion [MW]
- d- Les puissances réactives aux jeux de barres de connexion [MVAR]

III-4. 5.3. Interprétation des résultats obtenus

On constate que les comportements des générateurs à la suite de cette perturbation sont identiques sauf que n'atteint pas des mêmes valeurs à cause des facteurs suivants :

- Les caractéristiques des machines.
- La distance qui sépare les machines de la perturbation.

Pendant le défaut, une chute de tension importante apparaît aux bornes des jeux de barres de connexion. Lors de l'apparition du C-C à $t = 0.083s$, les tensions oscillent longuement.

Du fait que la puissance électrique fournie est en fonction de la tension, elle diminue considérablement, alors une énergie d'accélération importante apparaît au niveau des rotors, ce qui provoque une augmentation des vitesses de rotations et par conséquent les angles de charges.

Si on prend les angles rotoriques comme indicateur de stabilité, on observe que (δ_2 , δ_1 , δ_3) ont même allure, donc on peut dire que le fonctionnement du système est transitoirement stable dans ces conditions.

III-4.6. Avec l'intégration de la ferme éolienne

III. 4.6.1. Introduction

Diverses configurations d'éoliennes pour extraire l'énergie du vent sont utilisées, l'objectif commun est d'être transféré un maximum de puissance sur une large plage de variation de la vitesse pour adapter à la fréquence du réseau. La marche à vitesse variable pour les éoliennes est orientée vers la conception de haute puissance. Pour ces applications, les machines à double alimentation (MADA) ont grand intérêt car ils sont capables de contrôler et de générer une puissance élevée grâce à la réduction des convertisseurs par rapport aux autres technologies pour la même puissance.

Le comportement électrique des réseaux test choisis, face au défaut symétrique est alors étudié. L'influence de ce défaut est mise en évidence. La comparaison des résultats sera présentée en examinant les différents critères et grandeurs électriques sur l'impact de la commande sur la stabilité transitoire du réseau.

III-4.6.2. Ferme éolienne : commande directe

III-4.6.2.1. Description du réseau étudié

La modélisation des éoliennes qui fonctionnent à vitesse variable et basées sur la MADA est particulièrement complexe. La complexité découle du fait que les convertisseurs d'électroniques de puissance sont par nature des systèmes à événements discrets, alors que les éléments du réseau électrique alternatif sont des systèmes en continu. Pour l'analyse du comportement du réseau électrique face à une forte perturbation, il convient de définir un modèle équivalent du système éolien et les convertisseurs de puissance. Le modèle proposé prend en compte les éléments utiles des courants et des tensions dans le système de génération.

Les simulations réalisées ont démontré la fonctionnalité et l'efficacité d'analyser l'impact de l'intégration des fermes éoliennes dans un réseau électrique représenté dans la figure (III-9),

ainsi l'étude de la stabilité transitoire à la suite d'une perturbation donnée.

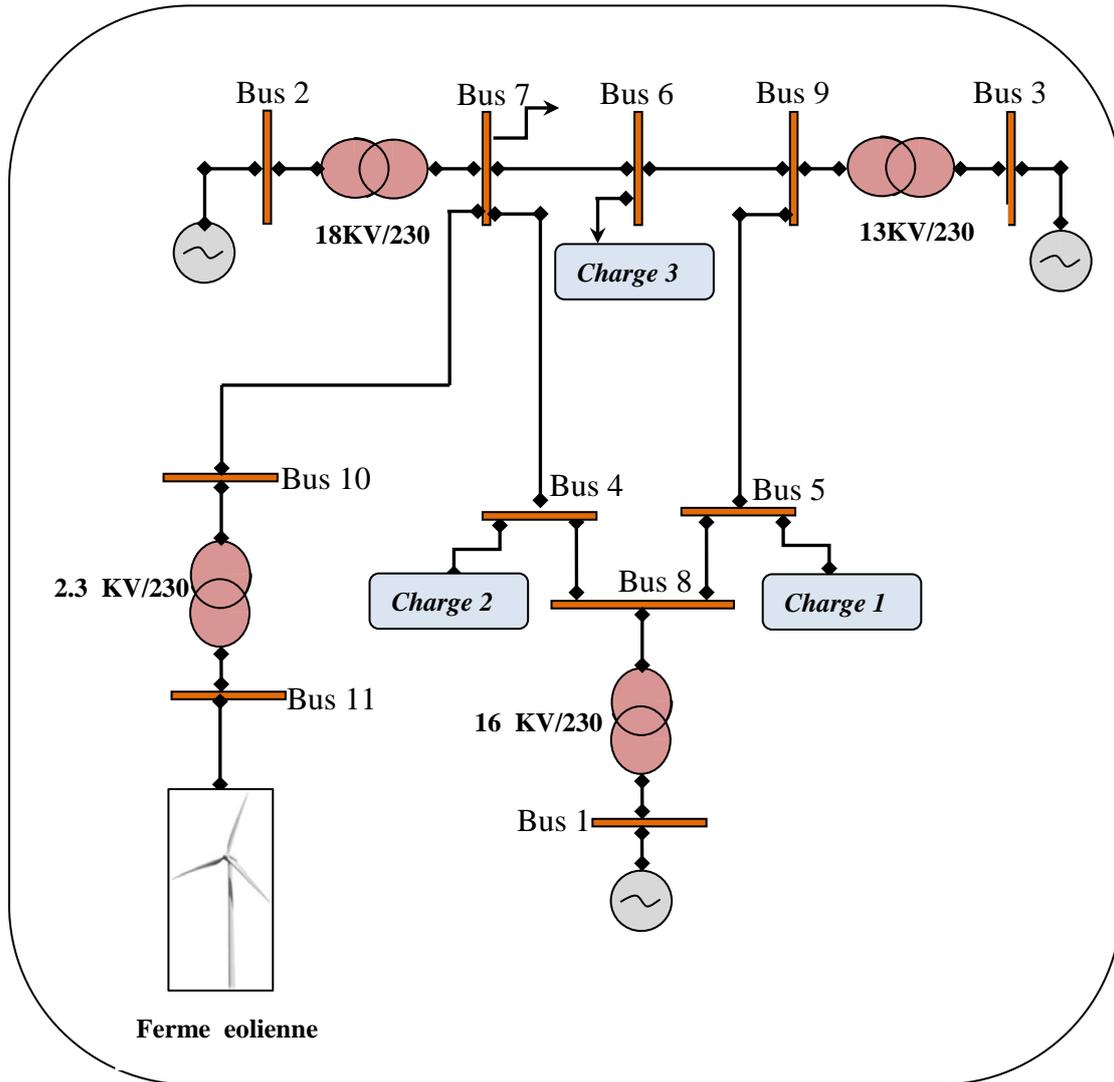


Figure (III-9) Intégration de la ferme éolienne basée sur MADA au réseau de 3 générateurs 11 jeux de Barres

Ce réseau test contient:

- 3 machines.
- 11 jeux de barres.
- 3 charges statiques.

En affectant un défaut considéré de:

- Type : triphasé.
- Lieu: jeu de barres h.7.
- Durée de défaut: 5 périodes à 50 Hz.

III-4.6.2.2. Simulation

L'exécution de programme PSAT de durée de 3s, nous a permis d'obtenir les résultats de

simulation représentés dans les figures (III-10).

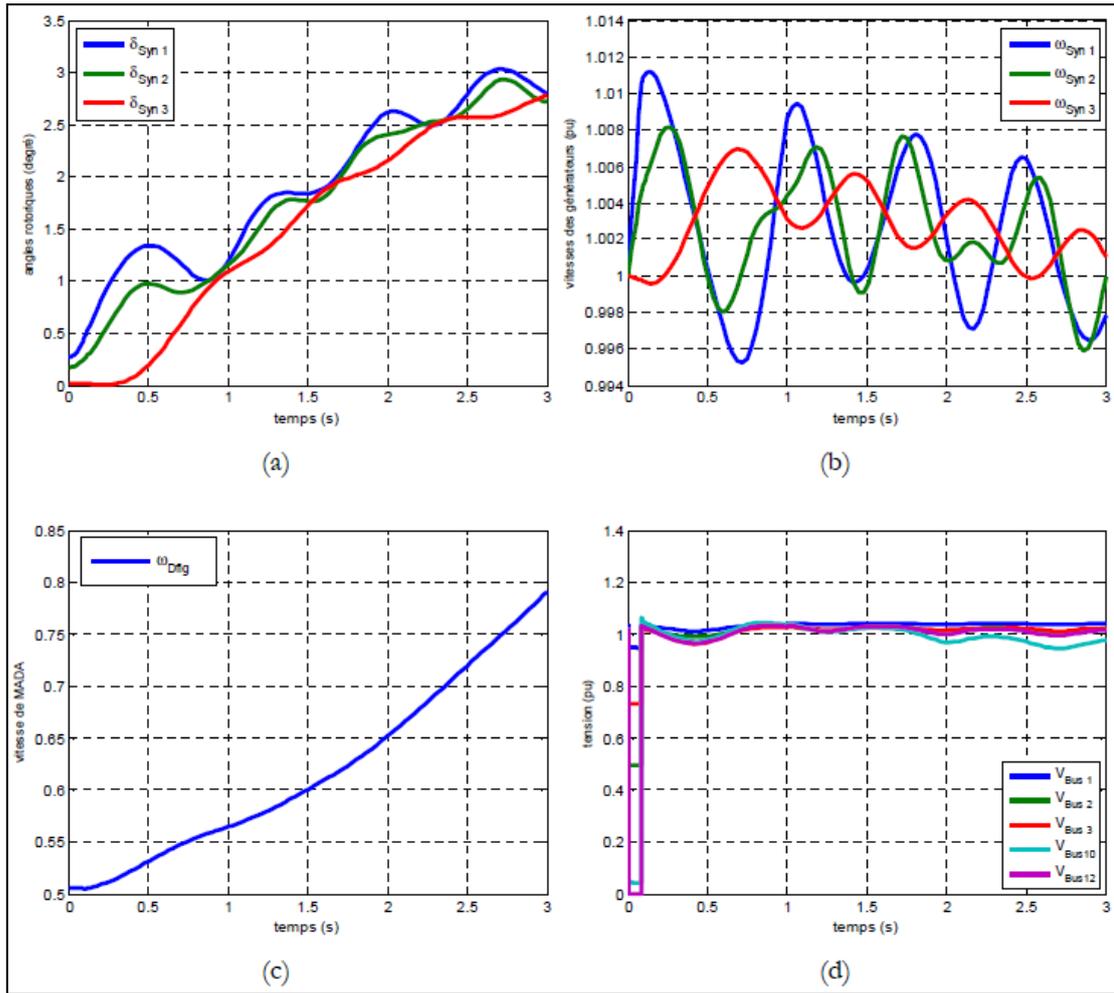


Figure (III-10) : Simulation de la ferme éolienne basée sur MADA intégrée au réseau de 3 générateurs et 9 jeux de barres

- a- Les angles rotoriques des trois générateurs [degré].
- b- Les vitesses angulaires des trois générateurs [pu].
- c- La vitesse angulaire de la MADA [pu].
- d- Les tensions aux jeux de barres de connexion [pu].

Les figures (III-11) (a), (III-11) (b), (III-11) (c), (III-11) (d) représentent respectivement les puissances actives et réactives aux jeux de barres de connexion où les générateurs délivrent ces puissances ainsi aux jeux de barres où la ferme éolienne est connectée, et le déphasage entre le courant et la tension dans tous les jeux de barres de connexion.

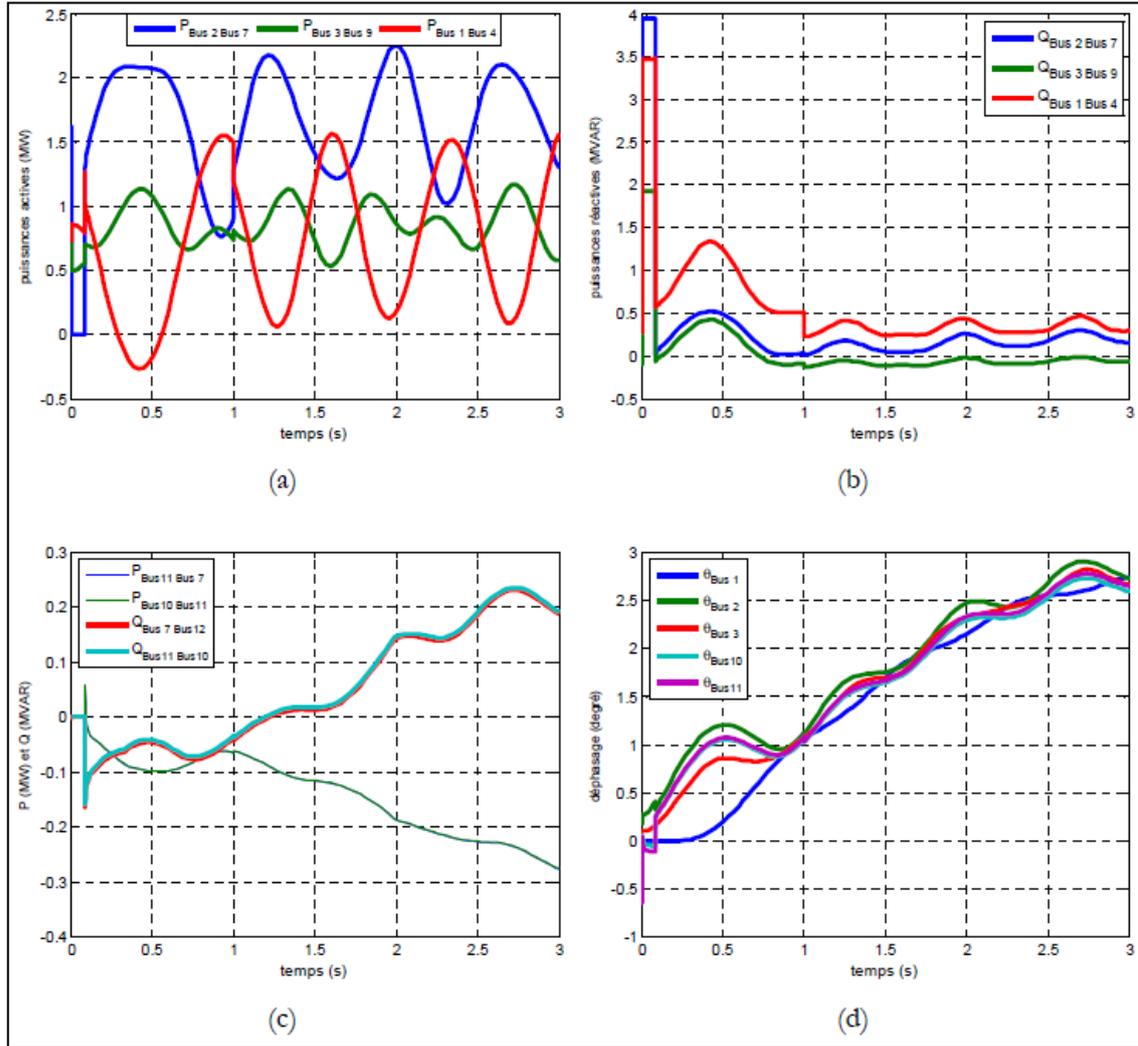


Figure (III-11) : Simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs et 11 jeux de barres

- a-Les puissances active aux jeux de barres de connexion [MW].
- b-Les puissances réactive aux jeux de barres de connexion [MVAR].
- c-Les puissances actives et réactives aux jeux de barres (7, 10, 11) [MW, MVAR].
- d-Le déphasage entre le courant et la tension aux jeux de barres de connexion [degré]

III-4.6.2.3. Interprétation des résultats obtenus

Après la mise en place de la ferme éolienne qui fonctionne à vitesse variable avec la commande direct , et basée sur la MADA, les régulateurs de tension au niveau des générateurs sont indispensables pour garder toujours la stabilité du réseau. Quand la demande de l'énergie électrique s'écarte de sa valeur normale, l'état du système change. Il faut que le système de régulation automatique détecte ce changement et commence à réagir en temps réel.

D'après des simulations des angles rotoriques, on observe que les angles rotoriques des machines (δ_1 - δ_2 - δ_3) ont même allure, donc on peut dire que le fonctionnement du système est transitoirement stable dans ces conditions.

III-4.6.3. Ferme éolienne : Contrôle direct de puissance (CDP)

Les simulations réalisées ont démontré la fonctionnalité et l'efficacité d'analyser l'impact de l'intégration des fermes éoliennes à vitesse variable avec la commande (CDP) dans un réseau électrique représenté dans la figure (III-12), ainsi l'étude de la stabilité transitoire à la suite d'une perturbation donnée.

III-4.6.3.1. Simulation

L'exécution de programme PSAT de durée de 3s, nous a permis d'obtenir les résultats de simulation représentés dans les figures (III-13).

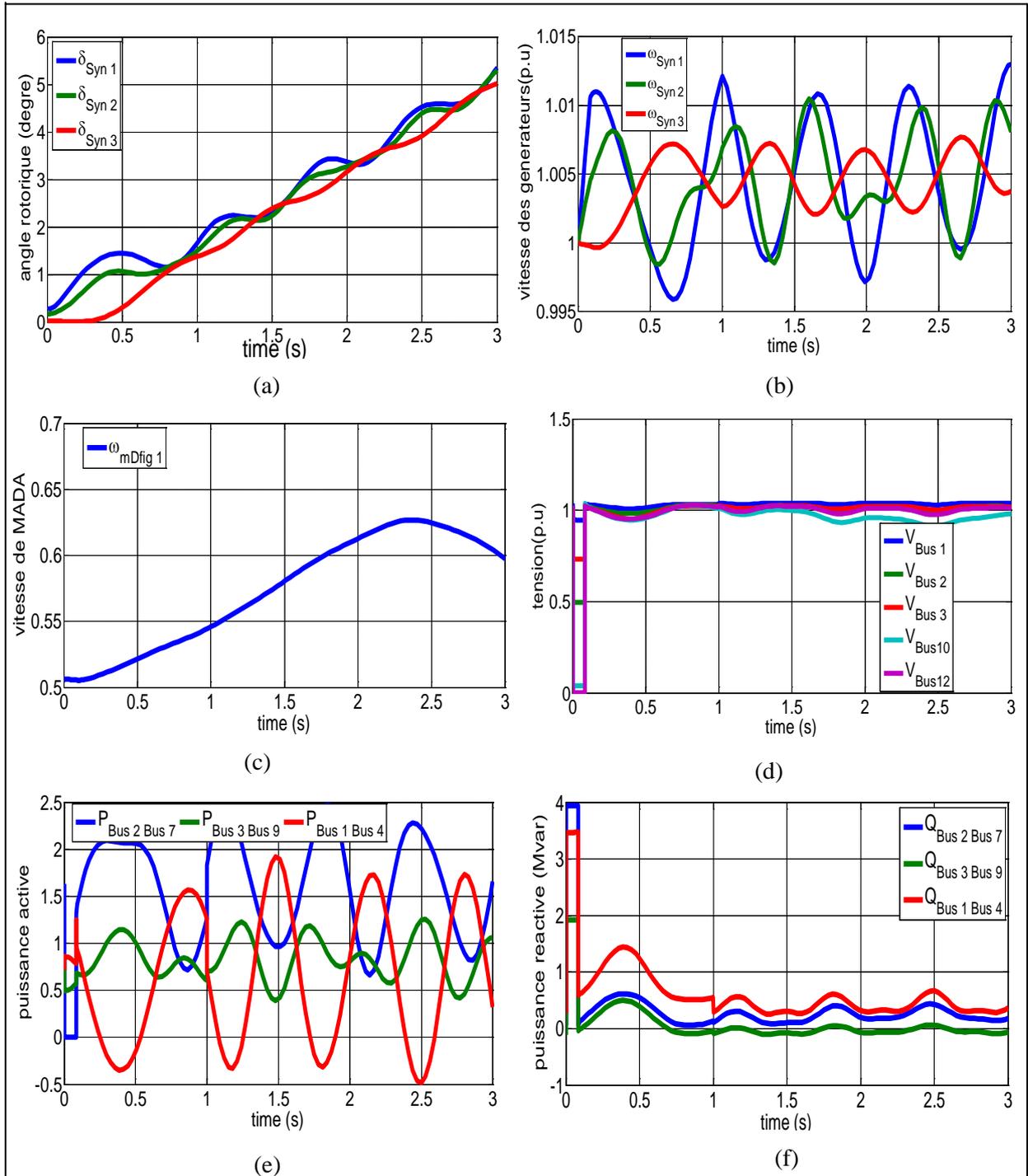


Figure (III-13) simulation de la ferme éolienne intégrée au réseau de 3 générateurs et 11 jeux de barres

- a- Les angles rotoriques des trois générateurs [degré].
- b- Les vitesses angulaires des trois générateurs [pu].
- c- La vitesse angulaire de la MADA [pu].
- d- Les tensions aux jeux de barres de connexion [pu].
- e- Les puissances active aux jeux de barres de connexion [MW].
- f- Les puissances réactive aux jeux de barres de connexion [MVAR].

III-4.6.3.2. Interprétation des résultats obtenus

Après la mise en place de la ferme éolienne qui fonctionne à vitesse variable avec la commande Contrôle direct de puissance (CDP), et basée sur la MADA, les régulateurs de tension au niveau des générateurs sont indispensables pour garder toujours la stabilité du réseau. Quand la demande de l'énergie électrique s'écarte de sa valeur normale, l'état du système change. Il faut que le système de régulation automatique détecte ce changement et commence à réagir en temps réel.

D'après des simulations des angles rotoriques, on observe que les angles rotoriques des machines (δ_1 - δ_2 - δ_3) ont même allure, donc on peut dire que le fonctionnement du système est transitoirement stable dans ces conditions.

III-5. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a présenté un système de génération d'électricité par les éoliennes, susceptible de participer au réseau électrique. On a effectué cette application pour la validation du modèle proposé. on peut tirer les remarques suivantes :

La variation de fonctionnement du système électrique lors d'un défaut transitoire dépend donc de différents paramètres :

- les caractéristiques du groupe (caractéristiques électriques de l'alternateur..) ;
- la nature, la location et la durée des défauts ;
- l'état initial des machines ;
- le plan de tension du réseau.

Dans la douzième partie a fait l'objet d'une étude du fonctionnement d'un système éolien basé sur la machine double alimentation fonctionnant à vitesse variable avec la commande direct et Contrôle direct de puissance (CDP), ce système de génération est intégré dans le réseau électrique. Présentant un défaut symétrique pour étudier la stabilité transitoire du système électro énergétique.

Le modèle proposé permet de tenir compte du comportement de la commande du MADA face au défaut, cette dernière étant très sensible aux perturbations de la tension d'alimentation.

Les résultats obtenus dans ce cas sont différents par rapport aux résultats de la vitesse fixe. Ces résultats ont démontré l'aptitude de ce système de production de fonctionner en régime normal du réseau et pour certains régimes de perturbation.

Conclusions générales et perspectives

A la lumière de notre travail, nous avons vu l'impact de l'intégration de la commande d'une machine asynchrone en fonctionnement génératrice dans le réseaux électrique. Notre étude s'est portée essentiellement sur la machine asynchrone à double alimentation (stator-rotor), qui est beaucoup dans la production de l'énergie éolienne avec deux stratégies de commande une classique et l'autre moderne.

Les données et les perspectives qui montrent l'importance et l'évolution dans le temps de ce processus de production d'énergie au niveau mondial. Les notions de base de la technologie éolienne ont été abordées et développées, des architectures des chaînes de conversion d'énergie en association avec les différents types de génératrices sont également citées.

Les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine, les différentes zones de Fonctionnement et les stratégies de contrôle. Ont été présentées.

Une grande partie de ce travail été consacrée à l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation connectée au réseau et fonctionnant a vitesse variable .deux commandes sont utilisée afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre la machine et le réseau la commande vectorielle direct et la commande par le control direct de puissance (CDP).

Le premier chapitre rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Au regard de ce chapitre, il est apparu que la production d'énergie électrique par éoliennes se divise en deux catégories, celle fonctionnant à vitesse fixe et l'autre à vitesse variable.

Face à ces besoins, nous avons réalisé une première étude concernant la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, partie mécanique puis la partie électrique qui contient les machine électrique double alimentation avec la commande direct et (CDP).

La deuxième partie de simulation de ce mémoire est consacrée à intégrer ces commande dans les réseaux électriques, et études de sa stabilité transitoire lors d'un court-circuit affectant ces réseaux. Dans ce cas, le modèle proposé démontre l'impact d'intégration de la commande d'une ferme éolienne dans le réseau électrique et permet d'estimer les caractéristiques dynamiques de la stabilité transitoire dans un système électrique

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble des chaînes de conversion d'éolienne, dans le but est

d'envoyer une énergie propre non polluante au réseau électrique, parmi les perspectives envisageables :

- Insertion des systèmes FACT pour améliorer la stabilité transitoire des systèmes électro-énergétiques.
- Développer des régulateurs de tension ou des vitesse pour maintenir toujours la stabilité des systèmes électriques.
- Détailler les commandes de l'onduleur, on peut citer, la commande vectorielle, la commande par MLI.
- Introduire des techniques intelligentes comme les réseaux de neurone, les algorithmes génétiques.
- Faire l'étude du filtrage dynamique du réseau électrique, car les harmoniques sont injectées dans ces réseaux par les convertisseurs statiques.
- Etudes de la stabilité transitoire en présence des défauts asymétriques.

ANNEXES

ANNEXE 1**Paramètres utilisés en simulations*****a) Paramètres de la machine asynchrone double alimentation :***

La puissance nominale $P = 3\text{kW}$

Tension nominale $U = 380\text{V}$

Résistance des enroulements statoriques : $R_s = 1.6\Omega$

Résistance des enroulements rotoriques : $R_r = 0.4\Omega$

Inductance cyclique statoriques : $L_s = 150\text{mH}$

Inductance cyclique rotorique : $L_r = 23\text{mH}$

Mutuelle : $M = 55\text{mH}$

Inertie : $J = 0.01 \text{ kgm}^2$

Coefficient des frottements visqueux : $f_v = 0.0024 \text{ N.m.s}^{-1}$

b) Paramètres de la turbine de l'éolienne et du multiplicateur de vitesse:

Le rayon de la turbine : $R = 35\text{m}$

Gain du multiplicateur de vitesse : $G = 90$

***c) Paramètres des éléments passifs de filtrage insérés au convertisseur
(ensemble redresseur MLI – onduleur MLI)***

Capacité du bus continu : $C = 400\mu\text{F}$

Inductance de lissage des courants injectés au réseau : $L = 0.013 \text{ H}$

ANNEXE 2

Paramètres du réseau de 3 générateurs (centrales) et 9 jeux de barres

a) Générateurs (centrales)

Paramètres	Centrale 1	Centrale 2	Centrale 3
Sn(MVA)	247.5	192	128
U(kV)	16.5	18	13.8
Facteur de puissance	1	0.85	0.85
Type	Hydraulique	Turbo	Turbo
W(tr/min)	180	3600	3600
Xd	0.146	0.8958	1.3125
X'd	0.0608	0.1198	0.1813
Xq	0.0969	0.8645	1.2578
X'q	0.0969	0.1969	0.25

b) Caractéristique des jeux de barres

Nœud A	Nœud B	R	X	B/2
1	8	0	0.0576	0
2	7	0	0.0625	0
3	9	0	0.0856	0
4	7	0.032	0.161	0.153
4	8	0.01	0.085	0.088
5	8	0.017	0.092	0.079
5	9	0.039	0.17	0.179
6	7	0.0085	0.072	0.0745
6	9	0.0119	0.1008	0.1045

Bibliographiques

- [1] **P.W. CARLIN**, «The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology », NREL/TP-500-28607, Février 2001
- [2] **Disponible aux :** 1).http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne
2).<http://www.wwindea.org>
- [3] **N. K. MERZOUK** «évaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie» Thèse Doctorat de l'université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen; Soutenu le 02 Mai 2006
- [4] **Disponible au :** www.fee.asso.fr (Syndicat des énergies renouvelables France Énergie Éolienne)
- [5] **A. BOYETTE** «contrôle –commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec system de stockage pour la production éolienne» Thèse Doctorat de L'Université Henri Poincare, Nancy 1 ; Soutenu le 11/12/2006
- [6] **F. POITIERS** «étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Le 19 décembre 2003 à l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes » Thèse Doctorat de Université De Nantes; Soutenu en 2003
- [7] **T. DOUADI** «Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone» Thèse De Magister de Université De Batna ; Soutenu en 2011
- [8] **A. DAVIGNY** «Participation aux services système de fermes d'éoliennes a vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie» Thèse Doctorat de Université Lille 1 ; Soutenu en 2007
- [9] **H. CAMBLONG** « minimisation de 'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable». Thèse Doctorat de L'école National Superieure D'Arts Et Metiers Centre De Bordeaux; Soutenu le 18/12/2003
- [10] **B. BELTRAN** «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre Supérieur» Thèse Doctorat de Université De Bretagne Occidentale ; soutenue le 6 juillet 2010
- [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 Doctorat de

- L'école Centrale De Lille Et L'école Militaire Polytechnique D'Alger ; Soutenu le 29/09/2011
- [12] **I. HAMZAOUI**, «Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», Thèse De Magister Janvier 2008. »
- [13] **F. BONNET** «Contribution à l'Optimisation de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en mode Moteur» Thèse Doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan ; Soutenu le 30 Septembre 2008
- [14] **N. LAVERDURE** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » Thèse Doctorat De Institut National Polytechnique De Grenoble ; Soutenu le 9 décembre 2005
- [15] **N. KHEZAMI** «Commande multimodale optimale des éoliennes :: Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence» Thèse Doctorat de l'école centrale de Lille et l'école supérieure des sciences et techniques de Tunis ; Soutenu le 17 octobre 2011
- [16] **N. ABU-TABAK** «Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation » Thèse Doctorat de L'école Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique De Lyon ; Soutenu le 19 Novembre 2008
- [17] **H. FOCH, F. FOREST, et T. MEYNARD**, "Onduleurs de tension : Structures, Principes et Applications", Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [18] **S. BREBAN**, « étude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique a vitesse variable » Thèse Doctorat de l'École National Supérieure d'arts et métiers ; Soutenu le 12 /12/2008
- [19] **E. G. SHAHRAKI** «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques. Thèse Doctorat Soutenu publiquement le 13 Octobre 2003»
- [20] " *Electrotechnique et Application* ", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D3 545, D4 025, D4 090 et D4 120 Technique de l'ingénieur.
- [21] **F. Milano, L. Vanfretti, J. C. Morataya**, An Open Source Power System Virtual Laboratory: "The PSAT Case and Experience", IEEE Transactions on Education, vol. 51, no. 1, pp. 17-23, February 2008. Available at: www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/.
- [22] **P.M. Anderson and A. A. Fouad**, "Power System Control and Stability ", 2nd edition, ISBN: 978-0-471-23862-1, Wiley-IEEE Press , October 2002

ملخص: السمة الرئيسية للرياح تكمن في التغير, و لهذا السبب, من المهم أن قيمة تأثير الرياح على الاستقرار على الشبكات الكهربائية و على وجه الخصوص هي تحقيق الاستقرار العابر بعد اضطراب معين. بعد التطرق إلى المفاهيم العامة والمعادلات التي تحكم عمل المولدات الريحية تم تقديم وعرض مختلف الآلات المختلفة -- المحولات المستخدمة في طاقة الرياح, ثم دراسة الاستقرار العابر في الشبكات الكهربائية. هذا العمل يطرح نموذج المولدات الريحية والآلات المستخدمة في هذا النظام في توليد الطاقة الكهربائية. تمت psat بالموازات مع matlab دراسة هذا النظام باستخدام بيئة إن المحاكات المطبقة على النظام, تمت مقارنة الاختلافات من شروط الاستقرار العابر للنظام الكهربائي, والتكامل الموجود بين وظائف السرعة الثابتة والمتغيرة والمولدات الريحية. إن النموذج المقترح في هذا العمل يدل على التكامل بين المولدات الريحية في الشبكات الكهربائية وتقدير الخصائص الديناميكية لنظام الاستقرار العابر في الشبكة الكهربائية

كلمات مفتاحية: الطاقة الريحية, الشبكات الكهربائية, الاستقرار العابر, تنميط

Résumé :

La principale caractéristique du vent réside dans sa variabilité, donc non « dispatchable » c'est pourquoi, il important d'évaluer l'impact des fermes éoliennes sur la stabilité sur les réseaux électriques et en particulier, sur sa stabilité transitoire à la suite d'une perturbation donnée.

Après un bref rappel des concepts et équations régissant le fonctionnement d'un système éolien, ce document dresse un état de l'art des ensembles machines – convertisseurs utilisés dans l'énergie éolienne suivi par l'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques.

Ce travail présente le modèle de turbine éolienne et les génératrices utilisées dans ce système. La simulation réalisée sous environnement Matlab en utilisant PSAT.

Les simulations effectuées étudient à comparer les variations des conditions de la stabilité transitoire d'un système électro énergétique, et l'impact d'intégration de la commande des fermes éoliennes fonctionnent à vitesse et variable.

Dans ce travail, le modèle proposé démontre l'impact d'intégration de la commande du ferme éolienne dans le réseau électrique et permet d'estimer les caractéristiques dynamiques de la stabilité transitoire dans un système électrique.

Mots Clés : Energie Eolienne, Réseaux Electriques, stabilité transitoire, modélisation.

Abstract:

The main characteristic of wind resides in its variability, therefore no « dispatchable », it is why, it is important to value the impact of the wind farms on the stability on the electric networks and in particular, on her transient stability following a given disturbance.

After a brief recall of the concepts and equations governing the working of a wind system, this document raises of the art state of the different machines - converters used in the wind energy, followed of the transient stability studies on electric networks.

This work presents the model of wind turbine and the machines used in this system. The simulation achieved under Matlab environment while using the PSAT.

The simulations consists to compare the variations of the conditions of the transient stability of a system electro energing, and the impact of integration the control of wind farms functions in fixed and variable speed.

In this work, the proposed model demonstrates the impact of integration of the wind farm in the electric network and permits to estimate the characteristic dynamic of the transient stability in an electrical system.

key words : Wind energy, electric networks, transient stability, modelling.