



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de sciences techniques

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE
L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADÉMIQUE**

Domaine : Sciences Technique

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electriques

Intitulé

Modélisation et commande d'un système éolienne

Présenté par :

Elmajdoub Mohammed Amine

Lamari Raouf

Devant le jury :

Promoteur : Mme Arama fatima Zahra

M. C. B

Univ. Adrar

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

*Notre remerciement s'adresse en premier lieu à **Allah** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mme **Arama Fatima Zohra** qui nous a apporté une aide précieuse. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il nous a apportés...*

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicace

*Je dédie Mon Travail avant tous A mes Chers
Parents*

*Mon PERE qui ne cesse pas de M'encourager,
et qui Ma toujours soutenu,*

*Ma jolie MERE symbole de sacrifice et qui est
tout pour moi, pour Sa*

*Tendresse profonde « Que Dieux me les
protègent ».*

À Mes chers Frères et Soeurs et ses familles

A mes collègues de L'Université D'ADRAR

*A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce
mémoire.*

Mohammed Amine

Dédicace

Donne cet humble travail
Surtout pour ceux qui ont
Il m'a appris le sens de la vie et m'a encouragé
et soutenu pendant mes études

Cher père

Ma chère mère

Pour mes frères.

A tous les membres de ma famille.

Je veux vous remercier tous

Mes amis qui m'ont aidé de loin

Ou de près dans la réalisation de ce travail.

Raouf

Résumé

ملخص

هذه الدراسة تشمل كل من التمثيل و التحكم في المولدات الهوائية , وقد اخترنا في دراستنا المولدات ثنائية التغذية باستعمال تحكم شعاعي بالتدفق الساكن الموجه , لنتمكن من مراقبة تبادل الاستطاعة بين الساكن والشبكة الكهربائية نعمل على إشارات الدوار عبر محول في اتجاهين. يتم تطوير هذه السيطرة واختبارها عن طريق توليف نوع من المنظم الخطي التناسب التكامل.

الكلمات المفتاحية : طاقة الرياح ، مولد غير متزامن ثنائي الطاقة ، نموذج كامل ، التحكم الشعاعي .

Résumé

Cette étude élabore la modélisation et la commande des génératrices éoliennes, nous avons choisi dans notre étude la génératrice à double alimentation avec commande vectorielle à flux statorique orienté, pour pouvoir contrôler l'échange de puissance entre le stator et le réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Cette commande est élaborée et testée en synthétisant un type de régulateur linéaires : proportionnel intégrateur.

Mots-clés : énergie éolienne , générateur asynchrone à double alimentation (GADA) , modèle complet , commande véctorielle .

Abstract

This study presented the wind generators modeling and control, we have choose the double supplied generator with direct stator oriented vectorial control, the control of power exchange between the machine stator and the network is given by the acting on the rotor signals via a bidirectional converter. This control is tested by using a linear PI controller

Keywords: wind energy, dual power asynchronous generator (GADA), complete model, vectorial control.

Sommaire

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	2i
Résumé	3i
Table de matières	4i
Liste des figures	7i
Liste des symboles	10i
Introduction générale	1
Chapitre 1 : généralité sur l'énergie éolienne	
1.1. Introduction	2
1.2. Définition de l'énergie éolienne:.....	2
1.3. Les différents types des éoliennes	3
1.3.1. Eoliennes à axe vertical	3
1.3.1.1 Avantage	3
1.3.1.2 Inconvénients	3
1.3.2 Eoliennes à axe horizontal	4
1.3.2.1 Avantages	4
1.3.2.2. Inconvénients	4
1.4. Principales composantes d'une éolienne:	4
1.5 Conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique.....	6
1.5.1 Principe de conversion d'énergie éolienne.....	6
1.5.2. a) Loi de Betz.....	6
1.5.2. b) Production d'énergie mécanique.....	8

Sommaire

1.6. Différents technologies des éoliennes	9
1.6.1. L'éolien à vitesse fixe	9
1.6.2. L'éolien à vitesse variable	10
1.7. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable.....	11
1.7.1. Système utilisant une génératrice synchrone.....	11
1.7.2. Système utilisant une génératrice asynchrone.....	12
1.7.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation(MADA):.....	12
1.8.a) Avantages de la MADA.....	13
1.8.b) Inconvénients de la MADA.....	13
1.9. Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	14
1.10. Structure et principe de fonctionnement de la MADA.....	14
1.11. Modes de fonctionnement de la MADA.....	15
1.12. Conclusion.....	16

Chapitre 2 : Modélisation d'un système éolien basé sur une GADA

2-1. Introduction.....	18
2.2 Hypothèses simplificatrices.....	18
2.3 Modélisation des machines asynchrones à double alimentation.....	18
2.3.1 Modèle et Identification des paramètres de la machine.....	19
2.4 Changement de repère.....	21
2.5 La transformation de Park.....	21
2.6. bilan de puissance	23
2.7. Modélisation de l'onduleur.....	23
2.8 Modélisation de la turbine éolienne.....	27
2.8.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	27

Sommaire

2.8.2 Modélisation de la turbine.....	29
2.8.3 Modèle du multiplicateur.....	31
2.8.4 Equation dynamique de l'arbre.....	31
2.5 simulation	32
2.9 Résultats de la simulation.....	34
2.10 Interprétation.....	35
2.11 Conclusion.....	35
CHAPITRE 3 :Commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation	
3.1 Introduction	36
3.2 Les types de la commande vectorielle	36
3.2.1. La commande vectorielle directe	36
3.2.2. La commande vectorielle indirecte	36
3.3. Commande vectorielle de la GADA en génératrice	37
3.3.1. Commande directe des puissances active et réactive	37
3.3.2. Commande indirecte des puissances active et réactive	38
3.3.2.1. Commande Indirecte sans Boucles des Puissances (e n boucle ouverte)	38
3.3.2.2. Commande Indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé).....	39
3.3.3type et synthèse du régulateur PI	40
3.4 Résultats de simulation des commandes directes	41
3.4.1 Schéma de simulation	42
3.4.2 Les résultats de la simulation	43
3.9 Interprétation des courbes	45
3.10 Conclusion	45
Conclusion générale et perspectives	
Annex	
Référence	

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	2
Figure 1.2: Les types d'une éolienne.....	3
Figure 1.3 : Les composantes d'une éolienne.....	4
Figure 1.4 : Principaux organes du système de conversion éolienne.....	6
Figure 1.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....	7
Figure 1.6 : Coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour différents types des turbines éoliennes.....	8
Figure 1.7 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	9
Figure 1.8 : Eolienne à vitesse fixe.....	9
Figure 1.9: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	10
Figure 1.10: Génératrice synchrone à vitesse variable avec convertisseurs MLI.....	11
Figure 1.11: Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable.....	12
Figure 1.12: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.....	12
Figure 1.13 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	15
Figure 1.14: Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....	16

Chapitre 2

Figure 2.1 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace Electrique	19
Figure 2-2 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobin.....	19
Figure 2.3 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans le repère de Park.....	21
Figure 2.4 : Schéma d'un onduleur de tension.....	24
Figure 2.5 : Représentation les signaux de l'entrée du commande MLI.....	26
Figure2.6 : Représentation les signaux de sortie du commande MLI.....	26
Figure2.7 : Représentation la tension de l'onduleur.....	26

Liste des figures

Figure 2.8 : Système mécanique de l'éolienne.....	27
Figure 2.9 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine.....	29
Figure 2.10 : Schéma de la turbine éolienne	30
Figure 2.11 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine.....	31
Figure 2.12 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	32
Figure 2.13 : schéma bloc interne (Sub-system) du GADA sous Matlab/Simulink.....	33
Figure 2.14 : Variation de la puissance active statorique (W) en fonction du temps (s).....	34
Figure 2.15 : Variation de la puissance réactive statorique (W) en fonction du temps (s).....	34
Figure 2.16 : Courants statoriques à la sortie de la génératrice.....	34

Chapitre 3

Figure 3.1 : Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive	39
Figure 3.2 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance (en boucle ouverte)	40
Figure 3.3 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé)	41
Figure 3.4 : Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	41
Figure 3.5 : schéma de simulation, de la commande directe GADA sous MATLAB.....	43
Figure 3.6 : Puissance active délivrée par la GADA et puissance active imposée à la GADA	44
Figure 3.7 : puissance réactive délivrée par la GADA et puissance réactive imposée à GADA.....	44
Figure 3.8 : tensions triphasées au stator	45
Figure 3.9 : Tension et courant statorique.....	45

Liste des abréviations et symboles

MADA machine asynchrone a double alimentation

GADA génératrice asynchrone a double alimentation

MLI modulation de largeur d'impulsion

Symbols	Signification
S	La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
P	Nombre de paires de pôles de la machine
v	Vitesse de vent incidente sur le rotor de la turbine
$P_{\text{éolienne}}$	La puissance aérodynamique de la turbine
ρ	Density de l'air
P_v	La puissance de vent
C_p	Coefficient de puissance (facteur de rendement).
λ	Ratio de vitesse
β	Angle de calage des pales
R	Rayon de la turbine ou la longueur d'une pale.
Ω_{turbine}	Vitesse angulaire mécanique de la turbine
E	Tension efficace

Liste des abréviations et symboles

V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tension continues.
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	sont les tensions des phases de la charge
[T]	La matrice de transfert
L_s, L_r	Inductance cyclique statorique.et rotorique
G	Gain du multiplicateur
M_s, M_r	Inductances mutuelle entre deux phases statoriques et Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
Ω_{mec}	Vitesse angulaire mécanique de la GADA
R_s, R_r	La résistance des phases statoriques
Φ_{sd}, Φ_{rd}	Flux statoriques et rotoriques de la GADA
J	Inertie totale des parties tournantes
f	Coefficient de frottement
C_{em}	Le couple électromécanique
V_{sabc}, V_{rabc}	les tensions statoriques et rotoriques de la GADA.
I_s, I_r	Valeur efficace des courants statoriques et rotoriques de la GADA
θ_s, θ_r	Angle électrique relatif aux grandeurs électrique statorique. et rotorique
M	Inductance magnétisante
C_{aero}	Couple aérodynamique de la turbine
C_{mec}	Couple mécanique sur l'axe de la GADA.

Liste des abréviations et symboles

Σ	Coefficient de dispersion de Bondel
ω_s	Vitesse angulaire (pulsation) électrique du stator.

Introduction général

Introduction général

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible

Face à la croissance de la consommation d'électricité et aux problèmes d'environnement planétaires l'éolien est une solution si l'on veut penser et agir localement. Cette énergie éolienne a l'avantage d'être non polluante à l'utilisation.

Notre mémoire sera structurée comme suit :

Le premier chapitre présente un état de l'art de l'énergie renouvelable éolienne dans de ce mémoire. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolienne et des différentes structures existantes Ensuite on aborde la définition de la vitesse du vent à travers les équations et les concepts physiques, ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Le second chapitre introduit la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur le modèle complet d'une génératrice à double alimentation (GADA) ; il est effectuée dans un repère diphasé lié au champ statorique, ensuite une modélisation d'un onduleur de tension contrôlés par MLI est effectuée , ensuite une modélisation détaillée de la turbine éolienne , et enfin les résultats de simulation qui représente un déphasage entre la tension et le courant d'une phase statorique. Ce problème est réglé par la commande vectorielle traitée dans le suivant chapitre .

Dans Le troisième chapitre et dernier chapitre de ce mémoire, on utilisera la commande vectorielle du modèle complet d'une génératrice à double alimentation (GADA) , puis on présentera le calcul de régulateurs de type PI. le découplage entre la puissance active et réactive est maintenu . On validera la commande choisie par les résultats de simulation qui seront commentés .

Enfin, des conclusions et perspectives sont exposées. Elles résument les avantages et les inconvénients de la commande vectorielle.

CHAPITRE 1

généralité sur l'énergie éolienne

1.1. Introduction :

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, en d'autre terme, les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet électriquement contrôlé (association machine/commande).
- Un système qui permet mécaniquement contrôlé (orientation paliers/nacelle de l'éolienne) .

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur l'énergie éolienne, sont principe de conversion. Les différents types de turbine (avantages et inconvénient) et les principales génératrices utilisées. [1].

1.2. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète.

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moudre le grain. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne, (Figure 1.1),[2].

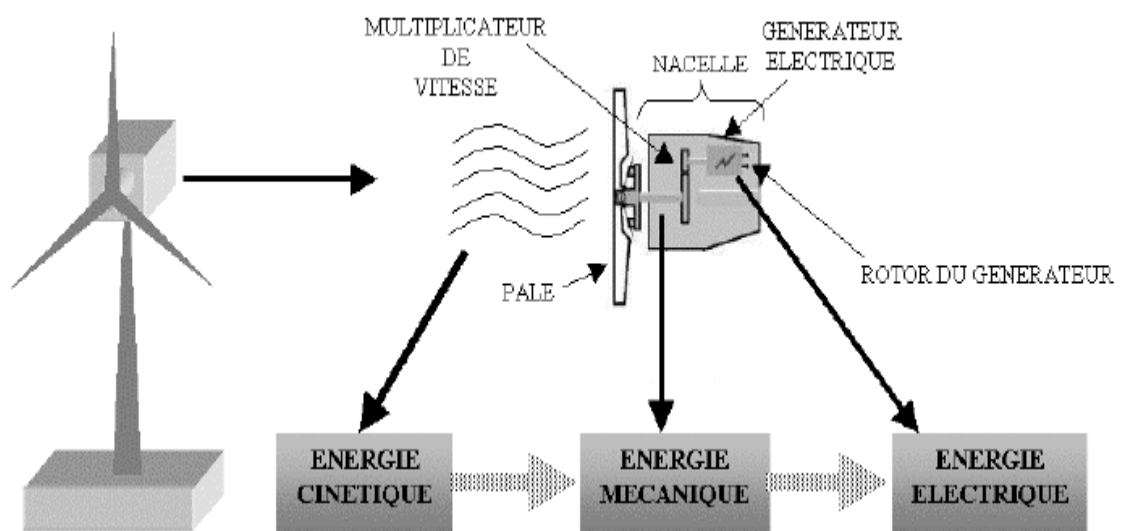


Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent. [3]

1.3. Les différents types des éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal. La figure 1.2 montre les deux familles d'éolienne :

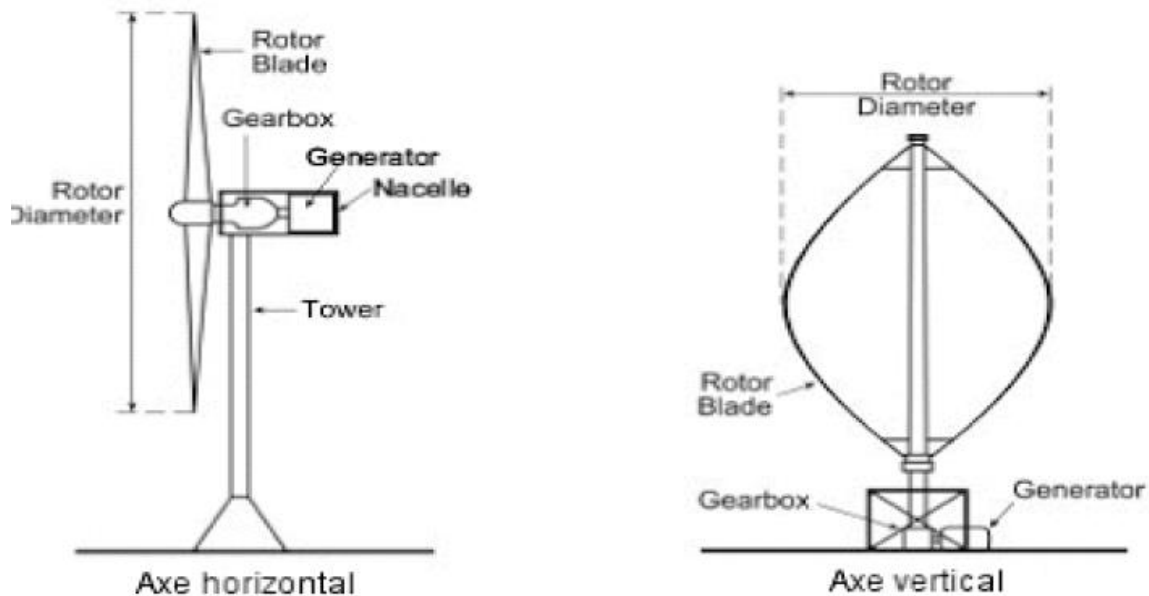


Figure 1.2: Les types d'une éolienne [4]

1.3.1. Les éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne (figure 1.2) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplication et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [5].

1.3.1.1 Avantages

- ✓ Vitesse variable à environ $\pm 30\%$ de la vitesse du synchronisme.
- ✓ Puissance extraite optimisée.
- ✓ Connexion au réseau plus facile à gérer.

1.3.1.2 Inconvénients

- ✓ Maintenance de la boîte de vitesse et des contacts glissants.
- ✓ Système de contrôle très complexe.
- ✓ Coût d'électronique de puissance relatif [2].

1.3.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal (figure 1.3) beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [6] .

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi- pales.

1.3.2.1 Avantages

- ✓ Coût limité,
- ✓ Peu de contraintes mécaniques,
- ✓ Grande efficacité.

1.3.2.2. Inconvénients

- ✓ Bruit conséquent,
- ✓ Vibrations non négligeables
- ✓ Grande sensibilité au flux éolien et sa variation [2].

1.4. Principales composantes d'une éolienne :

Le système éolien est généralement constitué des éléments principaux Comme le montre dans la figure 1.3

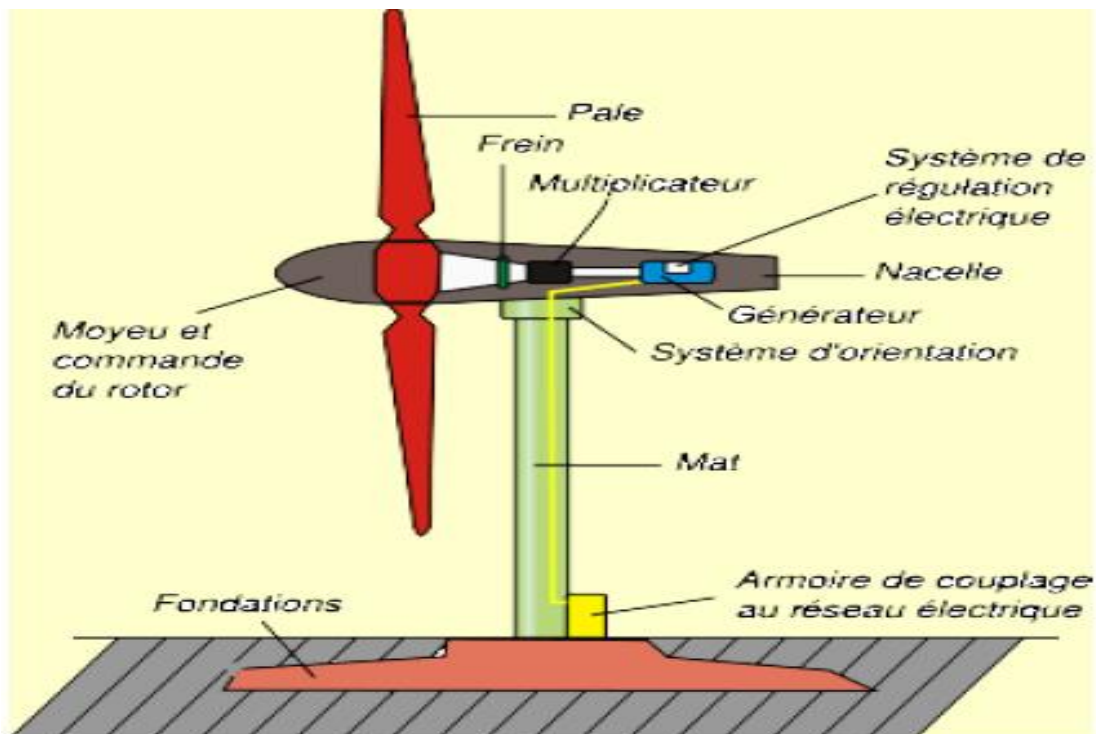


Figure 1.3 : Les composantes d'une éolienne [7]

1.4.1. Les pales :

Sont un dispositif aérodynamique (surface portante) en matériaux composites à base de fibres de verre, de plastique ou de bois. Leur conception est le fruit d'études aérodynamiques diverses. Les pales sont fixées à un moyeu pour former le rotor. Elles sont destinées à tourner autour de l'axe du rotor dès la présence de vent suffisant.

1.4.2. La nacelle :

C'est l'enveloppe qui protège la boîte d'engrenages, le générateur et les autres composants contre l'action des éléments de dégradation. Elle renferme:

- **Un moyeu** pourvu d'un système qui lui permet d'orienter les pales afin de réguler leur vitesse de rotation.
- **Un rotor**, qui transforme l'énergie cinétique reçue des pales en énergie mécanique de rotation.
- **Des freins** permettant d'arrêter les pales pour les cas de vitesses de vent très fortes qui pourraient endommager l'éolienne ou la rendre incontrôlable.
- **Un multiplicateur**, qui est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. Il permet de réduire le couple et/ou d'augmenter la vitesse de rotation.
- Un générateur assurant la production électrique en transformant l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Il fonctionne comme un alternateur (produisant du courant alternatif) ou une dynamo (produisant du courant continu). De nos jours, l'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- Un système de régulation électrique servant à ralentir le rotor du générateur en cas de surrégime.
- Un système de refroidissement à huile, à eau ou à air, destiné au multiplicateur et au générateur [8].

1.4.3. Le système d'orientation :

C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter les pales de l'éolienne face au vent (dans l'axe du vent) et de les verrouiller.

1.4.4. Le mât (ou tour) :

C'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante car plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente, mais en même temps le coût de la structure augmente aussi. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre du rotor.

1.5. Conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique:

La conversion de l'énergie du vent à une énergie mécanique se fait au niveau de la turbine, ainsi que la partie de la conversion de l'énergie mécanique à une énergie électrique est faite par le générateur figure (I.4)

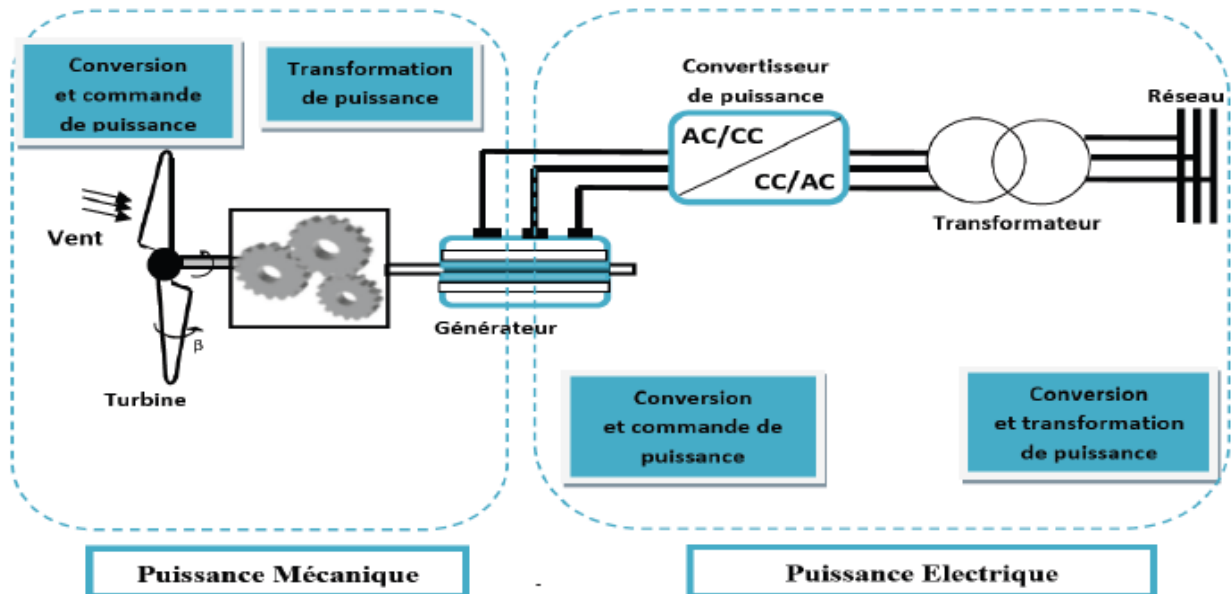


Figure 1.4 : Principaux organes du système de conversion éolienne [9]

1.5.1. Principe de conversion d'énergie éolienne:

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine, qui reçoit l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir une conversion et une transmission régulières de l'énergie, la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine. Ce fonctionnement général est illustré par la figure (I.4) [9]

1.5.2.a) Loi de Betz :

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'aval d'une vitesse V_2 ». Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (1.5) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est :

$$m = \frac{\rho \cdot (V_1+V_2)}{2} \quad (1.1)$$

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

$$P_{aer} = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

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

$$P_{aer} = \frac{\rho(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

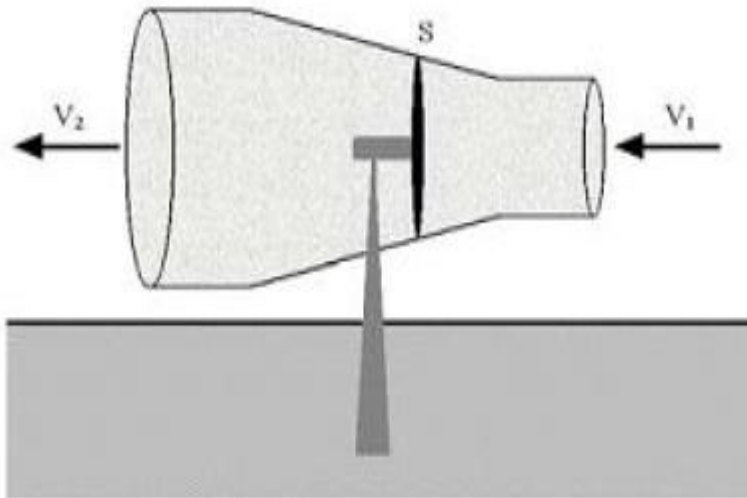


Figure 1.5 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne [9]

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_v correspondante serait alors :

$$P_v = \frac{\rho \cdot V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_{aer}}{P_v} = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (1.5)$$

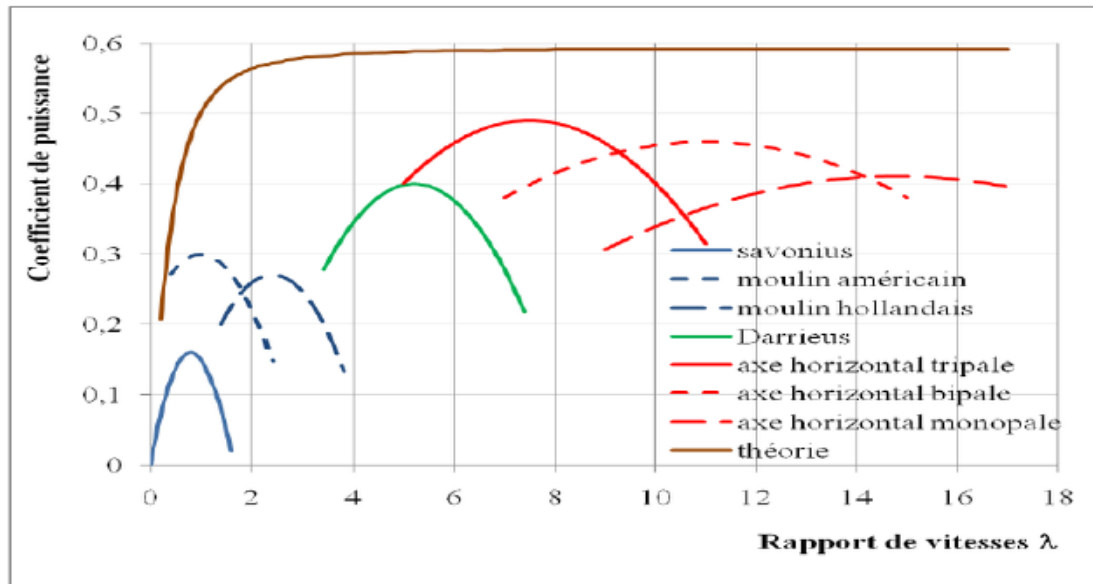


Figure 1.6 : Coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour différents types des turbines éoliennes [3]

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, On s'aperçoit que le ratio P_{aer} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maximal de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les variations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur de plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. [10]

1.5.2.b) Production d'énergie mécanique:

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

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.6)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V_1} \quad (1.7)$$

Ω : vitesse de rotation avant multiplicateur

R : rayon de l'aérogénérateur

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

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \left(\frac{R \cdot \Omega}{k \cdot V_1} \right)^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (1.8)$$

Avec Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (figure 1.7). [11]

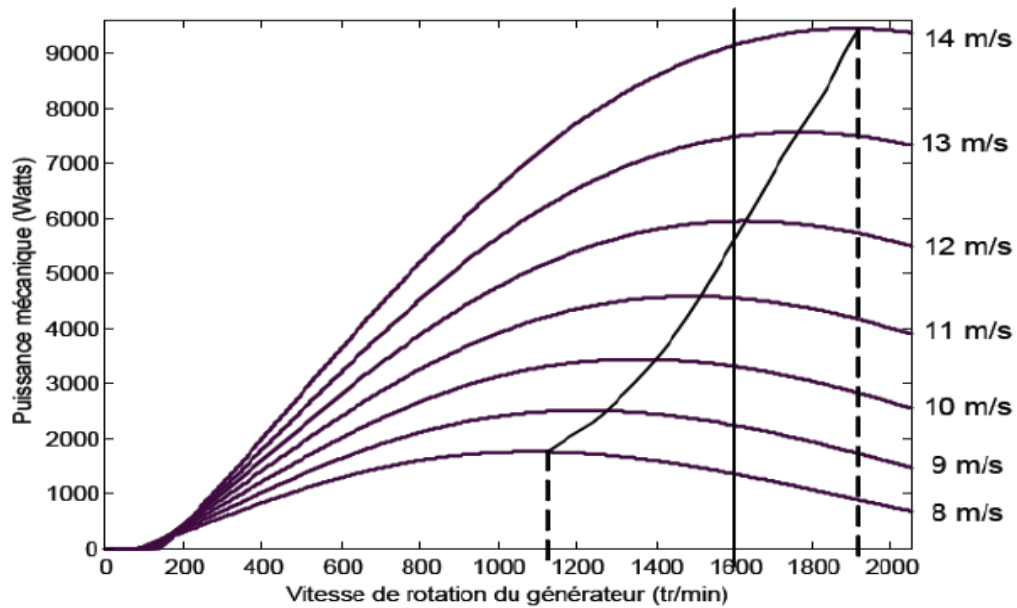


Figure 1.7 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [11]

1.6. Différents technologies des éoliennes :

1.6.1. L'éolien à vitesse fixe :

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (Seules les génératrices asynchrones (figure 1.8) sont utilisées dans ce cas) [12].

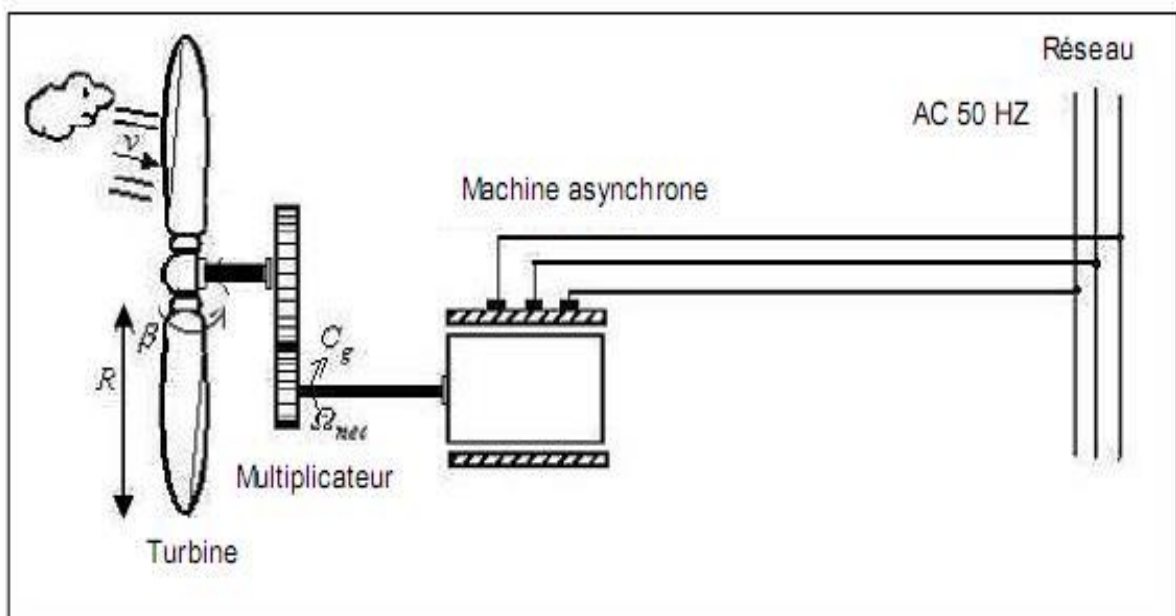


Figure 1.8 : Eolienne à vitesse fixe

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse Mécanique est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme.

Ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [1].

1.6.2. L'éolien à vitesse variable :

Dans ces cas, 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 [12], [13]. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de la puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

Au niveau de la turbine, on donne sur la (figure 1.9) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

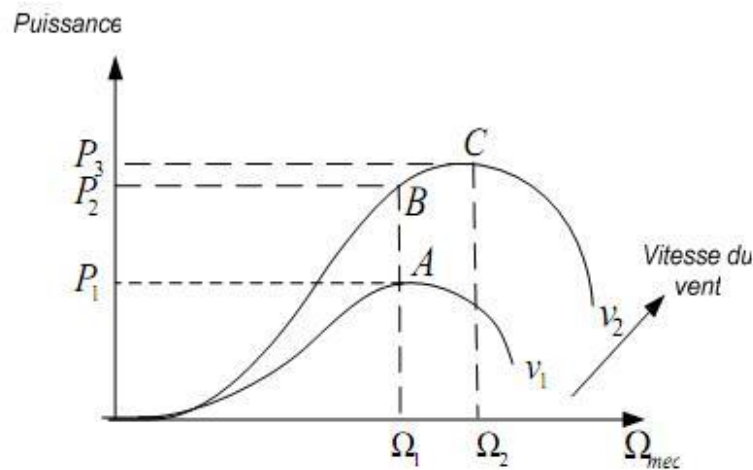


Figure 1.9 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse du vent et une vitesse mécanique de la génératrice, on obtient une puissance nominale (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieur, il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour

extraire le maximum de la puissance générée. Des systèmes éoliens à vitesse de rotation variable vont permettre d'optimiser les conditions de fonctionnement de la turbine [14], [1].

De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans les éoliennes de grandes puissances : la machine asynchrone à cage, la machine synchrone et la machine asynchrone à rotor bobiné.

1.7. Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable :

1.7.1. Système utilisant une génératrice synchrone :

Le majeur inconvénient dans les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné est le rotor ou l'inducteur bobiné nécessite un système bagues lisses balais ou un système à diodes tournantes sans contact comme dans les alternateurs classiques de production pour amener le courant continu. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si, de plus, la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau, des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice figure (1.10) permet de contrôler la puissance générée par celle ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent [15], [16].

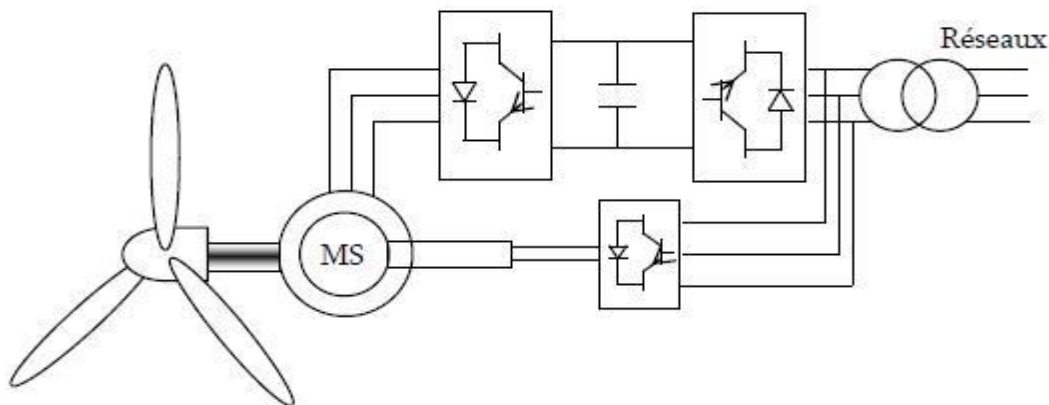


Figure 1.10: Génératrice synchrone à vitesse variable avec convertisseurs MLI.

1.7.2. Système utilisant une génératrice asynchrone :

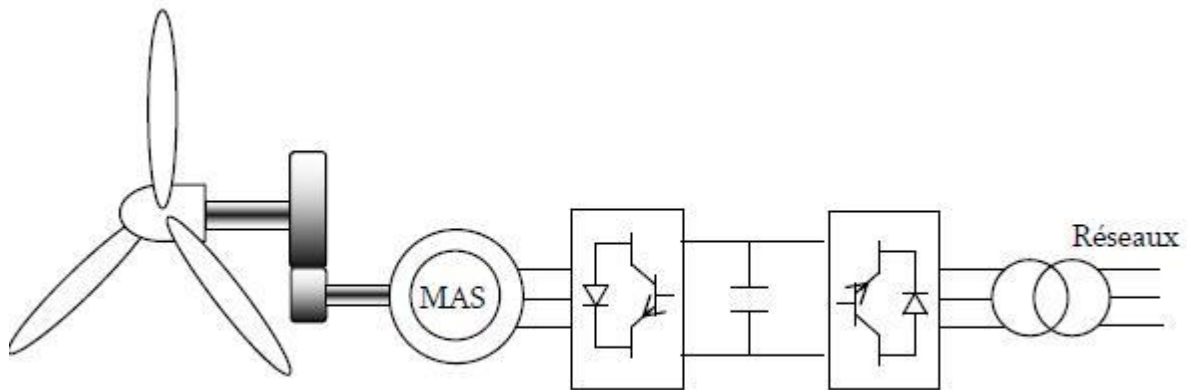


Figure 1.11: Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable.

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu [12].

1.7.3. Système utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation(MADA):

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone:

le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit [17].

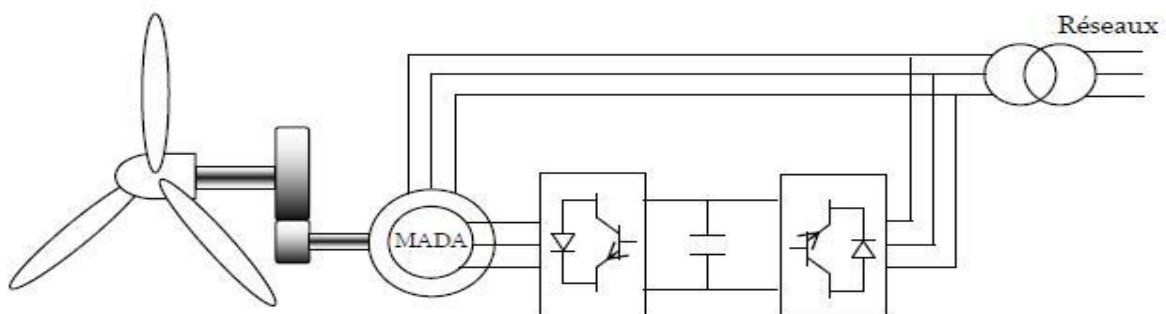


Figure 1.12: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à

double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau voire (figure 1.12), [16], [18].

L'intérêt majeur de ce système éolien réside dans le fait que le convertisseur coté machine, et transférant la puissance de glissement et l'acheminant vers le réseau électrique, ne sont dimensionnés que pour une partie de la puissance nominale de la MADA. En effet, si nous considérons que la MADA fonctionne à puissance nominale pour un fonctionnement en mode hyper-synchrone avec un glissement maximal égal à 30%, nous avons donc au maximum 25% de la puissance nominale de la machine transitant par les convertisseurs. Ceci permet de dimensionner les convertisseurs pour une puissance comprise entre 25 et 30% de la puissance nominale de la machine [19].

Malgré la présence des contacts glissants, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance.

1.8.a. Avantage de la MADA:

- Fonctionnement à vitesse variable
- Puissance extraite optimisée
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominal.
- Machine standard.
- Connexion de la machine plus facile à gérer
- Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau [20].

1.8.b. Inconvénients de la MADA:

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Utilisation des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage [21].

1.9 . Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La figure 1.13, présente une configuration classique de la turbine éolienne utilisant une MADA. La MADA est un générateur à rotor bobiné avec un système de balais et des bagues (slip rings). Le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique et le rotor connecté au réseau au travers d'une chaîne de convertisseurs électroniques à bus continu intermédiaire. La MADA est alimentée à partir de la tension réseau et de la tension à la sortie du convertisseur électronique de puissance à fréquence variable associé au rotor. Afin d'obtenir des vitesses de rotation hypo-synchrone ou hyper-synchrone, la chaîne de conversion électronique associée au rotor doit être bidirectionnel. Cela est effectué à partir d'un deux convertisseurs (coté rotor et coté réseau) avec un bus continu en commun. Le convertisseur de tension coté réseau est connecté à celui ci via trois bobines permettant de filtrer les harmoniques du courant [22].

A cause de ce système de contact glissant, la MADA présente l'inconvénient de nécessiter une maintenance plus régulière que pour une machine asynchrone à cage. En effet, les balais doivent frotter sur les bagues pour réaliser le contact électrique entre ces deux pièces. Mais le frottement entre deux pièces provoque de l'échauffement mais surtout de l'usure. Généralement, les balais sont constitués d'une matière (graphite) moins dure que les bagues, ce sont donc eux qu'il faut remplacer quand leur usure devient importante. C'est donc un inconvénient important pour ce type de MADA, mais l'utilisation des machines asynchrones à double alimentation sans balai (Brushless Doubly Fed Induction Machine) permet d'avoir une maintenance moins fréquente [23].

1.10. Structure et principe de fonctionnement de la MADA:

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur [3].

Dans son fonctionnement, elle s'apparente au fonctionnement de la machine synchrone avec une vitesse constante du fait de l'imposition des fréquences aux deux armatures et le caractère asynchrone est lié à la différence de vitesse entre le champ statorique et le rotor. Sa magnétisation est donnée par la contribution des deux armatures alimentées par des sources à courant alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de machine synchrone à excitation alternative.

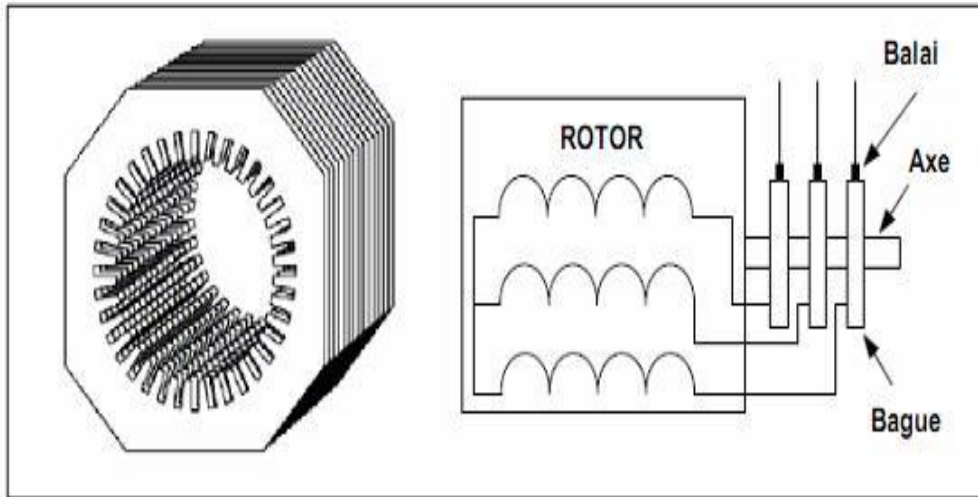


Figure 1.13 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur est appelé cascade hypo ou hyper synchrone [24].

1.11. Modes de fonctionnement de la MADA:

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine. Le principe de la commande de la MADA en ces modes peut être compris à travers la figure (1.14) Dans cette dernière, et désignent respectivement les puissances du stator, du rotor et mécanique [23].

En négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances montré dans tableau 1.1 comme suit :

Moteur	Générateur
hypo-synchrone $g > 0$	hypo-synchrone $g > 0$
hyper-synchrone $g < 0$	hyper-synchrone $g = 0$

Tableau 1.1 : Quadrants de fonctionnement de la MADA.

Lorsque la machine fonctionne en moteur:

- En mode hypo-synchrone : la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau.
- En mode hyper-synchrone : une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique.
- En mode hypo-synchrone : une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- En mode hyper-synchrone : la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à g est transmise par l'intermédiaire du rotor.[24]

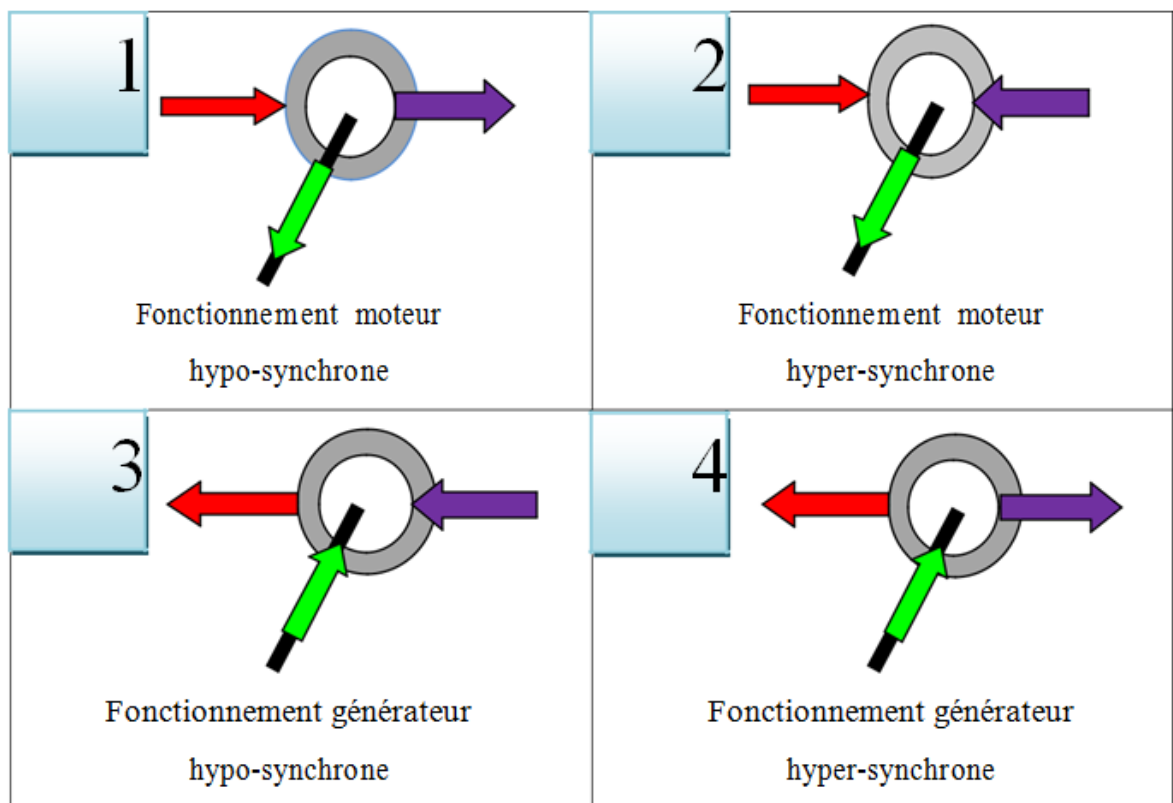


Figure 1.14: Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.

1.12. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, son différents types des éoliennes, son principe de fonctionnement. On a décrit les différents types de machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique. Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'état de l'art de la machine asynchrone à double alimentation .

Chapitre 2

Modélisation d'un système éolien base sur une GADA

2.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de premier lieu d'abord de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à double alimentation de part sa robustesse, qui a été justifiée dans le premier chapitre. Nous modéliserons la chaîne de conversion éolienne à vide.

Nous verrons ensuite la modélisation et la commande en MLI de l'onduleur en tension ainsi que la turbine.

Des résultats de simulation permettront de juger l'efficacité de ce modèle.

2.2 Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [25]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- On admet de plus que la f.m.m créée par chacune des armatures est à répartition sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

2.3 Modélisation des machines asynchrones à double alimentation

La machine est représentée par six enroulements dans l'espace électrique ; l'angle θ_e repère l'axe d'une des phases rotoriques par rapport à l'axe fixe de la phase statorique. Les flux sont

comptés positivement selon les axes des phases ; Les sens des enroulements sont repérés conventionnellement par un point (•), un courant de signe positif entrant par ce point crée un flux positif dans l'enroulement. (Voire figure2.1)

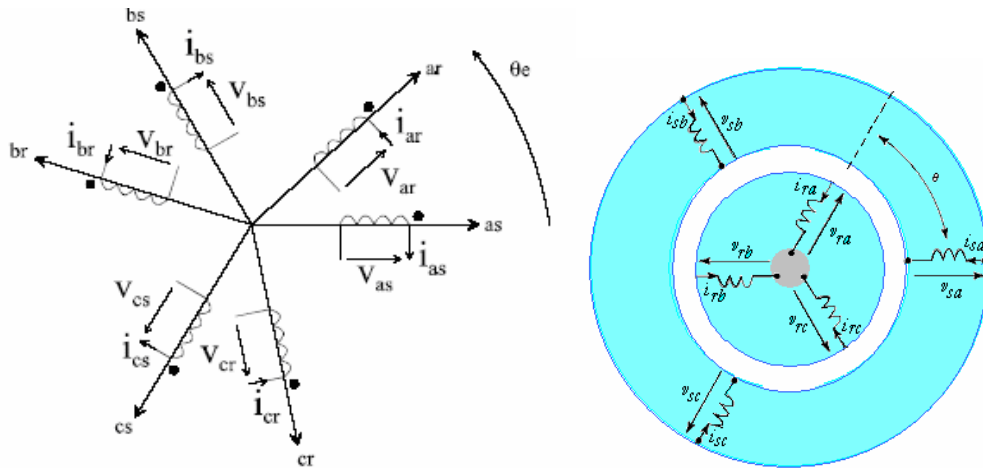


Figure 2.1 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique

2.3.1 Modèle et Identification des paramètres de la machine

Le modèle de la MADA est équivalent au modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. A cet effet, lors de cette modélisation, on assimile la cage d'écureuil à un bobinage triphasé (voir figure (2-2)). La seule différence réside dans le fait que ces enroulements ne sont plus systématiquement en court-circuit, par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle que l'on rappelle ci-après, ne sont pas nulles.

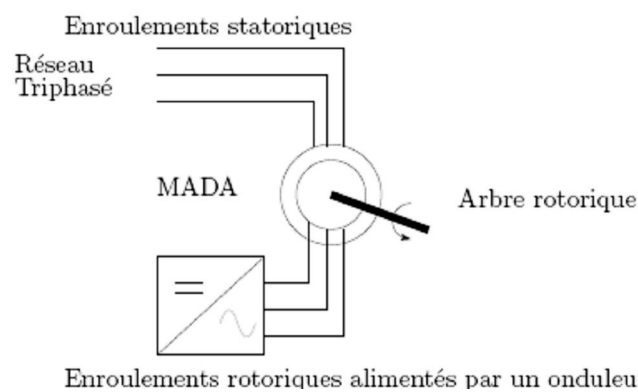


Figure 2-2 : Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

Rappel du modèle triphasé de la MADA

a- Equations électriques :

Les équations électriques en notation matricielle [26], [27], [28] sont :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (2 - 1)$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2 - 2)$$

b- Equations des flux :

Une matrice des inductances établit la relation entre les flux et les courants.

Les équations sous forme matricielle seront représentées comme suit [29], [30] :

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (2 - 3)$$

De façon similaire on aura au rotor :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2 - 4)$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (2 - 5)$$

Et

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta e) & \cos(\theta e + 2\pi/3) & \cos(\theta e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta e - 2\pi/3) & \cos(\theta e) & \cos(\theta e + 2\pi/3) \\ \cos(\theta e + 2\pi/3) & \cos(\theta e - 2\pi/3) & \cos(\theta e) \end{bmatrix} \quad (2 - 6)$$

c- L'équation mécanique :

L'expression générale du couple est :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [i]^t \left[\frac{\delta}{\delta \theta} [L] \right] [i] \quad (2 - 7)$$

Avec : $[i] = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^t$ (2 - 8)

Et $[L] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix}$ (2 - 9)

L'équation mécanique découple $Cem = J \frac{d\Omega}{dt} - Cr$ (2 - 10)

Et $\Omega = \frac{\omega_r}{p}$ (2 - 11)

Nous constatons la complexités des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendances de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotoriques par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

2.4 Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécanique plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park

2.5 La transformation de Park

La modélisation de la machine asynchrone s'effectue en partant du système à trois axes dit réel, difficilement identifiable expérimentalement vers celui de Park (à deux axes). (Voir figure 2.3)

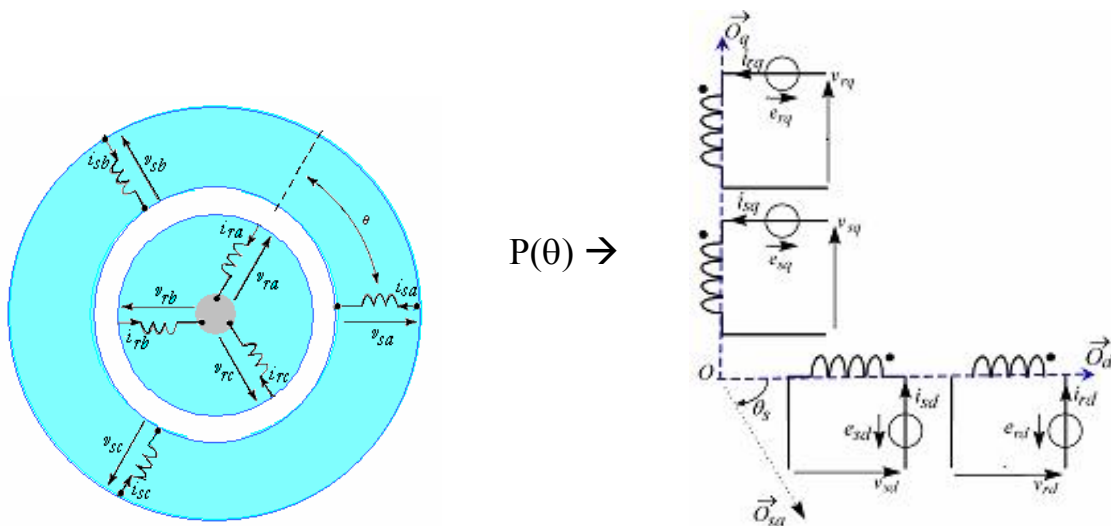


Figure 2.3 : Représentation de la machine asynchrone triphasée dans le repère de Park.

Les tensions rotorique $V_{ran}, V_{rbn}, V_{rcn}$ et les tensions statoriques $V_{san}, V_{sbn}, V_{scn}$ sont transformées en composantes directes et en quadratures $V_{rd}, V_{rq}, V_{sd}, V_{sq}$.

Les tensions de rotor et stator sont :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = [P(\theta_r)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ran} \\ V_{rbn} \\ V_{rcn} \end{bmatrix} \quad (2 - 12)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{san} \\ V_{sbn} \\ V_{scn} \end{bmatrix} \quad (2 - 13)$$

$P(\theta)$ est la matrice de Park modifiée définie par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2 - 14)$$

Les équations dynamiques de la machine sont exprimées par :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \quad (2 - 15)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \quad (2 - 16)$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (2 - 17)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \quad (2 - 18)$$

R_s et R_r sont respectivement les résistances des bobinages statoriques et rotoriques,

L_s , L_r et M_{sr} sont respectivement les inductances propres statoriques, rotoriques et la mutuelle inductance entre les deux bobinages.

φ_{sd} , φ_{sq} , φ_{rd} , φ_{rq} , sont les composantes directes et en quadratures des flux statoriques et rotoriques

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sq} \\ \varphi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{rd} \end{pmatrix} \quad (2 - 19)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{pmatrix} \quad (2 - 20)$$

Le couple électromagnétique développé par la machine est :

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \quad (2 - 21)$$

2.6. bilan des puissances :

Dans un repère biphasé, les puissances active et réactive rotorique et statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

a - les puissances rotorique :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (2 - 22)$$

b - les puissance statorique :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (2 - 23)$$

2.7. Modélisation de l'onduleur:

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors [27], ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées. Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI utilisée dans les travaux de Salma El Aimani [31], qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT commandables par la modulation de largeur d'impulsions. Pour simplifier l'étude supposons que [32] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée,
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable, c-a-d $K_{ci}(c \in [1,2,3], i \in [1,2])$
- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.
- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Un onduleur de tension est donné par la figure (2-4). On a, donc :

$I_{kci} = 0$, $V_{kci} \neq 0$ Interrupteur ouvert ; $I_{kci} \neq 0$, $V_{kci} = 0$ Interrupteur fermé.

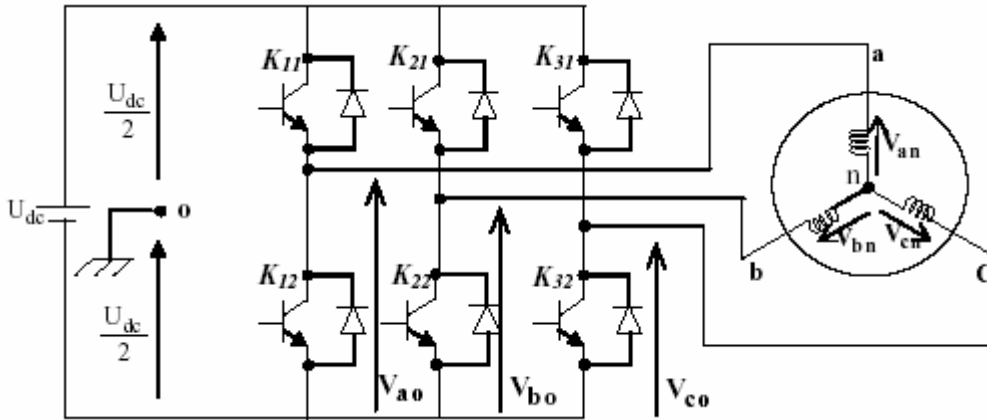


Figure 2.4 : Schéma d'un onduleur de tension

Les tensions composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2 - 24)$$

V_{ao}, V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrées de l'onduleur ou tensions continues.

Elles sont référencées par rapport à un point milieu « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

On peut écrire les relations de Charles, comme suites :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (2 - 25)$$

V_{an}, V_{bn} et V_{cn} sont les tensions des phases de la charge (valeurs alternatives),

V_{no} est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

Du système $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]$ équilibré découle la relation suivante :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2 - 26)$$

La substitution de (2-26) dans (2-25) aboutit à :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2 - 27)$$

En remplaçant (2-27) dans (2-25), on obtient :

$$V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (2 - 28)$$

$$V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \quad (2 - 29)$$

$$V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \quad (2 - 30)$$

Donc, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu- alternatif.

$$[V_{AC}] = [T] [V_{dc}] \quad (2 - 31)$$

Tel que :

$$[V_{AC}] = [V_{an} \quad V_{bn} \quad V_{cn}]^T \quad (2 - 32)$$

$$[V_{dc}] = [V_{ao} \quad V_{bo} \quad V_{co}]^T \quad (2 - 33)$$

$$[V_{dc}] = U_{dc} [S_1 \quad S_2 \quad S_3]^T \quad (2 - 34)$$

Donc, pour chaque bras il y a deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme des grandeurs booléennes.

Commutation supposée idéale : $S_i = (1 \text{ ou } 0) \quad \{i = 1,2,3\}$.

La matrice de transfert est la suivante :

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (2 - 35)$$

Dans notre travail, la commande des interrupteurs de l'onduleur est réalisée par l'utilisation de la commande MLI (modulation par largeur d'impulsion) (figure (2-5)).

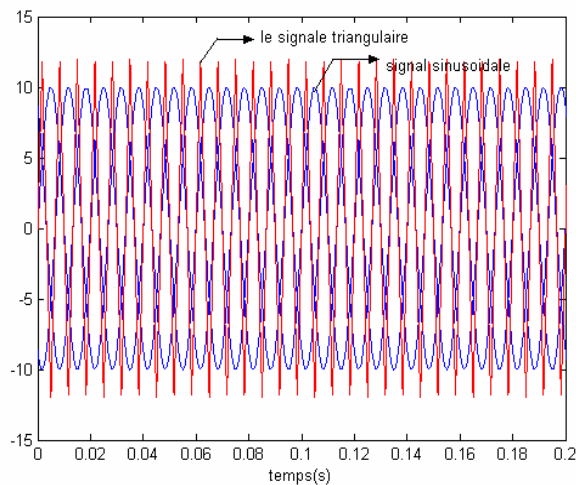


Figure 2.5 : Représentation les signaux de l'entrée du commande MLI

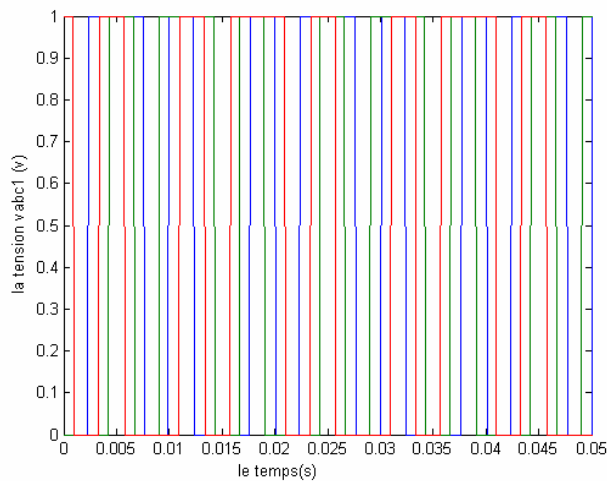


Figure 2.6 : Représentation les signaux de sortie du commande MLI

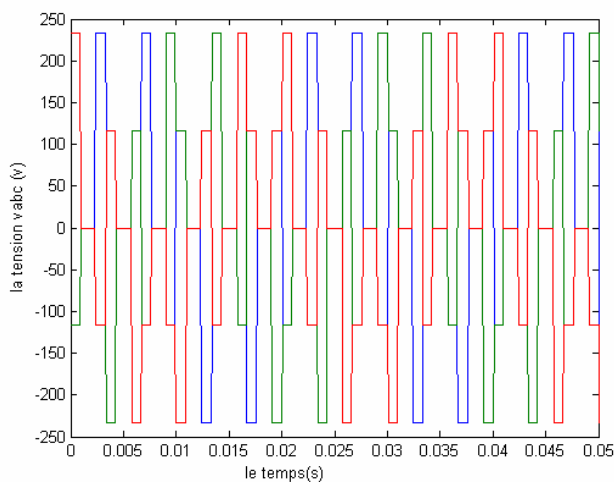
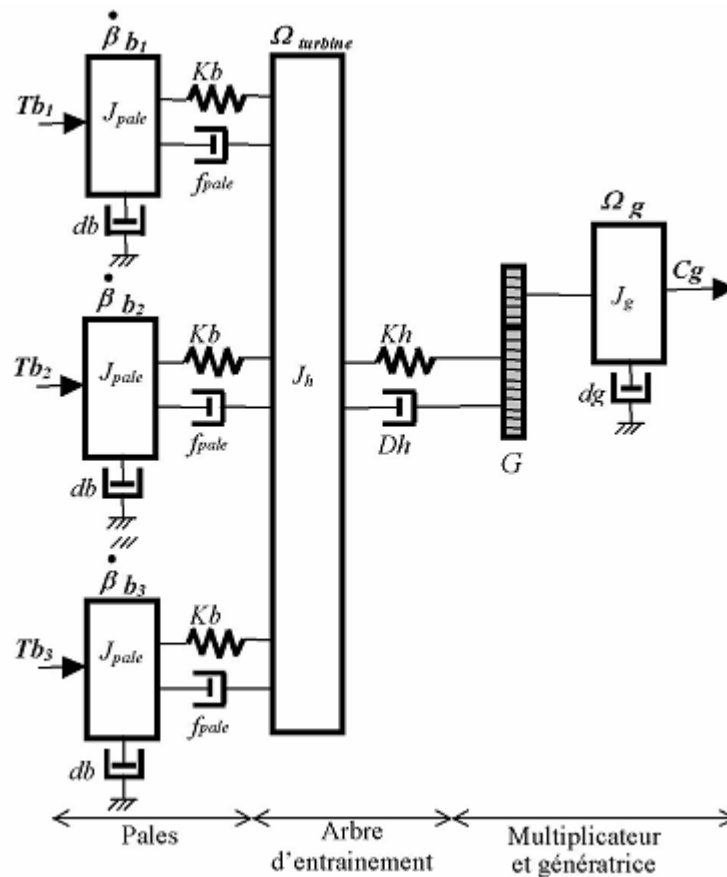


Figure 2.7 : Représentation la tension de l'onduleur

2.7 Modélisation de la turbine éolienne

2.7.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pales orientables et de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure (2-8)).



Figuer2.8 : Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité K_b
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse du vent, qui lui est appliquée [33].

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité K_h
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple (C_g) entraînant la génératrice électrique qui tourne à une vitesse Ω_{mec} .

Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, on aura une égalité des forces de poussées ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$).

On peut simplifier l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales et leurs coefficients de frottement par rapport à l'air (db) est très faible, donc on peut l'ignorer.

De même, la vitesse de la turbine est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure (2.9)) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [34].

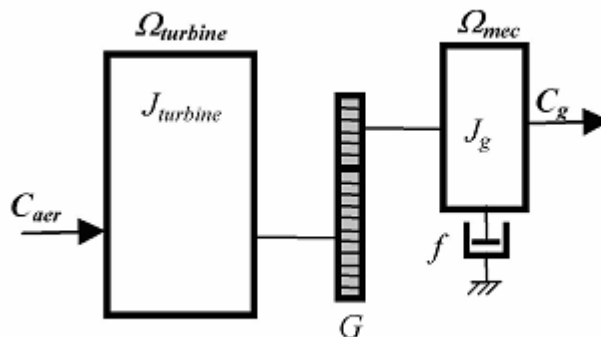


Figure 2.9 : Modèle mécanique simplifiée de la turbine

2.7.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (figure (2.10)).

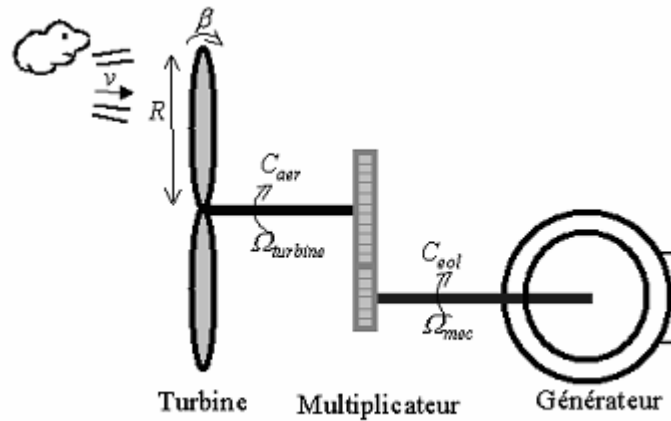


Figure 2.10 : Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [35]:

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2-28)$$

avec :

- ρ : densité de l'air (approxim. $1,22 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C)
- S : surface circulaire balayée par la turbine (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de pale).
- v : vitesse du vent.

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

$$P_{aer} = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2-29)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine [35], [36].

La figure (2-11) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pales β .

Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{\text{turbine}} \cdot R}{v} \quad (2 - 30)$$

Ω_{turbine} est la vitesse de la turbine.

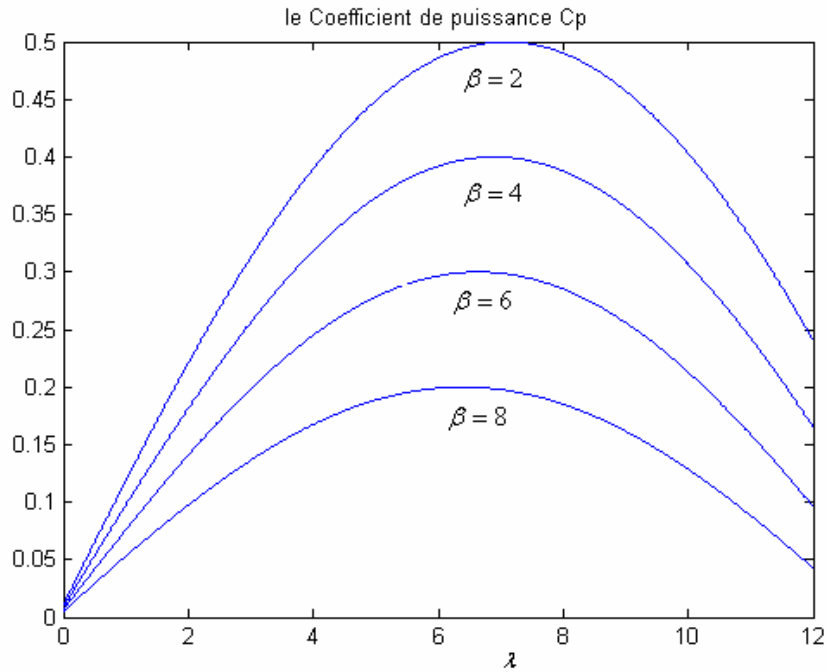


Figure 2.11: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [27] l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [37] :

$$C_p = (0.5 - 0.167)(\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2 - 31)$$

β : L'angle de l'orientation des pales.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{\text{turbine}}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{\text{turbine}}} \quad (2 - 32)$$

2.7.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure (2-10)). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2 - 33)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2 - 34)$$

2.7.4 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (2 - 35)$$

Il est noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne « Vestas » de 2 MW, une pale a une longueur de 39 m et pèse 6.5 tonnes [38].

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2 - 36)$$

où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique C_{mec} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} et le couple issu du multiplicateur C_g

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2 - 37)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2 - 38)$$

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basé sur ces équations, est donné par la figure suivante :

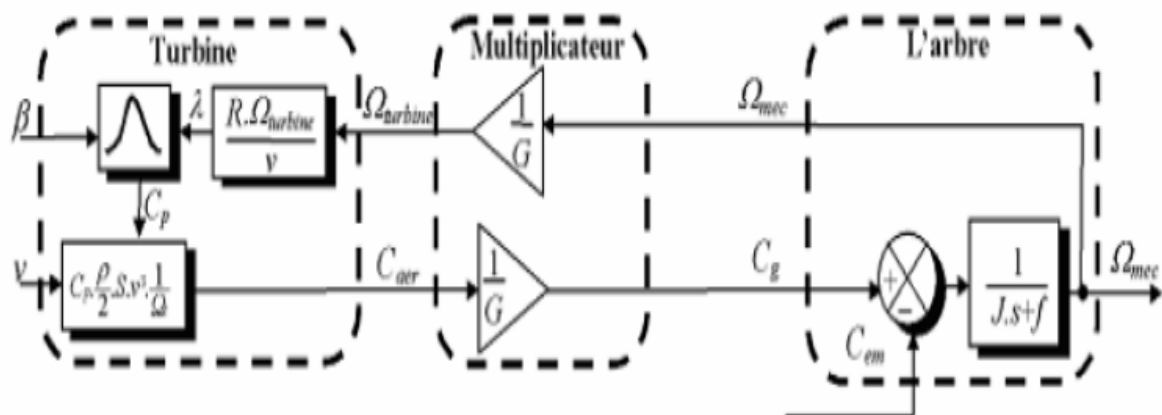


Figure 2.12: Schéma bloc du modèle de la turbine

2.8. Simulation :

On essaie de valider maintenant le modèle de la génératrice asynchrone doublement alimentée décrit par les équations trouvées avec la transformation de Park liée au champ tournant citées auparavant.

Conditions d'essai :

- Vitesse du vent moyenne est de 16 m/s.
- Tension coté rotor est de 220 Volt

Tel que ;

$$\text{sig} = 1 - \text{Msr} * \text{Msr} / \text{Ls} / \text{Lr}$$

$$\text{a1} = 1 / \text{sig} / \text{Ls}$$

$$\text{a2} = \text{Msr} / (\text{sig} * \text{Ls} * \text{Lr})$$

$$\text{a3} = 1 / \text{sig} / \text{Lr}$$

L'identification des paramètres a donné les résultats suivants :

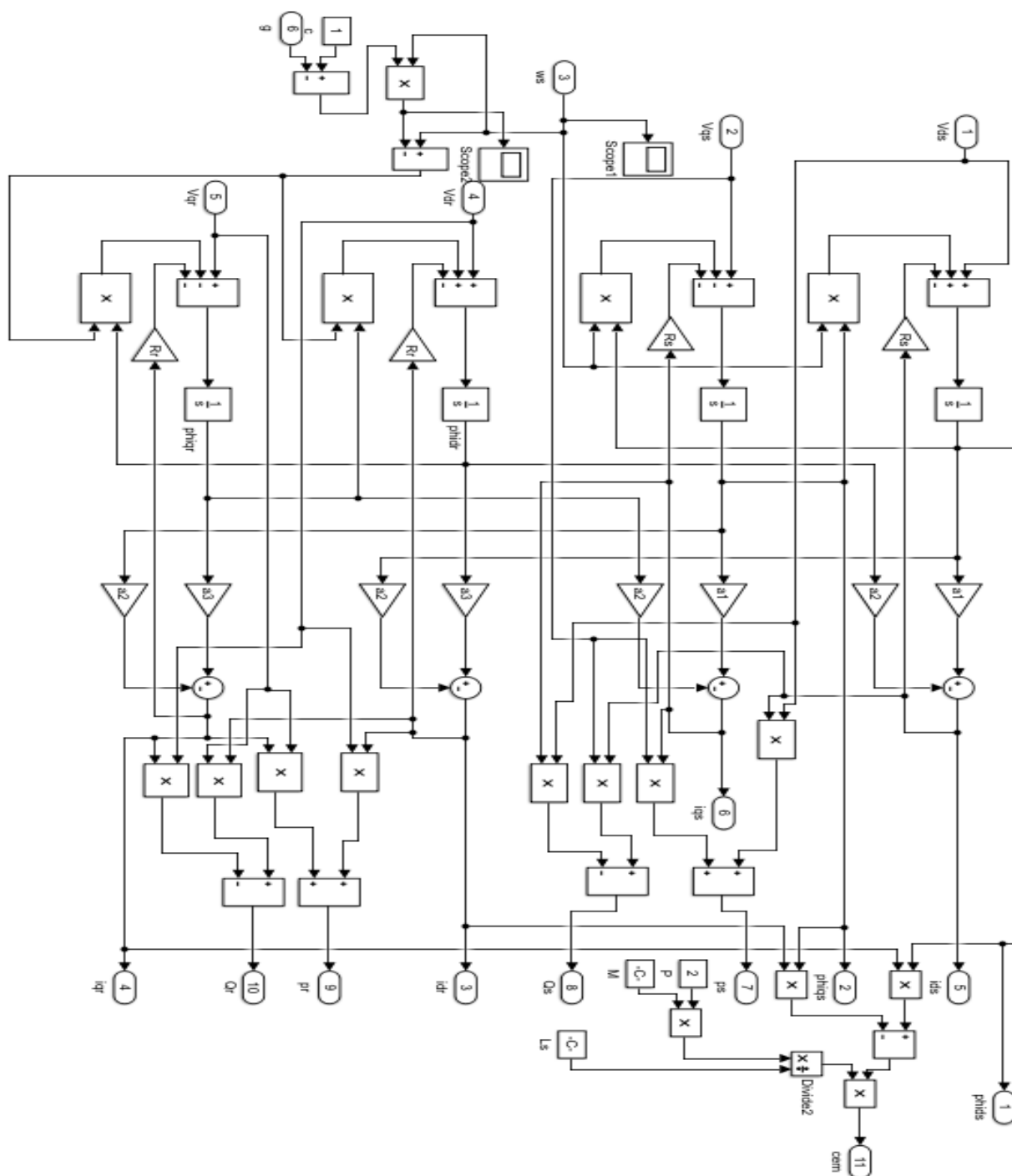


Figure 2.14: schéma bloc interne (Sub-system) du GADA sous Matlab/Simulink.

2.9. Résultats de la simulation :

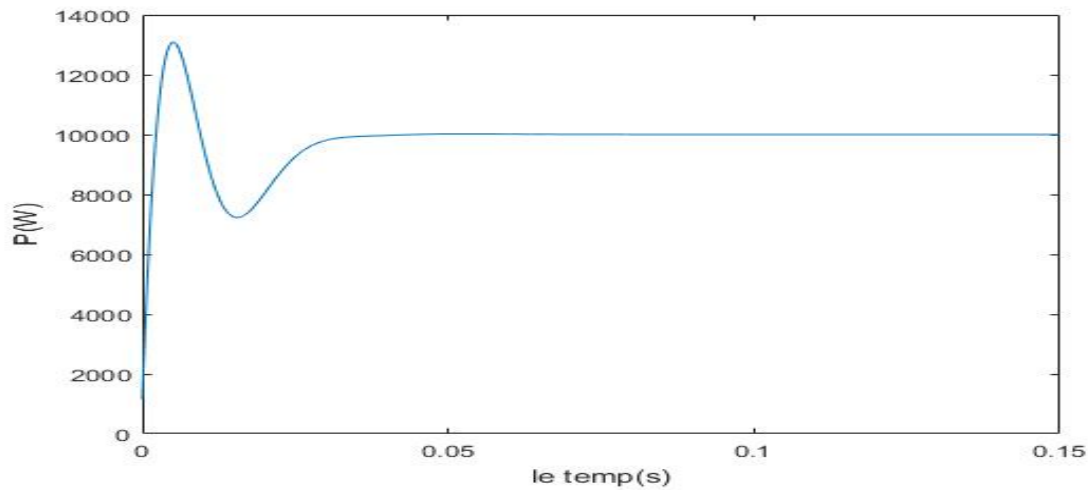


Figure 2.16 : Variation de la puissance active statorique (W) en fonction du temps (s).

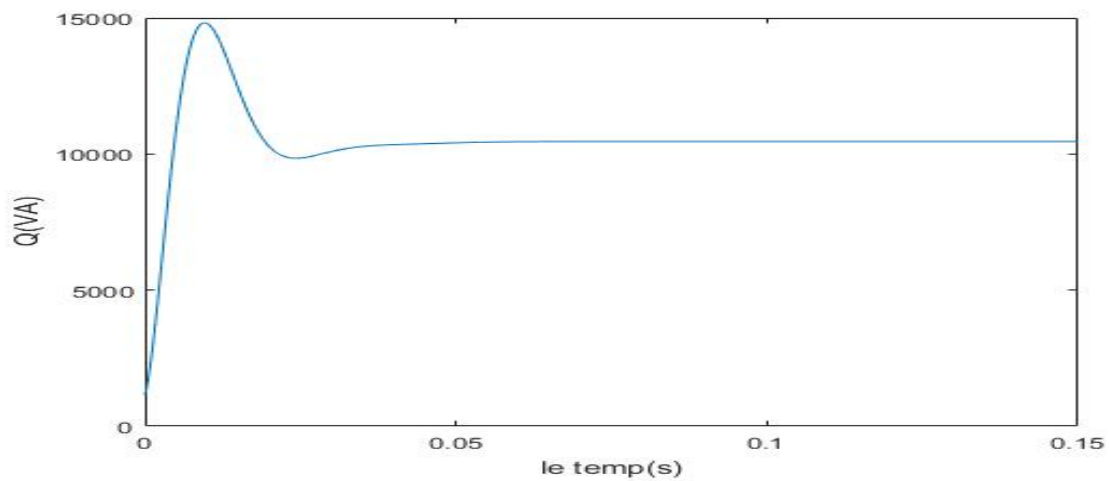


Figure 2.17 : Variation de la puissance réactive statorique (W) en fonction du temps (s).

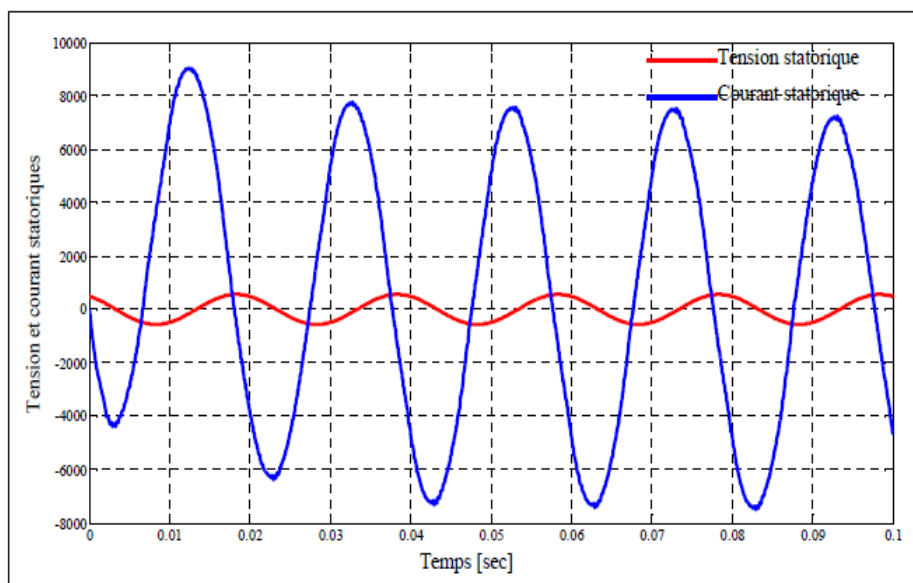


Figure 2.18 : Déphasage entre tension et courant d'une phase statorique de la MADA.

2.10. Interprétation :

Les figures (2.16 et 2.17) présentent la variation des puissances active et réactive. on remarque un couplage existant entre la puissance active P_s et la puissance réactive Q_s .

Le figure (2.18) concernent la tension et courant d'une phase statorique de GADA ce figure représente un déphasage entre la tension et le courant d'une phase statorique. Ce problème est réglé par la commande vectorielle traitée dans le suivant chapitre .

2.11. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons d'abord modélisé la GADA , puis présenter et modéliser l'onduleur ainsi que la turbine éolienne, avec ses différents éléments utilisant un multiplicateur. Ce modèle a été élaboré sous MATLAB, afin de voir son efficacité.

Nous avons constaté que le modèle du GADA est un système à équations différentielles. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au champ tournant à l'aide de la transformation de PARK.

Après la validation de ce modèle, il est possible maintenant d'élaborer et réaliser la commande de système.

Le chapitre suivant fera l'objet du découplage des puissances active et réactive par la commande vectorielle .

CHAPITRE 3

Commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double
alimentation

(GADA)

3.1.Introduction:

Dans ce chapitre, nous présenterons le réglage des puissances statoriques d'une GADA à rotor bobiné alimentée par un onduleur de tension pour le réglage des puissances statoriques injectées au réseau électrique.

L'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation outre que la taille des convertisseurs, est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique puissance-vitesse optimale de l'éolienne. Après avoir donné le modèle mathématique de la machine dans le troisième chapitre, une commande adéquate est nécessaire afin de bien contrôler les puissances statoriques pour permettre un bon fonctionnement de la machine à double alimentation en génératrice. Dans cette optique, la GADA sera pilotée par les tensions rotoriques afin de contrôler les puissances statoriques produites tant au niveau actif que réactif. Ceci sera très utile pour la gestion de l'éolienne.

L'objectif de ce chapitre est d'introduire des algorithmes de la commande vectorielle pour le contrôle des puissances active et réactive générées par la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

3.2. Les types de la commande vectorielle :

3.2.1. La commande vectorielle directe :

Cette commande a été proposée par Blaschke. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué. En effet, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall, spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine). L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés d'harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [39], [3], [40] [2].

3.2.2. La commande vectorielle indirecte :

Cette commande est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de

régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [2].

3.3. Commande vectorielle de la GADA en génératrice :

Pour réaliser la commande bouclée, de régulateur classique de type PI est utilisés. Ce type de régulateur assurent une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale tandis que la rapidité de la réponse est établie par l'action proportionnelle [3] , [40] .

Une structure par boucles imbriquées sera utilisée pour pouvoir contrôler séparément les puissances Q_s et P_s . A cet effet, deux modes de contrôle sont proposées [41] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode sera appelée méthode indirecte découle directement des équations .

3.3.1. Commande directe des puissances active et réactive :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [41].

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la (figure 3.2) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. La commande des puissances de sortie de la GADA dépendent des tensions rotoriques V_{rd} et V_{rq} à contrôlée. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le

Terme $M.V_s/L_s$ Nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot I_{rd} + g \cdot \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.1)$$

V_{rd} et V_{rq} : les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus.

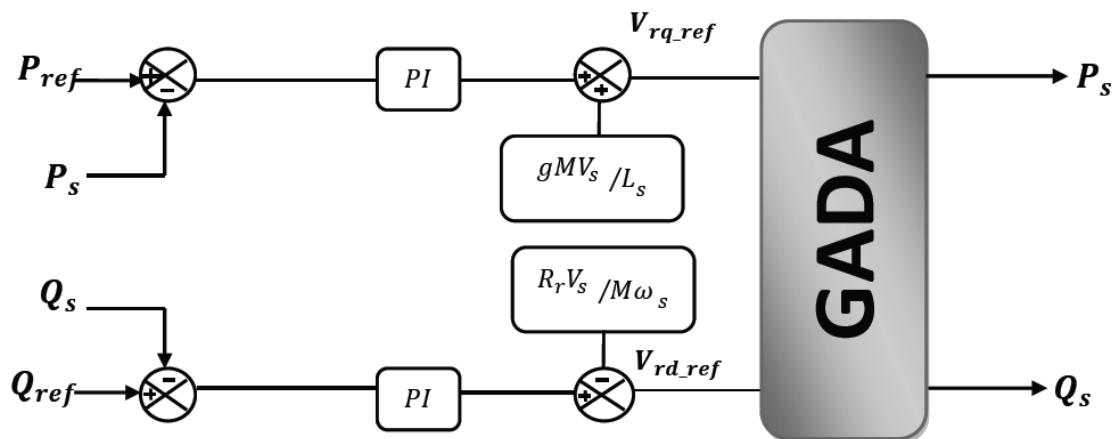


Figure 3.1: Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive [42]

3.3.2. Commande indirecte des puissances active et réactive :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [43], [41], [3]. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques et on trouve :

$$\begin{cases} V_{rd} = g \cdot \omega_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s \cdot \frac{M}{L_s}} * P - \left(\frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s \cdot \frac{M}{L_s}} * Q + \left(\frac{R_r \cdot V_s}{\omega_s \cdot M} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} \right) \\ V_{rq} = - \left(\frac{R_r + (L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s \cdot \frac{M}{L_s}} * P - g \cdot \omega_s \frac{(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{V_s \cdot \frac{M}{L_s}} * Q + g \cdot \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{V_s}{\omega_s \cdot M} \right) \end{cases} \quad (3.2)$$

3.3.2.1. Commande Indirecte sans Boucles des Puissances (en boucle ouverte) :

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt

indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système, les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} I_{rq_ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot P_{s_ref} \\ I_{rd_ref} = -\frac{L_s}{M.V_s} \cdot Q_{s_ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (3.3)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive [44].

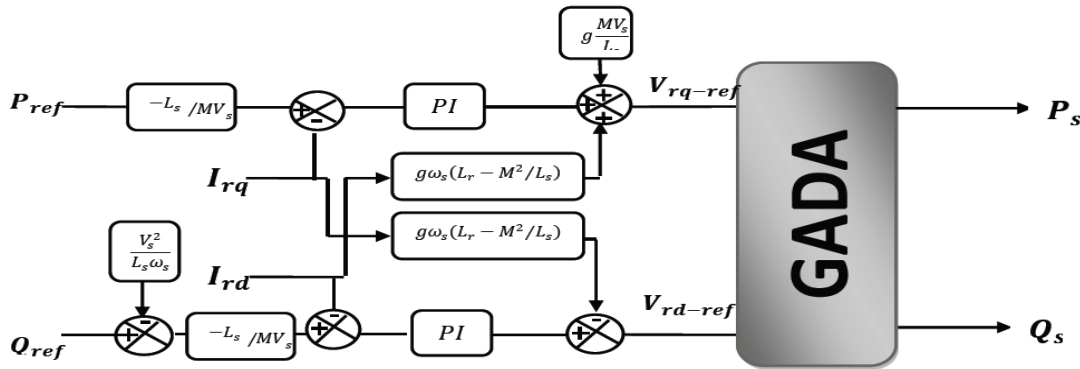


Figure 3. 2: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance (en boucle ouverte) .

3.3.2.2 . Commande Indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé):

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants Ird et Irq et les puissances Qs et Ps en boucle fermé. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure 3.5

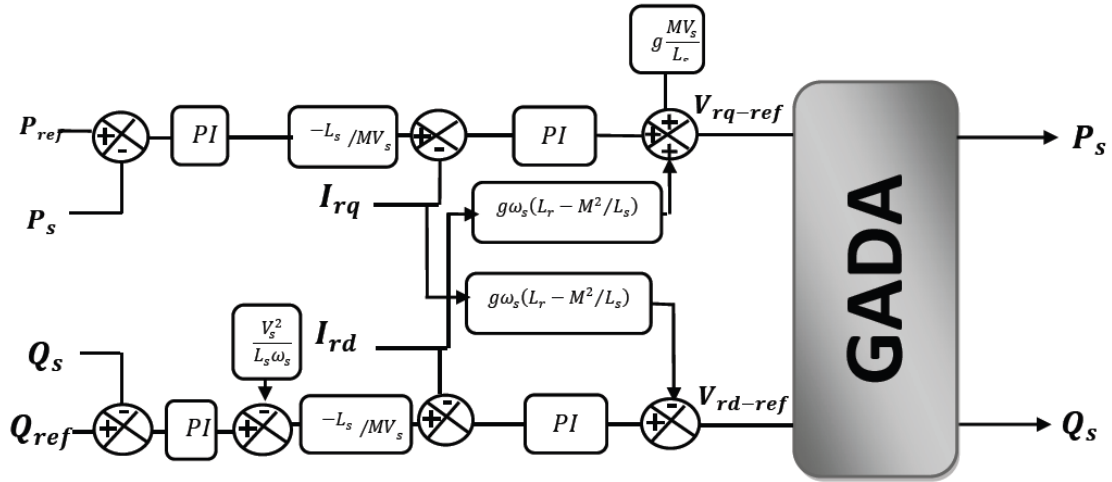


Figure 3.3: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé)

3.3.3 . type et synthèse du régulateur PI:

Les régulateurs PI utilisés pour le réglage des puissances active et réactive et des courants I_{rd} I_{rq} . Nous avons utilisé ce type de régulateur en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul et la simplicité à mettre en œuvre.

La synthèse d'un régulateur Proportionnel – Intégral est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande de la GADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels.

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Ce type de régulateur résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions.

- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.
- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir (erreur statique).

Le schéma de la figure 3.6 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $K_p \frac{K_i}{p}$.

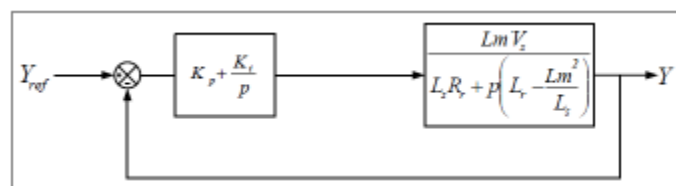


Figure 3.4: Schéma bloc d'un système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante:

$$FTBO = \frac{p \cdot \left(\frac{K_i}{K_p}\right)}{\left(\frac{p}{K_p}\right)} \cdot \frac{Vs.M/Ls(Lr - \frac{M^2}{Ls})}{p + \left(\frac{Rr}{Lr - \frac{M^2}{Ls}}\right)} \quad (3.4)$$

Afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{Rr}{\left(Lr - \frac{M^2}{Ls}\right)} \quad (3.5)$$

Fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$FTBO = F0(t) = \frac{Vs.M/Ls(Lr - \frac{M^2}{Ls})}{p/Kp} \quad (3.6)$$

Notons toutefois que la compensation de constantes de temps n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas la compensation est moins performant.

La Fonction de Transfert en boucle fermée (FTBF) on obtient :

$$FTBF = \frac{F0(t)}{1+F0(t)} = \frac{1}{1+p\tau r} \quad \text{avec } \tau r = \frac{1}{Kp} \cdot \frac{Ls(Lr - \frac{M^2}{Ls})}{M.Vs} \quad (3.7)$$

τr : temps de réponse du système.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = \frac{1}{\tau r} \cdot \frac{Ls(Lr - \frac{M^2}{Ls})}{Vs.M} \\ K_i = \frac{1}{\tau r} \cdot \frac{Rr.Ls}{Vs.M} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

3.4 résultats de simulation des commandes direct :

La simulation de la machine, de la partie électrique et de la commande directe a été implantée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer des tests de la régulation.

3.4.1. Schéma de simulation

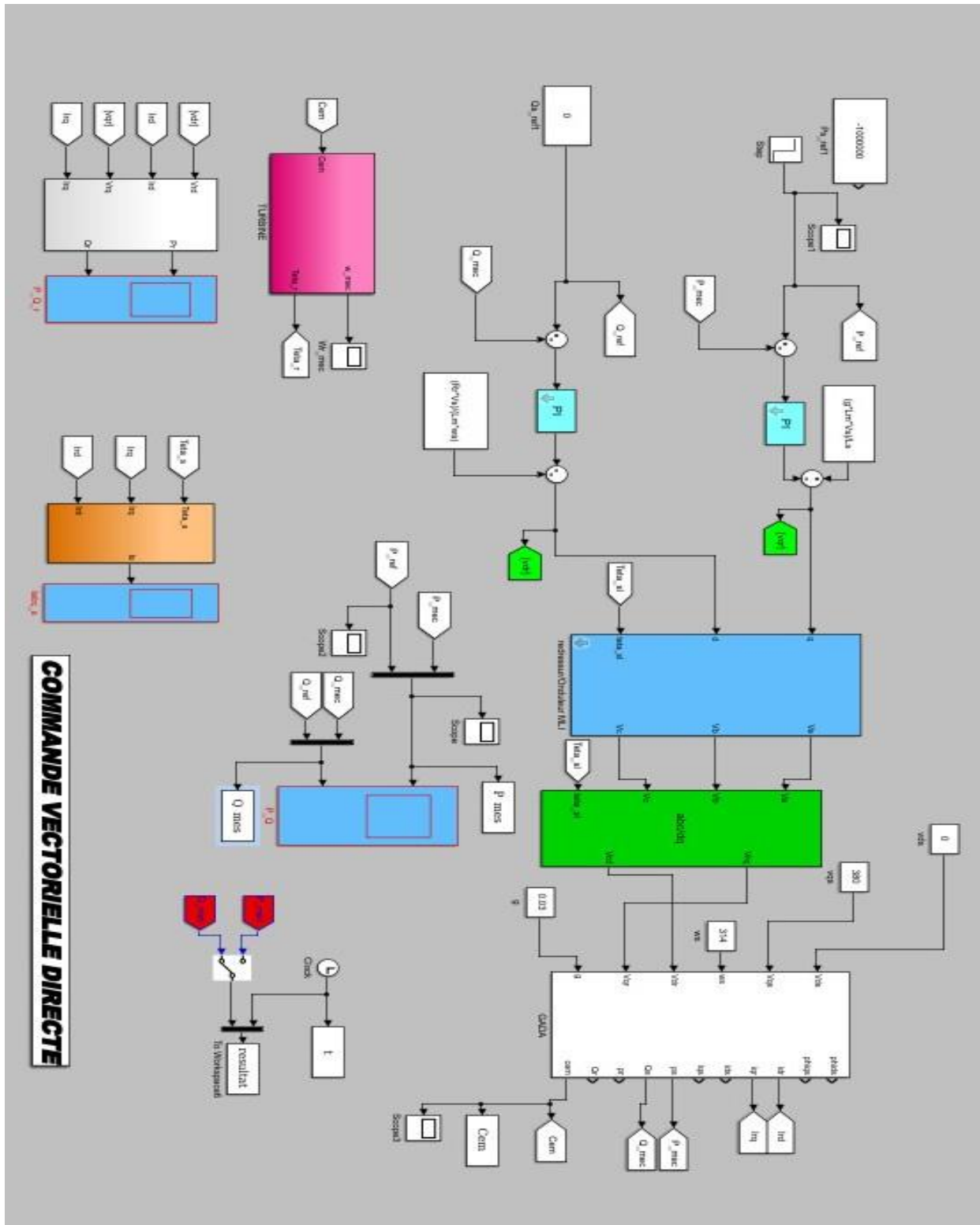


Figure 3.5 : schéma de simulation, de la commande directe GADA sous MATLAB

3.4.2. Les résultats de la simulation

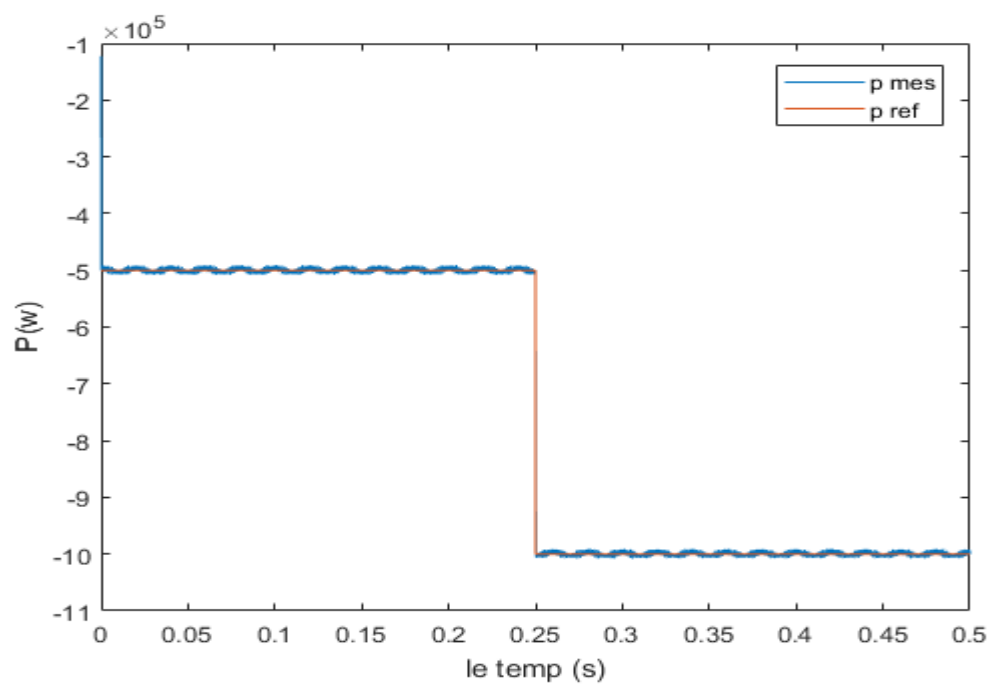


Figure 3.6 : Puissance active délivrée par la GADA et puissance active imposée à la GADA

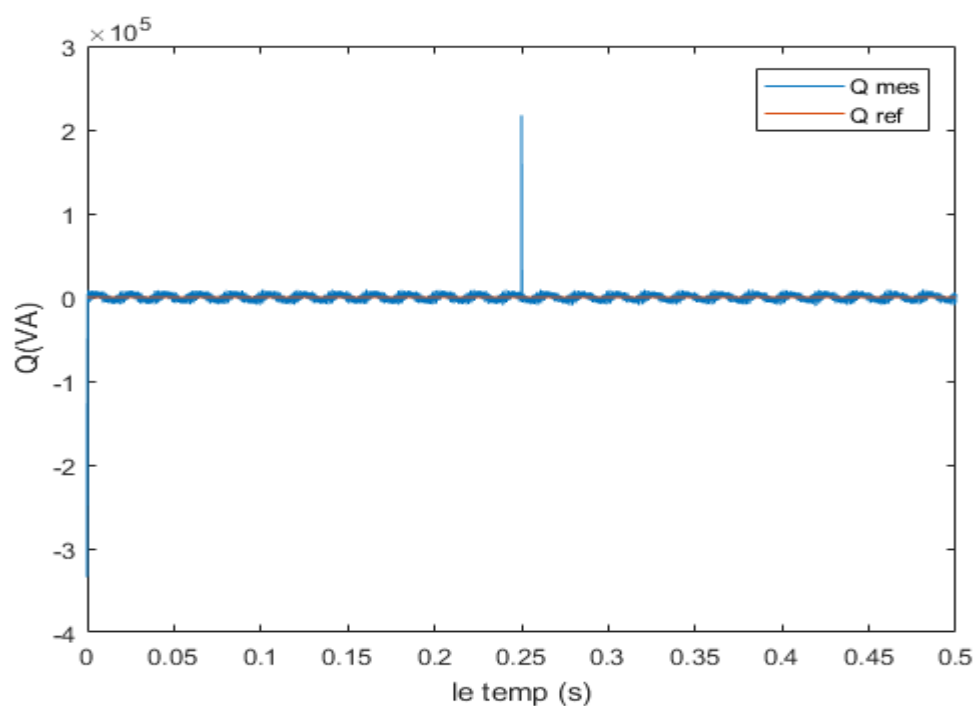


Figure 3.7 : puissance réactive délivrée par la GADA et puissance réactive imposée à la GADA

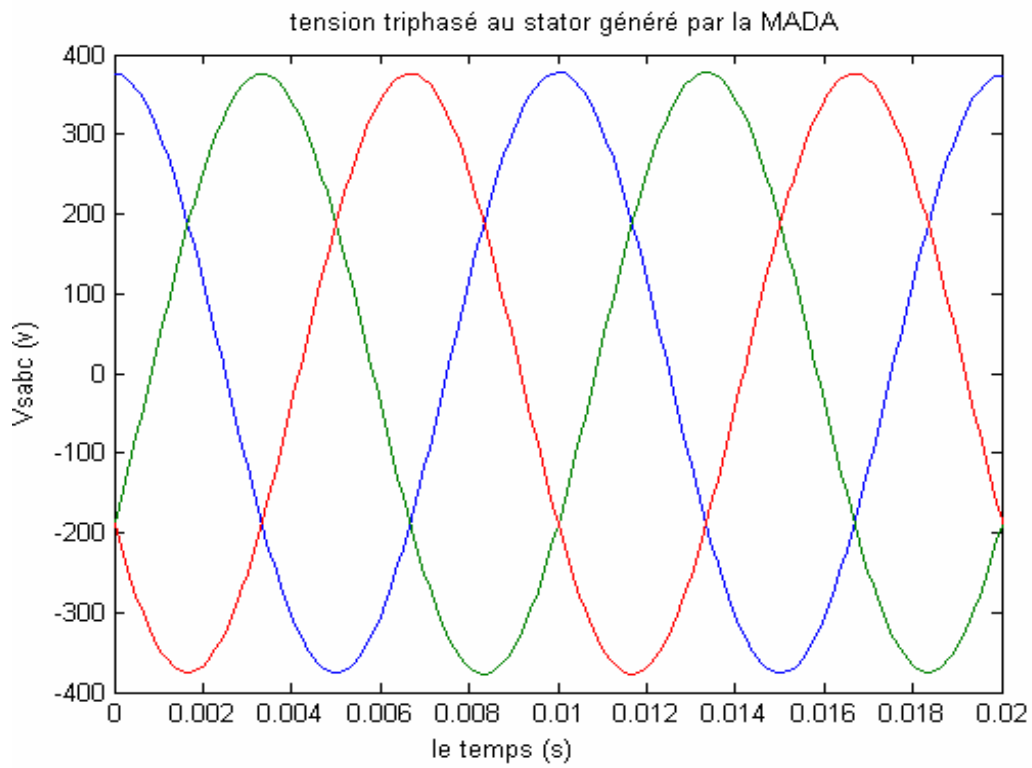


Figure 3.8 : tensions triphasées au stator

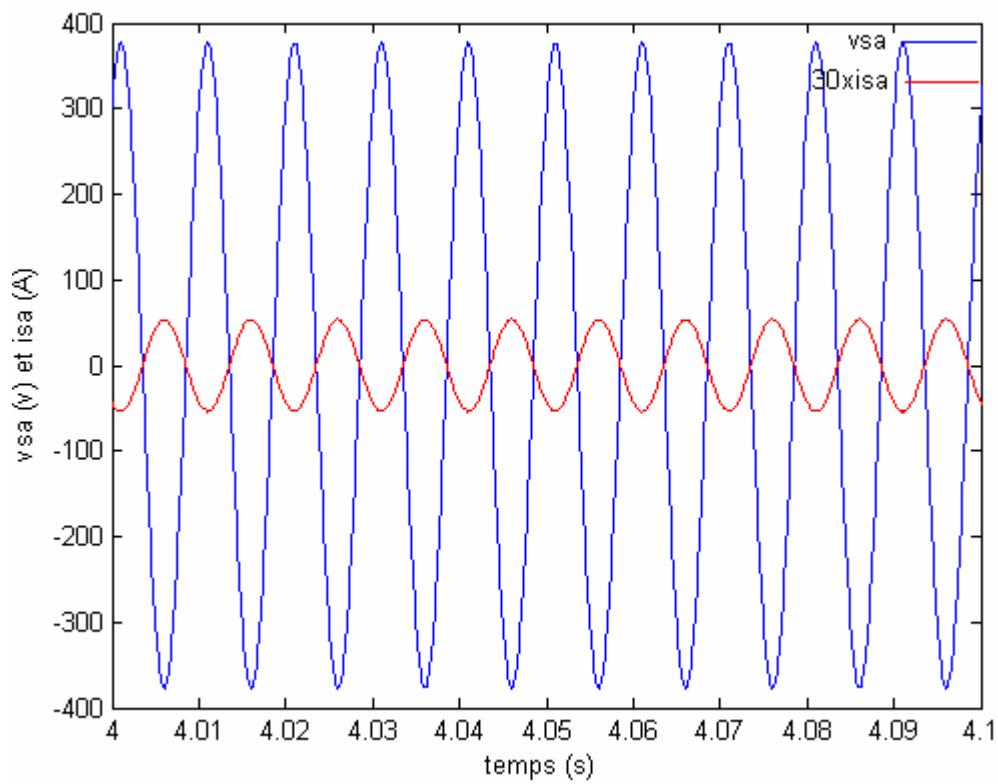


Figure 3.9 : Tension et courant statorique

3.5 Interprétation des courbes :

On observe dans les figures (3.6) et (3.7) que la puissance active et réactive suivi leurs références avec certain osciation à cause d'onduleur statique , sauf a l'instant $t=0.25$ on a un pice de 2.10^5 VA à cause de la variation de la référence de la puissance active de $(-5.10^5$ w) (10.10^5 W), Donc le découplage entre la puissance active et réactive n'est pas totalement maintenu .

Si maintenant, on analyse les signaux statoriques de la figure (3.9) , on remarque que la tension et le courant sont en opposition de phase; ce qui correspond bien à un facteur de puissance unitaire .

3.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons introduit une étude détaillée de la commande vectorielle basé sur un modèle complet d'une gèneratrice asynchrone double alimentation (GADA) avec la technique direct .

Cette étude a montrée la possibilité de contrôle de la machine par les courants rotoriques, afin de déterminer la référence de la composante directe et en quadrature du courant rotorique à partir des puissances active et réactive. La seconde partie de ce chapitre présente un calcul complet des régulateurs de type PI qui a servi de référence de comparaison, et enfin des résultats de simulation ont été présentés et montrent qu'il y a concordance avec ceux rencontrés dans de la littérature. Cette étape montre bien la validité de notre commande.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire permet de développer et d'étudier la conversion d'énergie produite par génératrice asynchrone à double alimentation.

La première partie du travail présente l'état de l'art des installations éoliennes; dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne. Nous avons rappelé les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différents

types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie. La structure utilisant la machine asynchrone à double alimentation présente le meilleur avantage en terme de production de puissance élevée. Ce qui nous a amené à choisir la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

Nous avons fait la modélisation de la chaîne de conversion dans le deuxième chapitre. La conversion des équations dans le référentiel de Park est présentée. La liaison au réseau est ensuite réalisée par un convertisseur contrôlé par une MLI et un filtre de lissage.

Dans le troisième chapitre, nous avons résumé brièvement le principe de la commande vectorielle basé sur un modèle complet d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et sa technique directe. Une commande vectorielle est utilisée afin de contrôler l'échange des puissances statoriques active et réactive entre le stator de la machine et le réseau électrique. un correcteur classique (PI) est testé afin d'analyser leurs performances en suivi de consigne.

Conclusion générale et perspectives

Perspectives :

Ce travail peut être poursuivi comme suit:

- * Étudier l'interaction de la GADA avec le réseau en service.
- * Implémenter d'autres commandes robustes et en faire une comparaison.
- * Faire une étude sur les stratégies de commande de cette chaîne pour les zones de fonctionnement qui ne sont pas traitées dans ce travail de thèse.
- * Étudier en détails l'interaction entre le vent et l'aéroturbine dans le but de bien comprendre et clarifier certains phénomènes qui ne sont pas pris en compte ici.
- * Faire l'estimation de la vitesse de rotation.
- * Application d'autres méthodes pour faire une meilleure optimisation de transfert d'énergie.
- * En fin, et afin de valider les résultats de simulation il est important de réaliser un banc de test.

Paramètres du système éolien

I). Paramètres de le GADA

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique des paramètres</i>
Puissance nominale P_N	1.5 MW
Résistance statorique R_s	0.012 Ω
Résistance rotorique R_r	0.021 Ω
Inductance statorique L_s	0.0137 H
Inductance rotorique L_r	0.0136 H
Inductance mutuelle L_m	0.0135 H
Coefficient de frottement visqueux f_r	0.0024 N.m.s ⁻¹
Glissement g	0.03
Nombre de paires de pôles p	2

Tableau. Annexe A. 1: Paramètres de le GADA.

II). Paramètres de la turbine

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique des paramètres</i>
Rayon de l'éolienne R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
Inertie de l'arbre J	1000 kg.m ²
Surface de balayage des pales S	$\pi \cdot R^2 m^2$
La densité volumique de l'air ρ	1.22 kg/ m ³

Tableau. Annexe A. 2: Paramètres de la turbine.

III). Paramètres de l'alimentation

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique des paramètres</i>
Tension nominale statorique V_s	398 / 690 V
Fréquence nominale statorique f	50 Hz
Tension nominale rotorique V_r	225 / 389 V
Fréquence nominale rotorique f_2	14 Hz

Tableau. Annexe A. 3: Paramètres de l'alimentation.

Références

- [1] M. AMARA Karim M. S.TARAFT <<Commande en puissance d'un aérogénérateur sur une large plage de variation de vitesse, basée sur MADA>> Mémoire Master Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa ,2015.
- [2] D. YOUCEF, Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien, MÉMOIRE Magister en Électrotechnique, SIDI BEL-ABBÈS, 2009.
- [3] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , 2003.
- [4] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, Power Conversion and Control Of Wind Energy Systems. 2011.
- [5] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes» , techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 21
- [6] MENY IVAN, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance» laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), 2004.
- [7] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_eolienne.svg
- [8] S Madougou,“Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahéenne à partir des observations de radars profileurs de vent”., Thèse de Doctorat Université Toulouse ,2010 .
- [9] S.Hamacha "étude et commande d'une MSAP" mémoire Magister. Univ Tizi Ouzo 2013
- [10] A.BenAmar "Etude de la commande d'un système éolienne base sur une GADA"mémoire magister. Univ Batna. 2016
- [11] N.Cherfia "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens" mémoire Magister. Univ.Constantine. 2007.
- [12] 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 de Doctorat, Université de Bretagne, 2010.
- [13] E. F Mogoş., “Production décentralisée dans les réseaux de distribution étude pluridisciplinaire de La modélisation pour le contrôle des sources”., Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [14] N Laverdure ., “Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires”., Thèse de Doctorat, Université de ENS de Cachan, 2005.

Références

- [15] V Courtecuisse., “Supervision d'une centrale multi sources a base d'éoliennes et de stockage d'énergie connecté au réseau électrique”., Thèse de Doctorat Université de L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [16] A Abdelli., “Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive”., Thèse de Doctorat, Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [17] S Khoujet El Khil., “Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée MADA” .,Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [18] T Ghennam., “Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation”., Thèse de Doctorat, Université de Lille et L'école Polytechnique d'ALGER, 2011.
- [19] H Gaillard., “Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service”., Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [20] . A Davigeny., “Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'energie”., Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [21] . G Salloum., “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation” Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.
- [22] L Peng., “Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension”., Thèse de Doctorat Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [23]. F Bonnet., “Contribution à l'optimisation de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation utilisée en mode moteur”., Thèse de Doctorat, Université de L'Institut National Polytechnique de Toulouse 2008.
- [24] F Z TRIA ‘ Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA’ Thèse de Doctorat 2018
- [25] B . Robyns, M.Esselin, «Power control of an inverter. Transformer association in a wind generator», Electromotion, vol.6, No. 1-2, 1999, pp.3-7.
- [26] Srinivas R. chellapilla , Badrul H. CVhowdhury, Senior Member, IEEE « A Dynamic model of Induction Generators for Wind power studies »0-7803-7989-6/03/\$17.00@2003 IEEE.

Références

- [27] S. MÜLLER, M. DEICKE, & RIK W. DE DONCKER « Doubly FED Induction Generator systems for wind Turbines » IEEE Industry Applications Magazine. 2002, email WWW.IEEE.ORG/IAS
- [28] GERALD.M.BROWN, BARNA. BZABO DOS, senior member, IEEE, GERARD J. HOOLBOOM senior member IEEE, and MIHEL.E POLOUJADOFF, fellow IEEE « High power cycloconverter drive for Double –Fed induction Motors » IEEE transactions on Industrial Electronics vol 39 N° 3, 1992.
- [29] FAN LIAO, JI SHENG, AND THOMAS A. LIPO, fellow IEEE « A New energy recovery scheme for Doubly –FED Adjustable –Speed Induction Motor Drives » IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, NO. 4, 1991.
- [30] E. BOGALECHA « power control of double –fed induction generator without speed or position sensor » Brighton. 1993
- [31] Salama et Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL),
- [32] H. Tamrabet « robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une MAS » mémoire de magister option électronique de puissance univ de Batna, 2006.
- [33] J. Wilkie, W.E. Leithead, C Anderson, « modelling of wind turbines by simple models wind engineering » vol 14, N° 4, 1990, pp 247-274.
- [34] C. Saget, « la variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne » .REE, n° 7, juillet 1998, pp. 42-48.
- [35] L. Xu & W. Cheng « Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme », IEEE Trans. On Industry Application 31 (1995), no. 3, p. 636-642, 1995.
- [36] R. Mukand Patel, « wind and solar power systems » CRC press, 1999.
- [37] E.S. Abdin, W. Xu « control design and dynamic performance analysis of a wind turbine – induction generator unit » IEEE Trans, on energy conversion, vol 15, N° 1, 2000.
- [38] E. DE Vries, « wind turbines technology trends » vol 6, N° 4, J. J. Van Jaarsveld et al. (science publishers), renewable energy world, 2003.
- [39] : A.L. NEMMOUR, contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation, mémoire de magister, université de Batna, Algérie, 2002.
- [40] : B. Meriem, Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.

Références

- [41] : A. BOYETTE, Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.
- [42] B. A. ASMA, Etude de la commande d'un système éolien basé sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna, 2016
- [43] J.R. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, I. Albizu, F. Pôrez-Hidalgo, YI. Irizar, Reactive Power Regulation in wind Farms: Control Strategies, Graz, EPE 2001.
- [44] S. METATLA, Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à Base d'une MADA, mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique, 2009.

