

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 des Sciences et Technologies

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

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electriques

Thème:

**Commande linéaires d'une éolienne basé sur la
machine asynchrone à double alimentation**

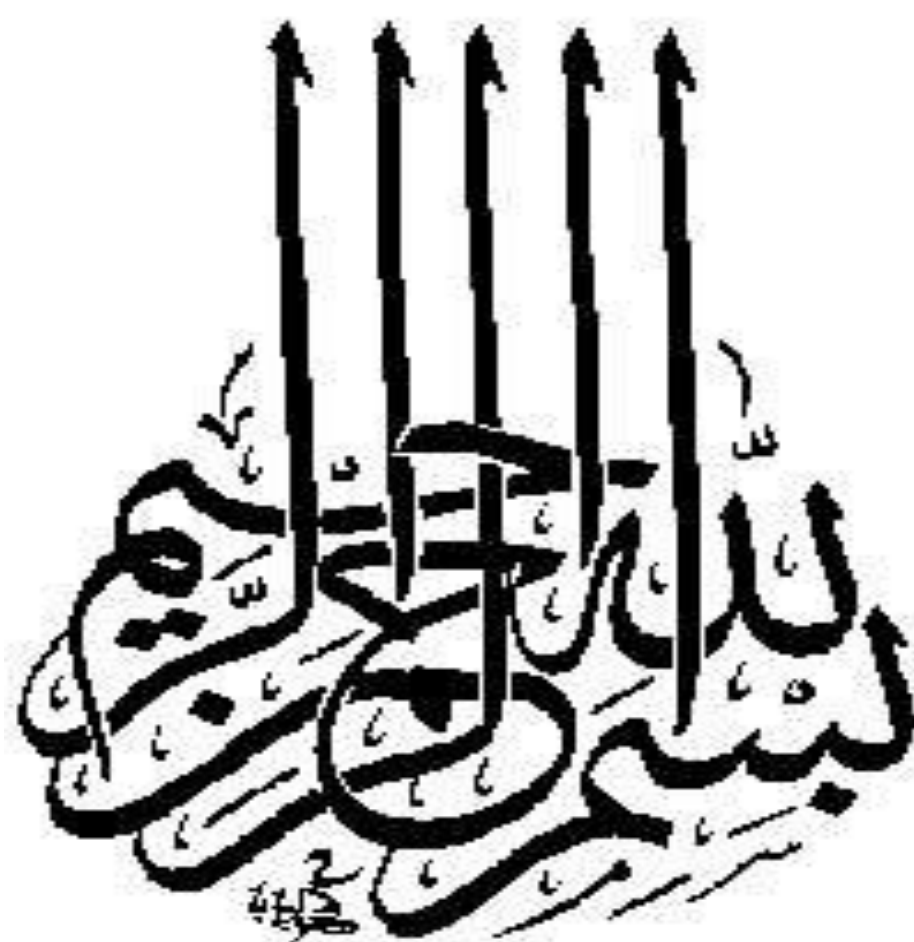
Présenté par :

- **KAOUA DJAMILA**
- **YAHYAOUI ZIDELMAL**

Devant le jury :

Promoteur : ARAMA Fatima Zohra Université D'adrar

Année Universitaire : 2019/2020



Dédicace

Je dédie ce modeste travail À ma chère mère, À mon père, À mes frères et sœurs, À toute ma famille, Et Je dédie ce travail à mon meilleur ami et collègue yahyaoui zidelmal, Etet à tous ceux qui m'ont aidé, avec peu ou pas d'informations et mes amis partout, Toute la promotion 2020 d'Electrotechnique surtout mon meilleur ami : A.Fatima , S.Zineb , Z.Chahira , S.Hafsa, B.souaad, Et mon cher ami K.meriamé

Djamila

Dédicace

Je dédie ce travail :

- * À l'esprit de ma chère mère,*
- * A mon père que dieu bénisse son âme,*
- * A mon cher mari,*
- * A mes frères et sœurs,*
- * A toute ma famille YAHYAOUUI et FOULANI*
- * Et Je dédie ce travail à mon meilleur ami et collègue KAOUA
Djamila*
- * Et mes amis partout, Toute la promotion 2020 de commande
électrique ;surtout mon meilleur ami : A.Fatima , S.Zineb ,
Z.Chahira , S.Hafsa, S.Fatima, B.F.zohra*
- * Et n'oubliez pas les chaudières : B.Yasmina et B.Asma,
HS.F.Zohra,....*

Zidelmel

Remerciement

Nous tenons à remercier tout premièrement dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qui nous a offert durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre cher encadreur : **Mell:ARAMA Fatima Zohra** pour aidez-nous pour rendre ce travail et pour ses précieux conseils.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de ST nous mentionnons par ticulierement les professeurs d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues de commande électrique pour le soutien moral et matériel.

Sommaire

SOMMAIRE

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste de symbole	
Introduction générale.....	I
<i>Chapitre I:Généralité sur le système éolienne</i>	
I.1 Introduction :.....	1
I.2 L'énergie éolienne du VII siècle à nos jours:.....	1
I.3 Définition de l'énergie éolienne:.....	2
I.4 Les différents types d'une éolienne :	3
I.4.1. les éoliennes à axes horizontal:.....	3
I.4.1.1 Les principaux composants d'une éolienne a axe horizontal :	3
A) Avantages:.....	5
B) Inconvénient :.....	6
I.4.2. Les éoliennes à axes Vertical :.....	6
A) Avantages :.....	7
B) Inconvénient :.....	7
I.4.3. Les petites éoliennes :	7
I.5 Zone de fonctionnement :.....	7
I.6 Les déférentes technologies du système éoliennes :	8
I.6.1 les éoliennes à vitesse fixe:	8
I.6.2 les éolinne à vitesse variable :	9
I.7 Synthèse de différentes machines utilisée dans le système éolienne:.....	10
I.8 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) :	11
I.8.1 Mode de fonctionnement de la GADA :	11
I.8.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :.....	12
I.8.1.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone :.....	12
I.8.1.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone :.....	13
I.8.1.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone:.....	13
I.9 Avantages et inconvénients de la GADA:	14
A. Avantages:.....	14
B. Inconvénients :	14
I.10 Applications des éoliennes :.....	15

Sommaire

I.11	Conclusion :	15
------	--------------	----

Chapitre II: Modélisation d'un système éolienne à base de GADA

II.1	Introduction:	17
II.2	Description du système éolienne :	17
II.3	Modélisation de la turbine éolienne :	17
II.3.1	Modèle aérodynamique de la turbine:	17
II.3.1.1	Modèle du vent:	17
II.3.1.2	Modèle de la turbine:	18
II.4	Modélisation de la partie mécanique d'un système éolienne:	21
II.4.1	Modèle du multiplicateur de vitesse :	21
II.4.2	Equation dynamique de l'arbre:	21
II.5	Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA	22
II.5.1	Description de la machine asynchrone à double alimentation:	22
II.5.2	Modélisation et fonctionnement de la GADA:	23
II.5.2.1	Hypothèses simplificatrices:	24
II.5.2.2	Modèle triphasé de la GADA:	24
II.5.2.3	Modèle biphasé de la GADA:	27
II.5.2.4	Choix du référentiel :	32
II.6	Modèle de la machine en représentation d'état :	32
II.7	Modélisation de l'alimentation :	34
II.7.1	Modélisation du redresseur triphasé à diodes :	34
II.7.2	: Modélisation du filtre:	36
II.7.3	Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI:	37
II.7.3.1	Définition d'un onduleur :	37
II.7.3.2	Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) :	39
II.8	Résultats de simulation:	41
II.9:	Conclusion:	44

Chapitre III: Commandes linéaires des puissances de la GADA

III.1	Introduction :	49
III.2	Commande vectorielle de la GADA:	49
III.2.1.	Principe de la commande vectorielle de la GADA:	49
III.2.2.	Les types de la commande vectorielle :	51

Sommaire

III.2.2.1. La commande vectorielle directe :.....	51
III.2.2.2. La commande vectorielle indirecte :	51
III.2.3. Stratégie de commande en puissance active et réactive de la GADA:.....	52
III.2.3.1. Relations entre courants statoriques et courants rotoriques:	52
III.2.3.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:.....	54
III.2.3.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques:	55
III.2.4. La commande vectorielle en puissance statorique du système éolien basée sur un régulateur PI	56
III.2.4.1 Commande vectorielle indirecte :	56
III.2.4.2 Commande en boucle ouverte (sans boucle de puissance):	57
III.2.4.3 Commande avec boucle de puissance:.....	57
III.2.5. Calcul des régulateurs:	58
III.2.6. Résultats de simulation de la commande indirecte du GADA :.....	59
III.3 Conclusion.....	62
Conclusion générale	65
Références bibliographiques.....	67
ANNEXE.....	71

Liste de Figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	2
Figure I.2: Principaux composants d'une éolienne.....	4
Figure I.3 : composent de la nacelle.....	5
Figure I.4 : éoliennes à axes Vertical.....	6
Figure 1.5 : Caractéristique Puissance-vitesse du vent.....	7
Figure I.6 : Eolienne à vitesse fixe.....	8
Figure I.7 : Eolienne fonctionnant à vitesse variable.....	9
Figure I.8: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.....	12
Figure I.9: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	12
Figure I.10: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	13
Figure I.11: Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	13
Figure I.12:. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	13

Chapitre II

Figure II.1: Système éolien à vitesse variable basé sur une GADA.....	17
Figure II.2: Schéma de la turbine éolienne.....	18
Figure II.3:. Simulation du profile de la vitesse du vent.....	19
Figure II.4: Vitesse du vent v et vitesse tangentielle ωR_t	20
Figure II.5: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....	21
Figure II.6: Modèle de l'arbre et de la turbine.....	22
Figure II.7: Symbole d'une Machine Asynchrone Double Alimentation.....	23
Figure II.8: Représentation schématique d'une GADA.....	23
Figure II.9: Représentation spatiale de la GADA dans le système triphasé.....	24
Figure II.10: Modèle dynamique dans une GADA à trois axes.....	26
Figure II.11: Décomposition de la transformation de Park.	28
Figure II.12: Repère de PARK.....	29
Figure II.13: l'ensemble convertisseur machine.....	34
Figure II.14: Représentation du redresseur triphasé à diodes.....	35
Figure II.15: Représentation de la tension de sortie du redresseur.....	35
Figure II.16: Représentation du filtre passe –bas.....	36
Figure II.17: Tension redressée et filtrée à l'entrée de l'onduleur rotorique.....	37

Liste de Figures

Figure II.18: Synoptique d'une conversion continu- alternatif.....	37
Figure II.19: Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une GADA.....	38
Figure II.20: Schéma block de l'onduleur.....	40
Figure II.21: Schéma block interne (sub-système)de l'onduleur +MLI.....	42
Figure II.22: Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.....	42
Figure II.23: Schéma globale du système éolien " Turbine + GADA".....	42
Figure II.24: Résultats de simulation de l'alimentation du rotor.....	43
Figure II.25: Puissance Active et Réactive de la génératrice éolienne.....	43

Chapitre III

Figure III.1: Schéma de principe du découplage de la GADA par analogie avec la machine à courant continu.....	50
Figure III.2: Orientation du flux statorique sur l'axe d.....	53
Figure III.3: Schéma bloc du système à réguler.....	56
Figure III.4: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance (en boucle ouverte) [5].....	57
Figure III.5: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance (en boucle fermé) [4].....	58
Figure III.6: Schéma bloc de régulateur PI.....	58
Figure III.7: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance.....	60
Figure III.8: Résultats de simulations pour la commande indirecte sans onduleur.....	61
Figure III.9: Résultats de simulations pour la commande indirecte avec onduleur.....	62

Liste des Tableau

LISTE DES TABLEAU

Chapitre I

Tableau I.1: L'énergie éolienne à travers le temps.....	2
Tableau I.2: classification des turbines éoliennes.....	3
Tableau I.3: avantages et inconvénients a vitesse fixe.....	9
Tableau I.4: avantages et inconvénients a vitesse variable.....	10
Tableau I.5: Avantages et inconvénients des différentes machines.....	11
Tableau I.6: mode opération de la GADA.....	11

Chapitre II

Tableau II.1: Représentation abc - $\alpha\beta$ et inversement.....	27
---	----

Liste des Symbole

LISTE DES SYMBOLE

GADA : Machine asynchrone à double alimentation.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

M.L.I : Modulation de largeur d'impulsions

ρ : Densité de l'air 1.225 kg.m^{-3} .

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

R : Rayon du rotor éolien.

G : Gain du multiplicateur.

m : Masse d'air traversant le rotor éolien.

C : Coefficient de puissance de l'éolienne.

C_{em}, C_r, C_f : Couple électromagnétique, couple résistant et couple de frottement.

V : Tension aux bornes du capacité du filtre.

V_{red} : Tension redressé.

$\omega_s, \omega_r, \omega_g$: Pulsations électriques des grandeurs statoriques, rotoriques et de glissement.

$\theta_s, \theta_r, \theta_{sl}$: Angles relatifs aux pulsations : statorique, rotorique et de glissement.

L : Inductance du filtre LC.

C_f : Capacité du filtre LC.

f_s :Fréquence des grandeurs statorique

f_r :Fréquence des grandeurs rotorique

f_p :Fréquence de la porteuse

a, b, c : Indice correspondents aux trois phases a, b, c

C.V : Commande vectorielle

B,C :Commande par backstepping

s,r : Indice du stator, du rotor

d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature

R_s : Résistance des enroulements statoriques.

R_r : Résistance des enroulements rotoriques

L_s : Inductance propre d'une phase statorique

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

T_r : Constante de temps rotorique

T_s : Constante de temps statorique

M_{sr} : Inductance mutuelle maximale entre le stator et le rotor

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

Liste des Symbole

- M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor
- φ_s, φ_r : Respectivement flux statorique et rotorique
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Les flux statorique directes et en quadrature
- $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Les flux rotorique directes et en quadrature
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Courants triphasés statoriques.
- I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants triphasés rotoriques
- k_{isa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions simples triphasées statoriques.
- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions rotoriques triphasées
- V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique directes et en quadrature
- V_{rd}, V_{rq} : Tension rotorique directes et en quadrature
- P : Nombre de paires de pôles.
- g : Glissement
- L_r : Inductance cyclique d'un phase rotorique
- L_s : Inductance cyclique d'un phase statorique
- L_m : L'inductance mutuelle.
- $[P(\theta)]$: Matrice de PARK.
- $[P(\theta)]^{-1}$: Matrice inverse de PARK.
- J : Moment d'inertie.
- P_s : La puissance statorique active.
- Q_s : La puissance statorique réactive.
- P^{ref}, Q^{ref} : Puissances électriques de références de la GADA.
- v_2, v_3 : Termes de couplage entre les axes d et q.
- v_1, v_4 : Perturbations à rejeter.
- P_I : Proportionnel – Intégrale.
- k_p : Gain de l'action proportionnel du régulateur PI.
- k_i : Gain de l'action intégrale du régulateur PI.

Résumé

ملخص :

يقدم هذا العمل دراسة واستعمال المولد اللا تزامني مزدوج التغذية في انتاج الطاقة الكهربائية الهوائية من اجل ذلك قمنا بإنشاء نموذج توربين هوائي لتدوير المولد . نوعين من التحكم الشعاعي كانتا موضوع الدراسة في هذه المذكرة من اجل التحكم المباشر والتحكم الغير المباشر . التحكم الغير المباشر قدم لنا عدة مزايا : التحكم المنفصل للطاقة النشيطة والتفاعلية ويسهل انشاء عملية الترشيح.

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الهوائية، عفة الكهربائية، الة لا تزامنية مضاعفة التغذية، التحكم الشعاعي

Résumé:

Ce travail présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation dans la production de l'énergie éolienne. Pour cela, nous avons défini un modèle de la turbine éolienne pour l'entraînement de la MADA. Deux types de commande vectorielle ont fait l'objet de cette d'étude dans ce mémoire pour le contrôle indépendant de la puissance active et réactive : la commande directe et la commande indirecte. La commande indirecte offre plusieurs avantages et facilite la mise en place au filtrage

Mots clés :

Energie éolienne, Machine Asynchrone à Double Alimentations (MADA, GADA), Commande vectorielle,

Abstract:

This work presents the study and the use of the doubly fed induction generator in the wind power system. For this, we defined a model of wind turbine for the training of DFIG. Two types of vector control have been the subject of this study in this paper for independent control of active and reactive power: the direct control and the indirect control, the indirect control offers several advantages and facilitates the establishment filtering.

Key words:

Wind energy, Doubly Fed Induction Machine (DFIM, DFIG), Vector control,



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La demande de l'énergie électrique à l'échelle mondiale, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Ceci a conduit à un épuisement rapide des sources traditionnelles. Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Cela peut être réalisé par l'exploitation des ressources en énergie renouvelables inépuisables.

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires.

Cependant, l'affinement des techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches approfondies visant à fiabiliser, réduire les coûts et augmenter l'efficacité énergétique. Dans ce contexte, nous nous intéressons dans ce travail, à l'énergie éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance mondial élevé.

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis des millénaires : navigation, moulins, pompage. Elle a joué un rôle économique relativement important au cours des siècles avant d'être supplantée par les énergies fossiles à partir du début du 19^{ème} siècle. Si quelques prototypes d'éoliennes génératrices d'électricité ont vu le jour dès le milieu du 20^{ème} siècle, notamment en France, en Grande-Bretagne et au Danemark, ce n'est que dans les années 80 que l'éolien industriel commence vraiment à se développer et dans les années 90 qu'il connaît un véritable essor dans un certain nombre de pays. [1]

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est la plus présente des énergies renouvelables dans le monde[1]. Les méthodes de gestion opérationnelle d'une ferme éolienne occupent donc une place de plus en plus importante, dans le but d'assurer la meilleure qualité de production possible et d'optimiser les enjeux économiques.

Actuellement, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1MW notamment pour tirer parti au maximum du gisement éolien sur le site d'implantation. Ces générateurs utilisent souvent la Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA) comme génératrice étant donné ses avantages



Introduction générale

La machine à double alimentation (GADA) en anglo-saxon "doubly-fed induction machine " c'est une machine asynchrone triphasée avec un rotor bobiné qui peut être alimenté par des tensions externes. Le schéma de raccordement le plus typique pour cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers un convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme.

L'avantage principal de cette machine, est que le convertisseur de puissance doit traiter seulement (selon le glissement) une fraction de 20-30 % de toute la puissance de système, ceci signifie que les pertes dans le convertisseur de puissance peuvent être réduites par rapport au traitement de toute la puissance par celui-ci; et par conséquent le coût de production. En plus la GADA en mode génératrice permet de produire de l'énergie électrique à fréquence constante avec une vitesse mécanique variable. De même qu'elle offre une large gamme opérationnelle par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil [2].

L'objectif principal de notre travail est d'introduire des stratégies de commandes pour améliorer les performances de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) utilisée pour la production de l'énergie électrique.

Ce mémoire est consacré aux trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les énergies éoliennes. On a présenté les principaux composants d'une éolienne et ses différents types, après on a exprimé le principe de conversion d'énergie cinétique du vent à une énergie électrique. Ensuite, la machine asynchrone à double alimentation qui utilise pour la conversion de l'énergie éolienne.

Le second chapitre présente une étude sur la modélisation et simulation de système de conversion (turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation) à travers les équations électriques, de tension et flux l'équation mécanique du couple à l'aide de la transformation de Park et certaines hypothèses.

Le troisième chapitre est consacré à l'utilisation de commande vectorielle en puissances active et réactive statorique. Dans ce même chapitre nous proposons, une synthèse du régulateur proportionnel-intégral (PI), ainsi que des résultats obtenus par simulation.



Introduction générale

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.



Chapitre I

Généralité sur le système éolienne

I.1 Introduction :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée, 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 dimension (jusqu'à 60 m pour des éolienne de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées éviter les phénomènes de turbulences. [3]

C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent, la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones.[4]

I.2 L'énergie éolienne du VII siècle à nos jours:

Années	Domaine d'application / Innovation	Zone géographique / pays
VII siècle	Utilisation de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales.	Perse
1100	Pomper l'eau Moudre le blé (moulins à vent)	Europe
1700	Moudre le grain (apparition des turbines éoliennes)	Canada
1800	Pomper l'eau (moulins à vent)	Amérique
1887	Produire de l'électricité (construite par Charles F. Brush. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW)	Amérique
1920	Apparition du concept d'un rotor à axe vertical: éoliennes Darrieux développé par Georges J.M. Darrieus.	France
1930	Eclairage électrique Recharge de batterie des	Canada

	radios à cristal Alimentation des appareils électroménagers et de l'équipement de ferme (A la suite du développement de petites éoliennes)	
1957	Apparition de la turbine Gedser conçue par Johannes Juul (modèle de référence, se compose d'un générateur et de trois Pales à pivot)	Danemark
1971	Parc d'Eoliennes offshore (Premier du genre avec une puissance totale de 5 MW)	Danemark
1984	Projet Éole (la plus grande éolienne à axe verticale de type Darrieus)	Canada
2002	Mise en service du plus grand parc éolien offshore au monde	Danemark
2004	La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 39 GW	

Tableau I.1: L'énergie éolienne à travers le temps.[5]

I.3 Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice .figure (I.1)

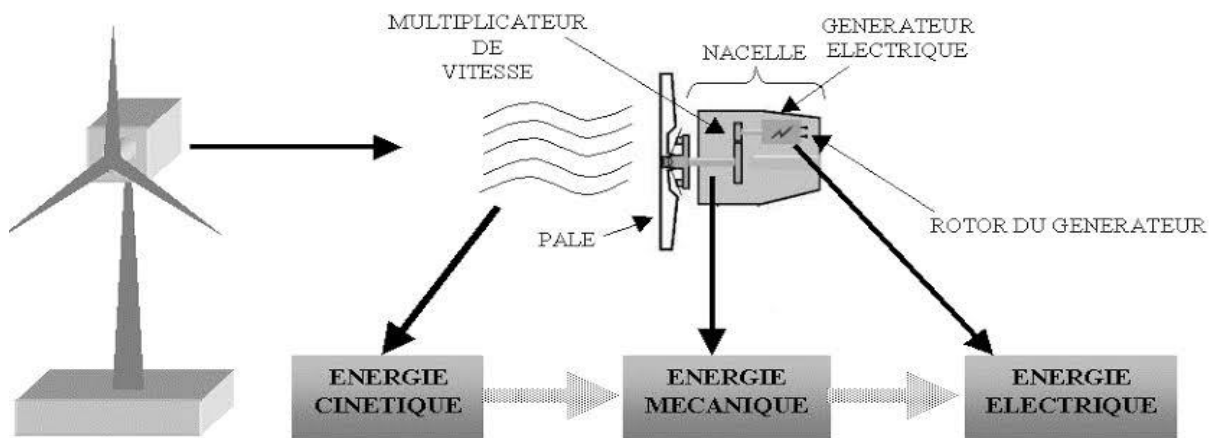


Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent. [3] [6].

I.4 Les différents types d'une éolienne :

Il y a 3 types des éoliennes :

- ❖ éolienne à axe horizontal
- ❖ éolienne à axe vertical
- ❖ Petite éolienne

I.4.1. les éoliennes à axes horizontal:

L'éolienne se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical qui doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [7].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau I.2: classification des turbines éoliennes

I.4.1.1 Les principaux composants d'une éolienne a axe horizontal :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux figure (I.2) :

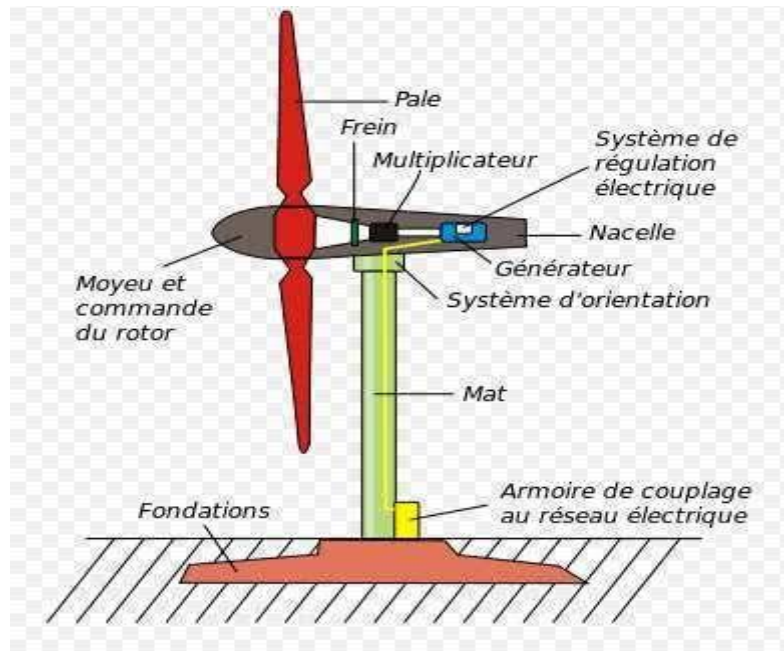


Figure I.2: Principaux composants d'une éolienne. [8]

1) Le mât (la tour):

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 qualité de matière mise en œuvre présente 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. [9]

2) Le rotor (moyeu et pales):

Le rotor transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, il est constitué par des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu, l'énergie captée est en fonction de surface balayée par l'hélice et la vitesse du vent.

- ❖ **Les pales:** Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- ❖ **Le moyeu:** C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

3) **La nacelle:** Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

Bine éolienne à la génératrice électrique. Elle comprend les éléments suivants :

- ❖ Arbre.
- ❖ Multiplicateur.
- ❖ Roulements.
- ❖ Le frein à disque permettant d'arrêter le système en cas de surcharge.
- ❖ Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une GADA
- ❖ Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent) . Figure (I.3).

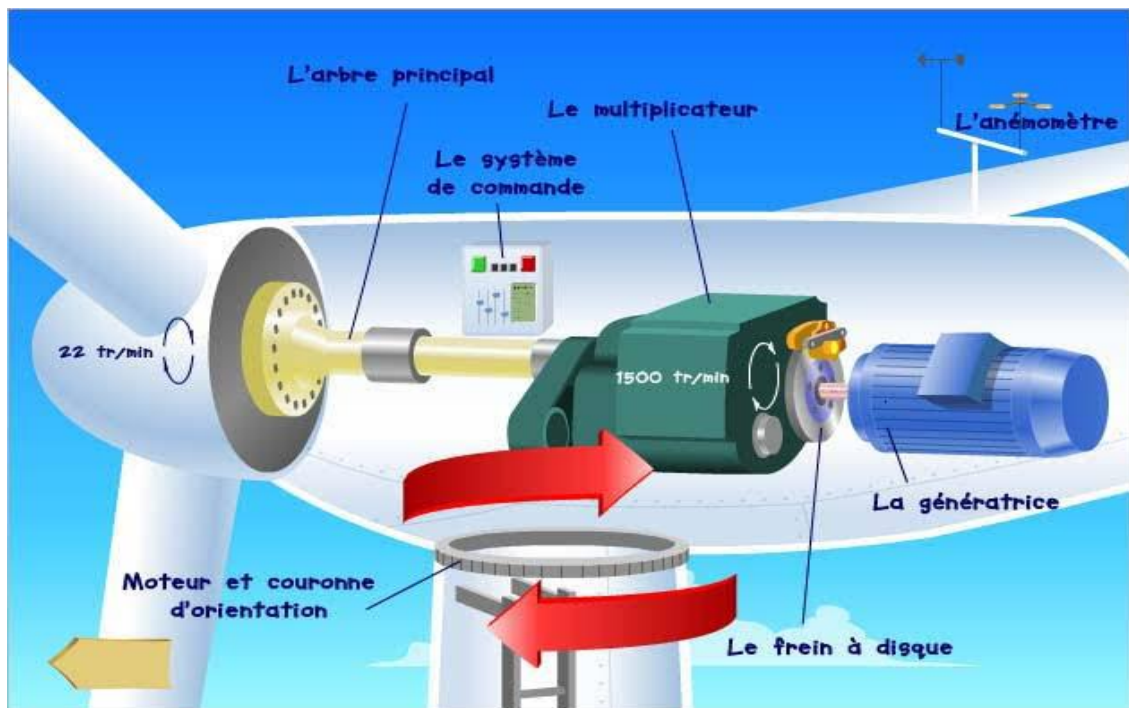


Figure I.3 : composent de la nacelle[10]

A) Avantages:

- Rendement élève
- Moins chères
- La position de récepteur a plusieurs être de la sole
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage [6]

B) Inconvénient :

- Conception plus complexe à exiger en raison du besoin de commandes des pales

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [6].

I.4.2. Les éoliennes à axes Vertical :

L'axe de rotation de ces turbines est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent, elles sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique [7].

On trouve deux types :

(a) Rotor de Darrieus

(b) Rotor de Savonius



(a): Rotor de Darrieus

(b): Rotor de Savonius

Figure I.4 : éoliennes à axes Vertical[8]

A) Avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien [6].

B) Inconvénient :

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour [6].

I.4.3. Les petites éoliennes :

Ils sont utilisés pour alimenter des appareils électriques de manière économique

I.5 Zone de fonctionnement :

La courbe de puissance détermine la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses du vent. Généralement, fournie par les constructeurs, elle permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne en fonction de la vitesse du vent [9].

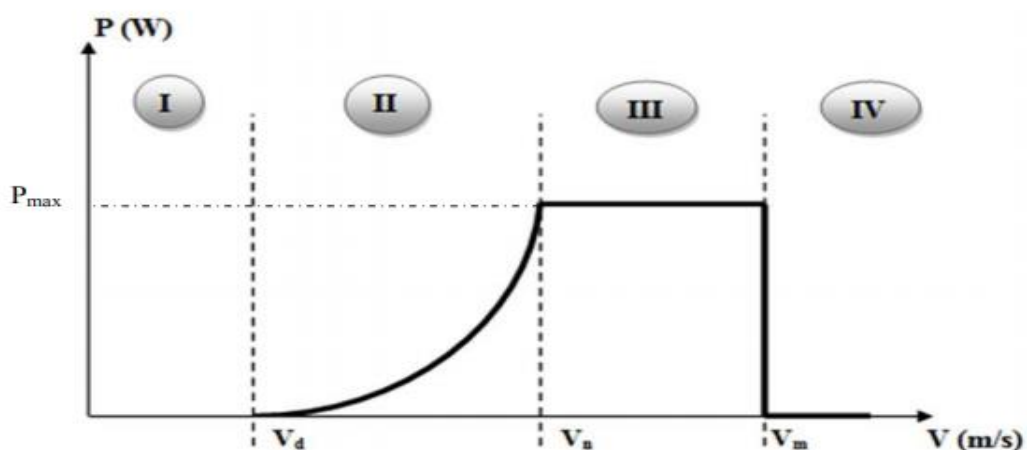


Figure 1.5 : Caractéristique Puissance-vitesse du vent[11].

V_d : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.

V_n : Vitesse du vent correspondant à la vitesse nominale de la génératrice.

V_m : Vitesse du vent correspondant à la vitesse de décrochage, pour laquelle l'éolienne doit être déconnectée, pour des raisons de sécurité mécanique.

Zone I : La vitesse du vent dans cette zone est inférieure à la vitesse de démarrage V_d , la puissance à extraire est trop faible et n'arrive même pas à compenser les pertes occasionnées par la machine dans ce cas l'éolienne ne fonctionne pas.

Zone II : Un maximum de puissance est extrait pour chaque vitesse de vent et ça enclenche d'un algorithme de commande d'extraction de puissance maximum.

Zone III : La puissance est maintenue à sa valeur nominale et le fonctionnement est à charge partielle.

Zone IV : Afin de protéger l'installation, un dispositif d'arrêt d'urgence est actionné et cela met l'éolienne en drapeau

I.6 Les différentes technologies du système éoliennes :

I.6.1 les éoliennes à vitesse fixe:

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

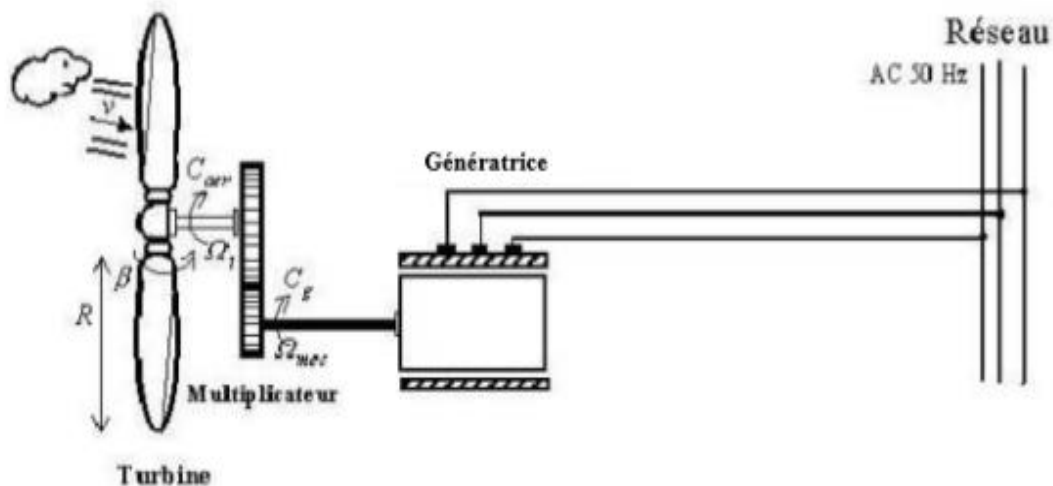


Figure I.6 : Eolienne à vitesse fixe [12]

Avantages	Inconvénients
<ol style="list-style-type: none"> 1. Système électrique simple 2. Moins chère 3. Ne besoin pas de système d'électronique de puissance 4. Moins d'entretien 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La complexité du contrôle de la puissance transféré au réseau 2. Présence des oscillations au niveau de la puissance

Tableau I.3: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse fixe.

I.6.2 les éoliennes à vitesse variable :

Constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (GADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (GADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

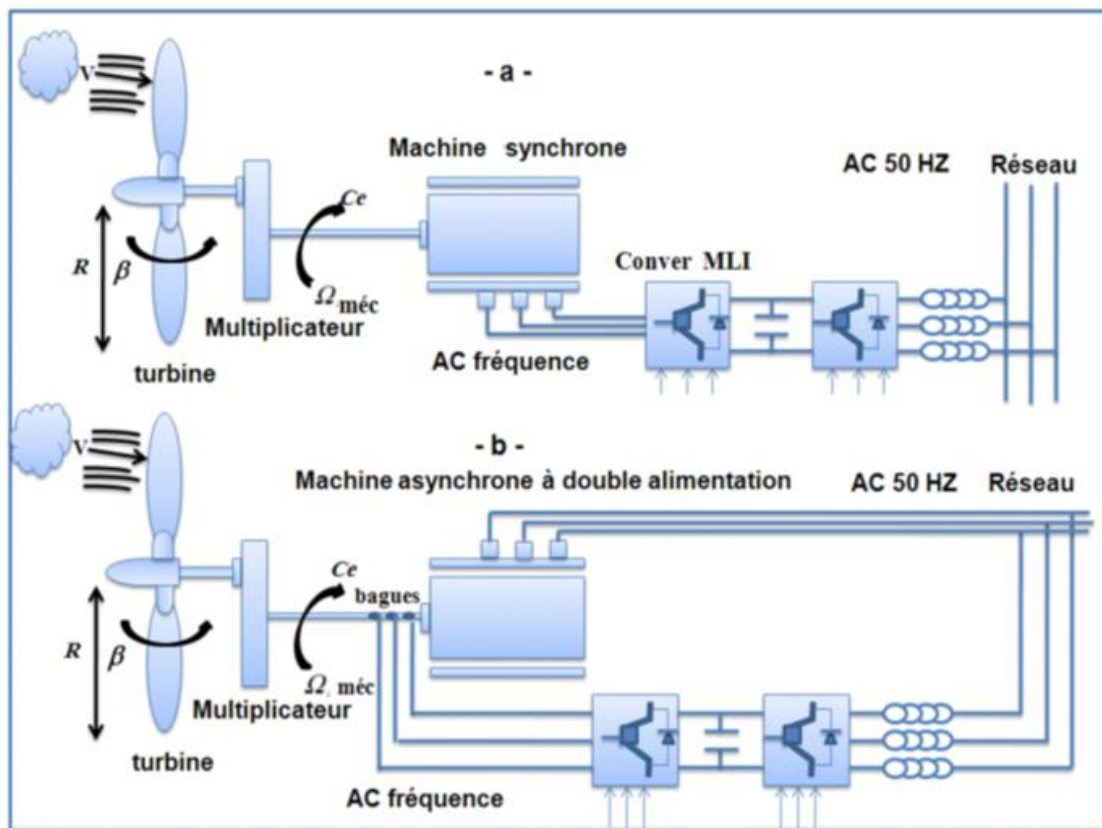


Figure I.7 : Eolienne fonctionnant à vitesse variable [4]

Avantages	Inconvénients
<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrôler le transfert d'énergie au réseau 2. Production d'énergie de la plus haute qualité 3. Réduction de bruit 	<ol style="list-style-type: none"> 1. utilisation des machine spéciale(exp :GADA) 2. cout supplémentaire plus important (convertisseur ,commande)

Tableau I.4: Avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse variable

I.7 Synthèse de différentes machines utilisée dans le système éolienne:

Le tableau I.5 rappelle les différentes caractéristiques des différentes éoliennes.

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> - Machine robuste. - Faible coût. - Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance extraite non optimisée. - Maintenance boîte de vitesse. - Pas de contrôle de l'énergie réactive. - Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
GADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable - Puissance extraite optimisée. - Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale. - Machine standard. - connexion de la machine plus facile à gérer. - Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maintenance boite de vitesse. - Prix de l'électronique de puissance. - Contrôle - commande complexe. - Contact glissant bagues – balais

MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse. - Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. - Connexion de la machine facile à gérer - Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Prix de l'électronique de puissance. - Machine spécifique. - Grand diamètre de machine. - Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.
-----------------------------	---	--

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des différentes machines [13].

I.8 Eolienne à base de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) :

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies éoliennes ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [14].

I.8.1 Mode de fonctionnement de la GADA :

Comme la machine asynchrone classique, la GADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [14].

		Modes	
		Moteur $P_m > 0$	Générateur $P_m < 0$
Régime	Hypo-synchrone $P_s = -(P_m - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r > 0$	$P_s > 0$ et $P_r < 0$
	Hyper-synchrone $P_m = -(P_s - P_r)$	$P_s < 0$ et $P_r < 0$	$P_s > 0$ et $P_r > 0$

Tableau I.6: mode opération de la GADA

La GADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la GADA 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 [14].

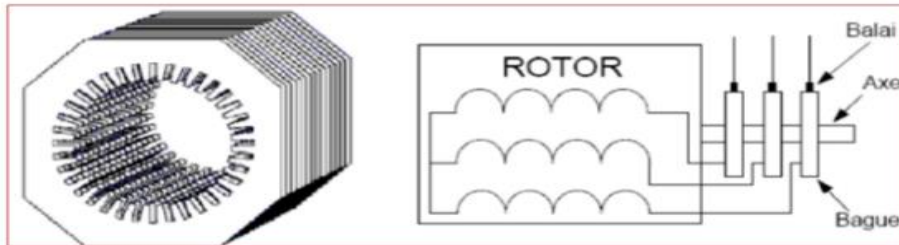


Figure I.8: Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA[14].

I.8.1.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

La figure I.9.montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [14].

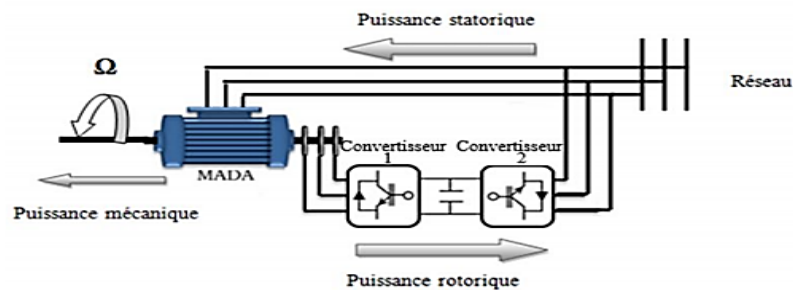


Figure I.9: Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.[14]

I.8.1.2 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone :

La figure I.10 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [14], [15].

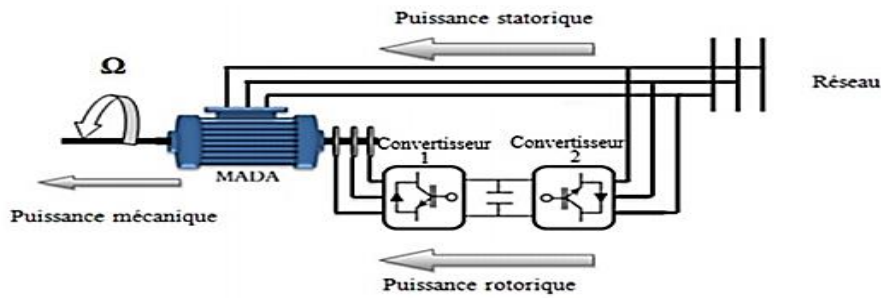


Figure I.10: Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone[14]

I.8.1.3 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone :

La figure(I.11) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [14].

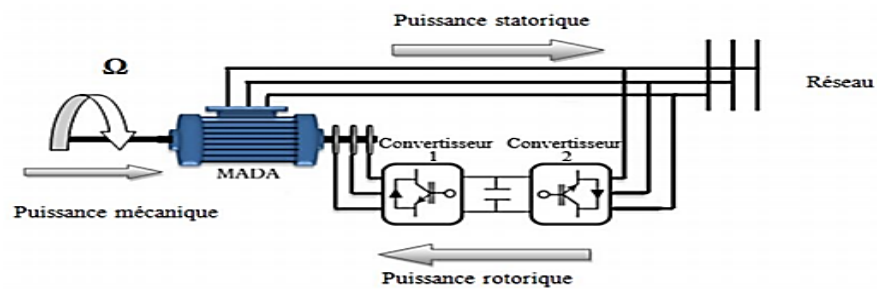


Figure I.11:Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.[14]

I.8.1.4 Fonctionnement en Mode Générateur Hyper-Synchrone:

La figure I.12.montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [14].

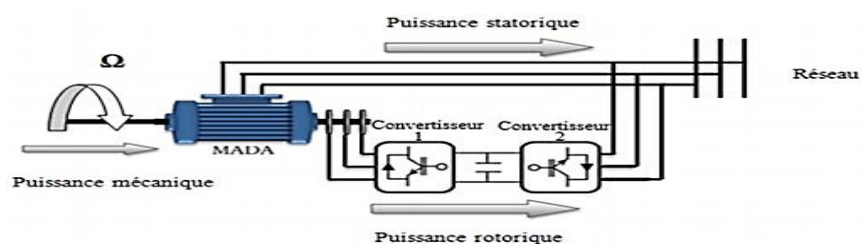


Figure I.12:. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.[14].

I.9 Avantages et inconvénients de la GADA:**A. Avantages:**

Les principaux avantages de la GADA sont : [16],[17]

- ❖ L'accessibilité au rotor et au stator rend la mesure des courants possible ce qui offre une grande flexibilité et précision pour contrôle de flux et du couple électromagnétique ;
- ❖ Elle offre plusieurs possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application.
- ❖ Fonctionnement possible à couple constant au-delà de la vitesse nominale ;
- ❖ Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine pour une vitesse de fonctionnement autour de celle de synchronisme dans ce cas les pertes des interrupteurs à semi-conducteur sont faibles et par conséquent un rendement élevé du système de conversion ;
- ❖ Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne.

B. Inconvénients :

Tout d'abord, la GADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants : [17].

- ❖ Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Pourtant certaines études prétendent le contraire .
- ❖ Nous utilisons un nombre 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).
- ❖ Nécessite une maintenance périodique ce qui va augmenter le coût d'exploitation.

I.10 Applications 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.[6]

I.11 Conclusion :

Ce chapitre représente une généralité sur les éoliennes d'une façon générale, nous avons commencé par définir les éoliennes, ensuite nous avons représenté les types des éoliennes (éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal), et puis nous avons cité les avantages et les inconvénients de différentes machines utilisées dans le système éolien plus importants. Et le mode de GADA. Finalement, ce chapitre inclut les avantages et inconvénients de la GADA et la application de l'énergie éolienne.

Chapitre: II

Modélisation d'un système éolienne à base de GADA

II.1 Introduction:

La modélisation est une opération permet d'établir les équations mathématique qui introduit le fonctionnement d'un système physique à base des hypothèses.

Dans le présent chapitre Nous modélisons chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne, la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur dans les différents repères et nous verrons ensuite la modélisation et la commande de l'onduleur.

II.2 Description du système éolienne :

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une GADA, est illustré à la Figure II.1. La turbine, via un multiplicateur, entraîne la GADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseurs statiques triphasés par le rotor [8].

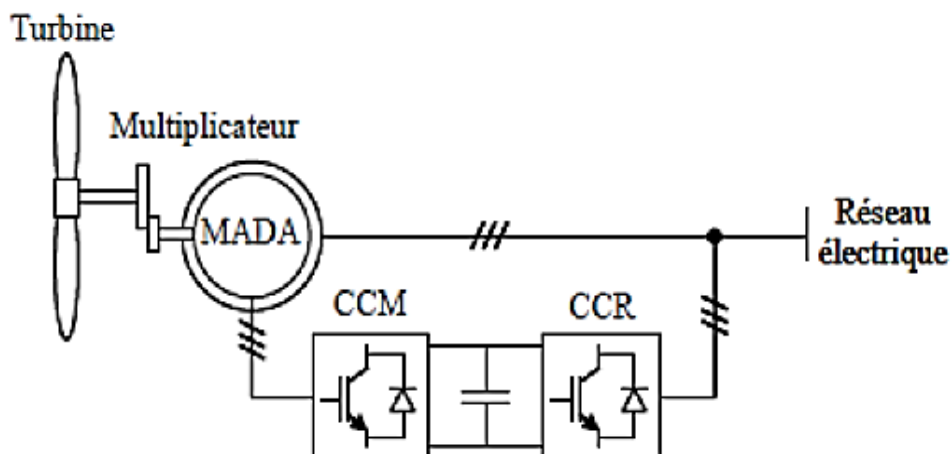


figure II.1 : Système éolien à vitesse variable basé sur une GADA [8].

II.3 Modélisation de la turbine éolienne :

II.3.1 Modèle aérodynamique de la turbine:

II.3.1.1 Modèle du vent:

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, donc pour la rentabilité. Les propriétés dynamiques du

vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent.

Mathématiquement, la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent n'a pas d'importance pour une turbine à axe vertical. Même pour une petite éolienne tripale à axe horizontal, cette direction n'est pas prise en compte dans la modèle de la turbine éolienne car elle est réglée par la dérive sur la queue de la turbine [18].

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent, par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [18]:

$$V(t) = 8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec : } \omega = \frac{2\pi}{10}$$

La figure II.2 représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 8.2m/s.

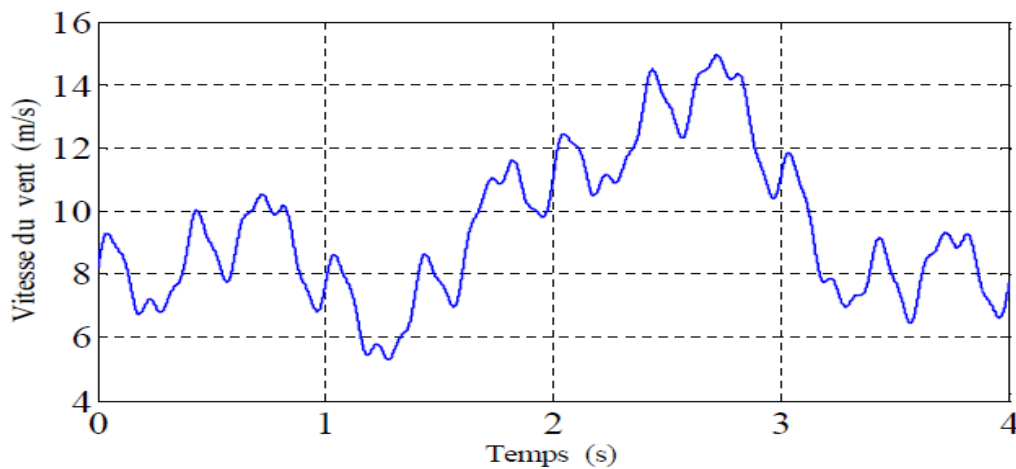


figure II.2 : Simulation du profil de la vitesse du vent.

II.3.1.2 Modèle de la turbine:

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [4]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$S = R^2 \pi \quad (\text{II.3})$$

Où:

ρ : est la densité de l'air (approximativement 1.22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C.

S : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v : est la vitesse du vent.

La puissance par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peut s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p(\lambda, \beta) * P_v = \frac{1}{2} * C_p(\lambda, \beta) * \rho S v^3 \tag{II.4}$$

$C_p(\lambda, \beta)$ est appelé le coefficient de puissance, qui exprime le rendement aérodynamique de l'éolienne. Il dépend du ratio λ , qui exprime le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β . A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW [10], l'expression du coefficient de puissance a été approchée pour ce type turbine, par l'équation suivante [19]

$$C_p = f(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{(\pi \cdot (\lambda + 0.1))}{(18.5 - 0.3(\beta - 2))} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \tag{II.5}$$

Avec :

β : angle d'orientation des pales.

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

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{v} \tag{II.6}$$

Où Ω_t : est la vitesse mécanique de rotation de l'aérogénérateur en [rad/s].

R : le rayon de la turbine éolienne en [m].

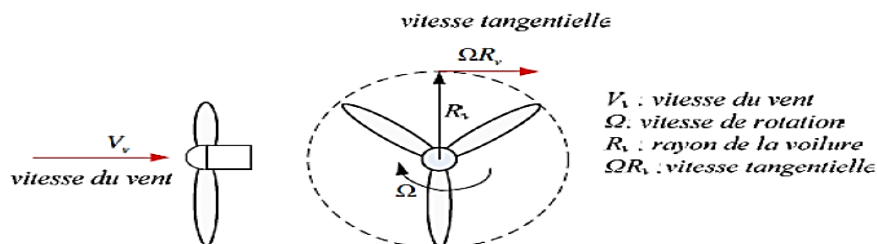


figure II.3 : Vitesse du vent v et vitesse tangentielle ΩR_t [18]

Le graphique de la figure (II.4) donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite pour différents types d'éoliennes [18]

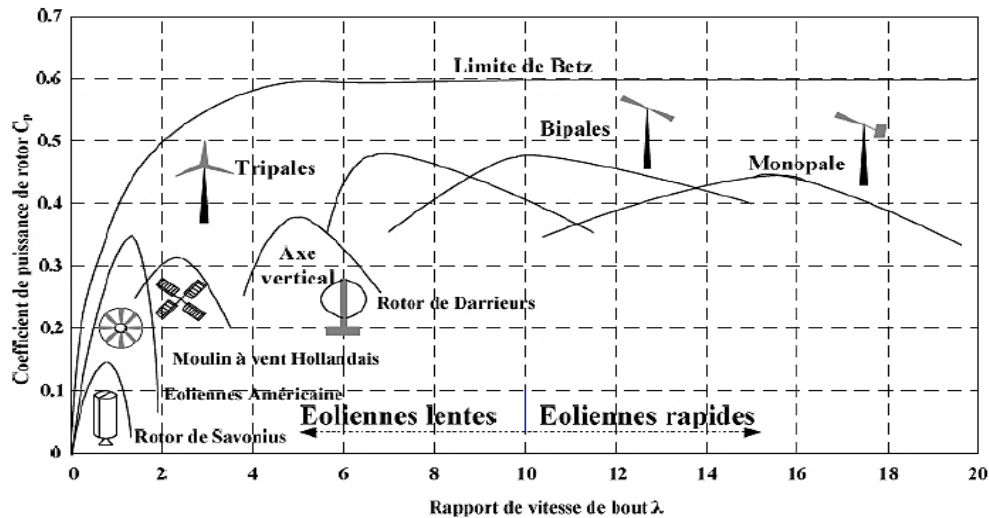


figure II.4 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure II.4) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure II.4) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s[18].

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

$$C_{aer} = \frac{P_{\text{éolienne}}}{\Omega} \quad (\text{II.7})$$

II.4 Modélisation de la partie mécanique d'un système éolien:

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement, tournant à une vitesse Ω , relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique Figure(II.5) [20].

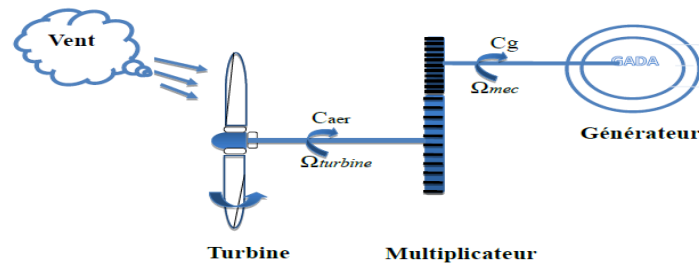


figure II.5 : Schéma de la turbine éolienne [21].

II.4.1 Modèle du multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$, assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g [7].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes:

$$\Omega_{mec} = G\Omega \quad (II.8)$$

Où, Ω_{mec} : est la vitesse mécanique du générateur (rad/s).

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.9)$$

Où,

G : est le rapport de multiplication et C_{mec} est le couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

II.4.2 Equation dynamique de l'arbre:

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{aer} - f\Omega_{mec} \quad (II.10)$$

f : coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).

Couple totale d'une éolienne:

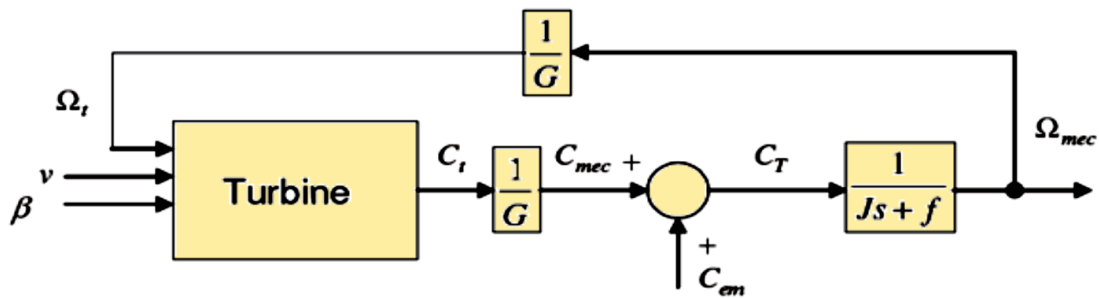
$$C_{aer} = C_{mec} + C_{em} \tag{II.11}$$

Avec :

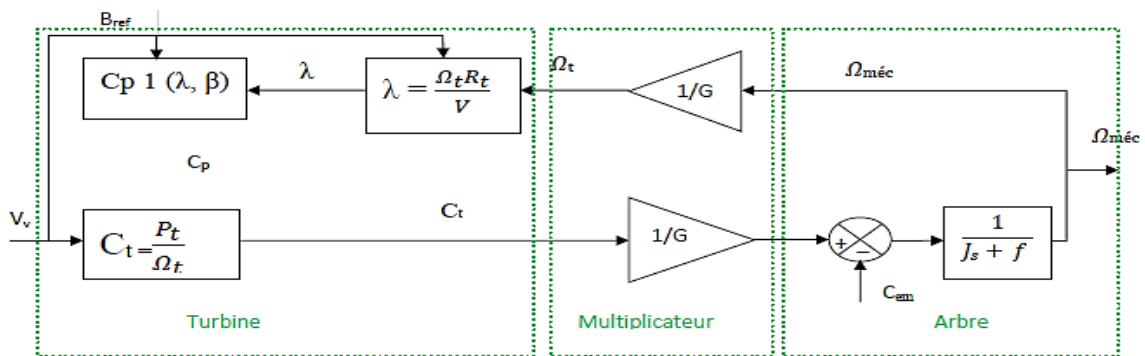
J : Inertie en (kg.m²).

C_{em}: couple électromagnétique du générateur en (N.m)

Le schéma de la figure (II.6) représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.



(a) :Schéma simplifié[11]



(b):Schéma bloc

figure II.6 :Modèle de l'arbre et de la turbine.

II.5 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA

II.5.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La première apparition de la machine asynchrone à double alimentation, date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation, [17]. Appelée DFIG (Doubly Fed Induction Générateur) lorsqu'elle est utilisée en génératrice dans la production d'énergie éolienne, ou DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable, elle peut être qualifiée en

français de Machine Asynchrone à Double Alimentation (GADA). Le schéma de la figure (II.7) représente le symbole d'une GADA, [18].

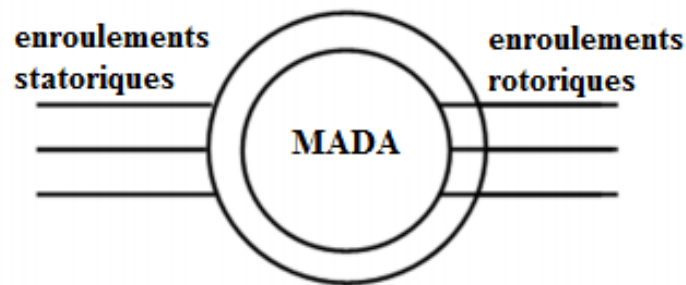


figure II.7 :Symbole d'une Machine Asynchrone Double Alimentation

II.5.2 Modélisation et fonctionnement de la GADA:

Comme tous les systèmes physiques qui nécessitent une modélisation, celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. La machine asynchrone à double alimentation (GADA) présente un stator triphasé Identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible via des collecteurs comme la montre la figure(II.8) ci-dessous

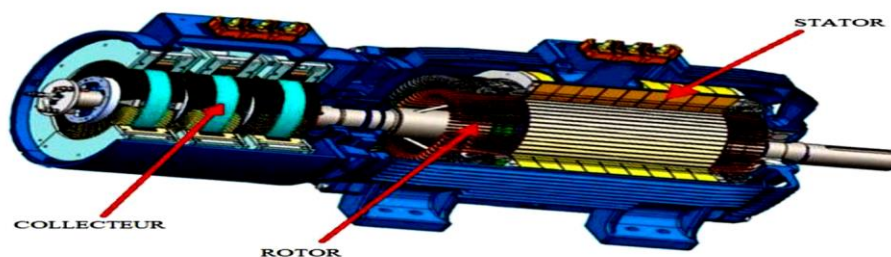


figure II.8 : Représentation schématique d'une GADA.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence.

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisé car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [22].

II.5.2.1 Hypothèses simplificatrices:

La modélisation de la GADA, est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Entrefer constant
- Effet des encoches négligée
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer
- Influences de l'effet de peau et de l'échauffement non prises en compte
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante
- Pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté.

Ces choix signifient entre autres que les flux sont additifs, que les inductances propres sont constantes et qu'il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.5.2.2 Modèle triphasé de la GADA:

La machine asynchrone est représentée sur la figure (II.9) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle θ repère le décalage de l'axe de la phase rotorique (Oa_R) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique (Oa_S).[15]

- Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120° .

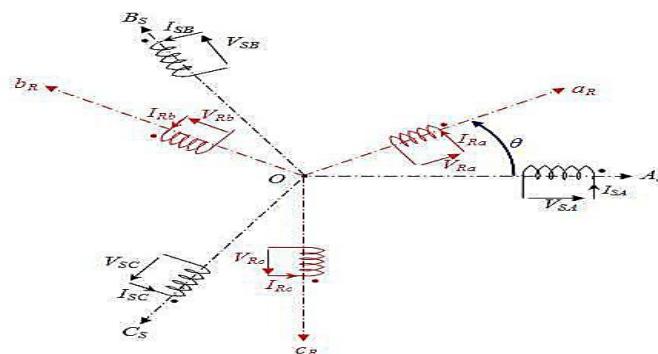


figure II.9 : Représentation spatiale de la GADA dans le système triphasé.[15]

✓ Équations électriques:

En vertu de la loi de Faraday, nous pouvons écrire :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Au rotor:

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec:

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}; \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

✓ Équations magnétiques :

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes:

$$\begin{bmatrix} [\varphi_s] \\ [\varphi_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Tel que :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$[M_{rs}]^t = [M_{sr}] = [M] = M_{sr} * \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos\theta & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

l_s, l_r: Inductance propre d'une phase statorique et rotorique.

M_s, M_r : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

[Ls] : matrice d'inductances statoriques.

[Lr] : matrice d'inductances rotoriques.

[Msr] : matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor.

[Mrs] : matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor

θ : l'angle repère de l'axe d'une phase rotorique par rapport à l'axe fixe de la phase statorique

✓ **Équation mécanique :**

L'équation mécanique de la machine fait liaison entre la partie mécanique et la partie électromécanique de la machine telle que :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \tag{II.20}$$

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique .

C_r : Le couple résistant.

f_r : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

J : L'inertie des parties tournantes.

On note l'équation du couple électromagnétique de la machine asynchrone dans le plan 'abc' :

$$C_{em} = P \cdot [C_{em}]^t \cdot \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \tag{II.21}$$

Au regard de ces résultats, nous pouvons noter, d'une part que l'ordre du système est important, et d'autre part sa complexité. En effet, nous aboutissons à un ensemble de huit équations, six de nature électrique et deux pour le couple électromagnétique, dont certaines font apparaître des coefficients qui varient avec l'angle θ , et donc avec le temps.

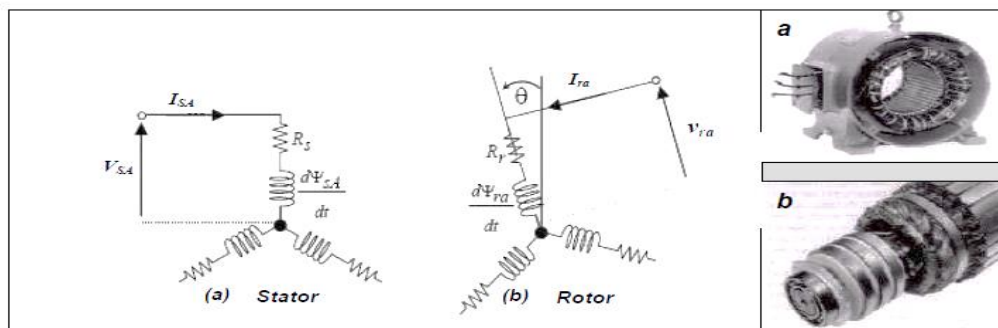


figure II.10 :Modèle dynamique dans une GADA à trois axes.

II.5.2.3 Modèle biphasé de la GADA:

Le modèle de la GADA dans le référentiel (abc) étant fort complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. Le but des transformations matricielles est de le simplifier, cette simplification doit réduire l'ordre du système et éliminer la dépendance avec la position du rotor, c'est-à-dire obtenir un modèle caractérisé par un système d'équation à coefficients constant.[17]

Le tableau suivant représente la transformation de Clark et de Concordia: [17]

	Transformation de Concordia	Transformation de Clark
triphasé	$[X_{\alpha\beta}] = [CO] \cdot [X_{ABC}]$	$[X_{\alpha\beta}] = [CL] \cdot [X_{ABC}]$
Biphasé	$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix}$
triphasé biphasé	$[X_{ABC}] = [CO]^{-1} [X_{\alpha\beta}]$ $\begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix}$	$[X_{ABC}] = [CL]^{-1} [X_{\alpha\beta}]$ $\begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix}$

Tableau II.1: Représentation abc - αβ et inversement.

II.5.2.3.1 Passage de triphasé au biphasé (Transformation de Park):

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (αβ), puis vers le repère (dq).

Le repère (αβ) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe (αβ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [23].

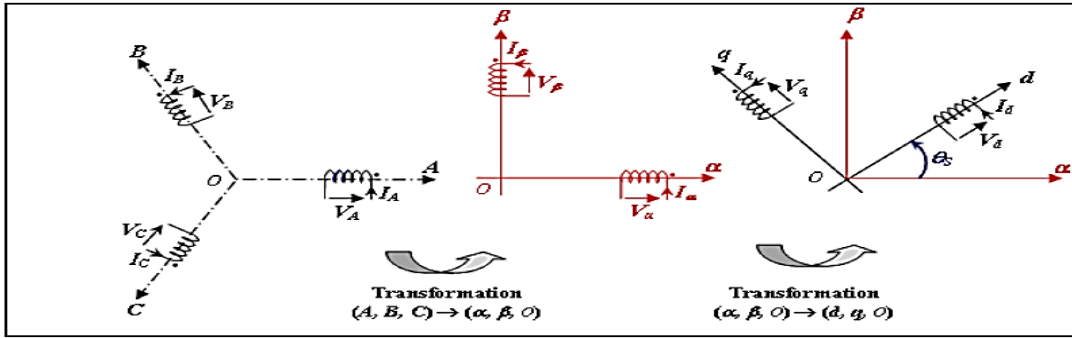


figure II.11 : Décomposition de la transformation de Park.

La transformée de Park permet de réduire la complexité des systèmes d'équations (II.15), (II.16). Elle consiste à remplacer les trois phases statoriques et rotoriques du système triphasé par un système diphasé $(d, q, 0)$ constitué des grandeurs équivalentes d'axe d et q et une composante homopolaire (0) qui n'est pas pris en compte dans le modèle de la machine.

Une matrice $P(\theta)$ de PARK permet le passage des composantes x_{abc} du système triphasé aux composantes $x_{d,q}$ du système biphasé, ce système tourne à une vitesse qui dépend des grandeurs statoriques ou rotoriques.

Pour: $\theta = \theta_s$

D'où :

θ_s est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant (d, q) par rapport à la bobine diphasée équivalente du stator notée S_A . θ_r est la position angulaire relative de l'axe d du repère tournant par rapport à la bobine diphasée équivalente du rotor notée R_a et θ_{sl} appelée angle de glissement.

Les vitesses angulaires de rotation sont obtenues telles que :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_{sl}}{dt} = \omega_{sl} \\ \omega_s = \omega_{sl} + \omega_r \end{cases} \tag{II.22}$$

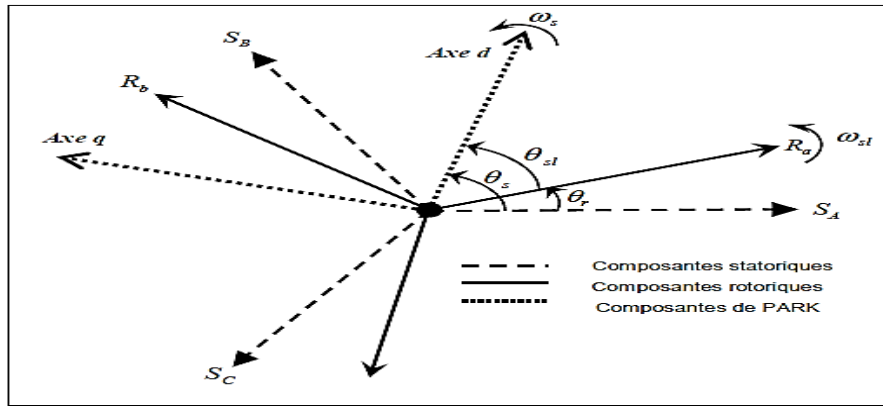


figure II.12 : Repère de PARK.

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

II.5.2.3.2 Application de la transformation de PARK :

En appliquant la transformation de Park et en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment.

A partir des équations du modèle MAS triphasée

$$[V_{sa}, b, c] = [R_s][I_{sa}, b, c] + \frac{d\varphi_{sa,b,c}}{dt} \quad (\text{II.25})$$

$$[P(\theta)]^{-1}[V_{sd}, q, 0] = [R_s][P(\theta)]^{-1}[I_{sd}, q, 0] + \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1}[\varphi_{sd}, q, 0] \quad (\text{II.26})$$

On multiplie l'équation par $[P(\theta)]$

$$[P(\theta)][P(\theta)]^{-1}[V_{sd}, q, 0] = [P(\theta)][R_s][P(\theta)]^{-1}[I_{sd}, q, 0] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1}[\varphi_{sd}, q, 0] \quad (\text{II.27})$$

$$[V_{sd}, q, 0] = [R_s][I_{sd}, q, 0] + [P(\theta)] \left[[P(\theta)]^{-1} \frac{d[\varphi_{sd}, q, 0]}{dt} + \varphi_{sd}, q, 0 \frac{d[P(\theta)]}{dt} \right] \quad (\text{II.28})$$

Tell que :

$$R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

On donne :

$$[P(\theta)] \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} = \frac{d\varphi}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

• **Equation électriques :**

En remplaçant la relation (II.30) dans (II.28) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

• **Relation flux courant:**

Nous appliquons la transformation de Park aux équations de flux et de courants (II-33) (II-34), nous trouvons les relations électromagnétiques de la machine généralisée:

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Ou:

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{rd} \\ I_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{rq} \\ I_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \varphi_{rd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{sd} \\ I_{rq} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{rq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Après la simplification on trouve :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{1}{L_s} (\varphi_{sd} - M \cdot I_{rd}) \\ I_{sq} = \frac{1}{L_s} (\varphi_{sq} - M \cdot I_{rq}) \\ \varphi_{rd} = \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} + \sigma L_r I_{rd} \\ \varphi_{rq} = \frac{M}{L_s} \varphi_{sq} + \sigma L_r I_{rq} \end{cases} \quad (II.35)$$

Où :

L_s : inductance propre cyclique du stator,

L_r : inductance propre cyclique du rotor,

M : inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: coefficient de disposition de Blandel

- **Equation mécanique :**

Afin d'obtenir le modèle complet de la machine asynchrone doublement alimentée, il faut qu'on tienne compte de l'équation mécanique. En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad \text{on } \Omega = \frac{\omega}{p} \quad (II.36)$$

Où :

J : moment d'inertie des parties tournantes (du moteur avec la charge) ;

C_r : couple résistant ;

C_f : couple de frottement

Le couple de frottement est donné par :

$$C_f = \frac{f_r}{p} \omega_r = f_r \Omega \quad (II.37)$$

Avec :

f_r : Coefficient de frottement visqueux.

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \left(\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} \right) = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) - C_r - f_r \Omega \quad (II.38)$$

- **Puissances statoriques :**

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

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sd} - V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (II.39)$$

II.5.2.4 Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe [24].

A partir du système d'axe (d,q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles .

A) Référentiel lié au stator :

$$\left(\begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{\varphi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{\varphi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{\varphi_{rd}}{dt} + \omega \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{\varphi_{rq}}{dt} - \omega \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.40})$$

B) Référentiel lié au rotor:

$$\left(\begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{\varphi_{rd}}{dt} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{\varphi_{rq}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.41})$$

C) Référentiel lié au champ tournant:

Il permet correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent.

$$\left(\begin{array}{l} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \end{array} \right) \left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (\text{II.42})$$

II.6 Modèle de la machine en représentation d'état :

La représentation d'état de la GADA dépend du repère et du choix des variables d'état pour les équations électriques. On écrit les équations dans le repère (d , q) car c'est la solution la plus générale[25]

Le choix des variables d'état, dépend des objectifs soit pour la commande soit pour l'observation, pour le modèle complet $e C$ est un variable d'état, pour les quatre variables électriques, notre choix pour la modélisation est le vecteur d'état suivant: $\left[I_{sd} I_{sq} \varphi_{rd} \varphi_{rq} \right]^T$.

Remarque :

Cette représentation d'état n'est pas unique pour la GADA. Nous pouvons envisager un vecteur d'état formé des flux au stator et des courants au rotor, des quatre courants au stator ou au rotor ou même des quatre flux au stator ou au rotor et aucune des représentations ne présente un avantage particulier par rapport aux autres [25].

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rd} - \frac{M}{L_r} I_{sd} \\ I_{rq} = \frac{1}{L_r} \varphi_{rq} - \frac{M}{L_r} I_{sq} \\ \varphi_{sd} = L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

En remplaçant φ_{sd} et φ_{sq} en fonction de φ_{rd} et φ_{rq} dans le système (II.25), on aboutit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{dI_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - w_s \left[L_s \sigma I_{sq} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rq} \right] \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{dI_{sq}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + w_s \left[L_s \sigma I_{sd} + \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} \right] \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \varphi_{rd} = -R_r I_{rd} + (w_s - w_r) \varphi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = -R_r I_{rq} + (w_s - w_r) \varphi_{rd} + V_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

On écrit le modèle de la machine utilisée pour la commande sous forme d'un système d'équations d'état:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Avec :

X : vecteur d'état du système,

A : matrice d'état du système,

B : matrice de commande,

U : vecteur de commande $[V_{sd} V_{sq} V_{rd} V_{rq}]^T$

Y : vecteur de sortie,

C : matrice d'observation

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda & \omega_s & \frac{K}{T_r} & \omega_r K \\ -\omega_s & -\lambda & -\omega_r K & \frac{K}{T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -\omega_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (II.47)$$

Avec :

$$k = \frac{M}{\sigma L_r L_s} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad \lambda = \frac{1}{\sigma T_r} \quad (II.48)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & K & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & K \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.49)$$

II.7 Modélisation de l'alimentation :

L'alimentation de la machine au niveau rotorique est assurée par un ensemble redresseur, filtre RLC, et un onduleur MLI, comme il est représenté dans la figure (II-13),

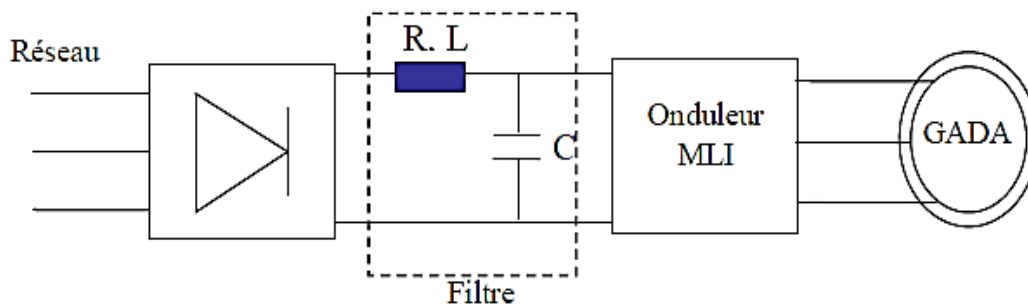


figure II.13 : l'ensemble convertisseur machine.

II.7.1 Modélisation du redresseur triphasé à diodes :

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif et il est représenté par la figure (II.9)[18]

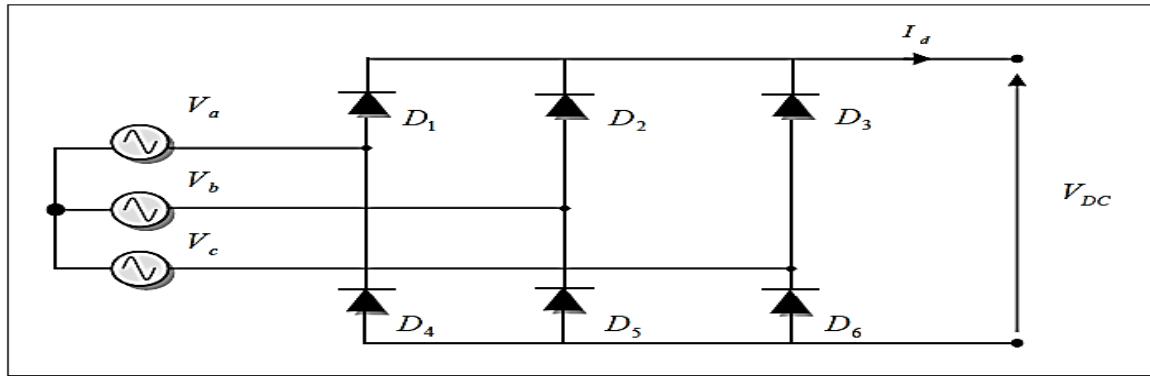


figure II.14 : Représentation du redresseur triphasé à diodes.[18]

Ce redresseur comporte trois diodes (D_1 , D_2 , D_3) à cathode commune assurant l'allée du courant I_d et trois diodes (D_4 , D_5 , D_6) à anode commune assurant le retour du courant I_d . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension : [18]

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c(t) = V_m \sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.50)$$

Et si on néglige l'effet d'empieusement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suite :

$$V_{red}(t) = \text{Max}[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] - \text{Min}[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] \quad (II.51)$$

Cette tension est représentée par la figure (II.15).

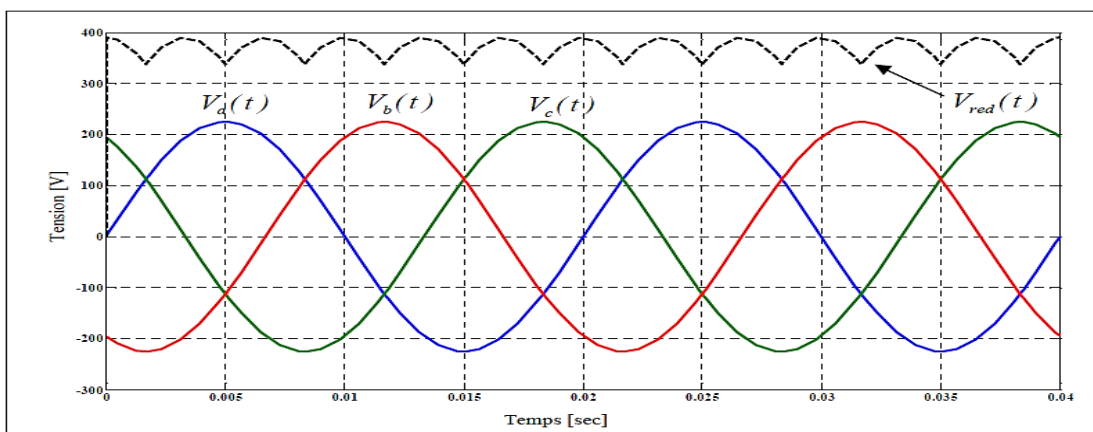


figure II.15 : Représentation de la tension de sortie du redresseur.[18]

II.7.2 : Modélisation du filtre:

On utilise un filtre passe bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences. Ce filtre est schématisé par la figure (II.16)[18]

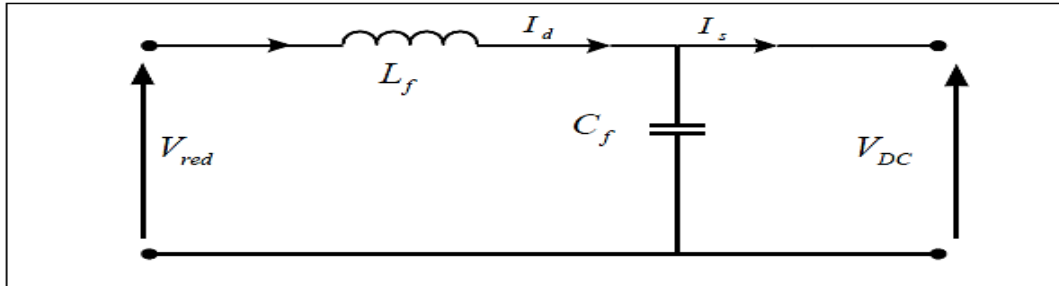


figure II.16 : Représentation du filtre passe –bas.[18]

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{V_{red} - V_{DC}}{L_f} \\ \frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{I_d - I_s}{C_f} \end{cases} \quad (II.52)$$

Calcul des paramètres du filtre :

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(p) = \frac{V_{DC}(p)}{V_{red}(p)} = \frac{1}{L_f C_f p^2 + 1} \quad (II.53)$$

Où p est l'opérateur de LAPLACE.

Cette fonction de transfert est de deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (II.54)$$

Pour éliminer l'harmonique d'ordre deux et les harmoniques supérieures, on doit imposer le choix suivant :

$$f_c < 2 \cdot f'$$

avec $f' = 6 \cdot f$: fréquence de la tension redresse V_{red}

Alors :

$$L_f \cdot C_f > 2.78 \cdot 10^{-6}$$

On choisit $C_f = 600 \mu F$

D'où, nous déduisons les paramètres de filtre : $L_f = 400 mH$; $C_f = 600 \mu F$

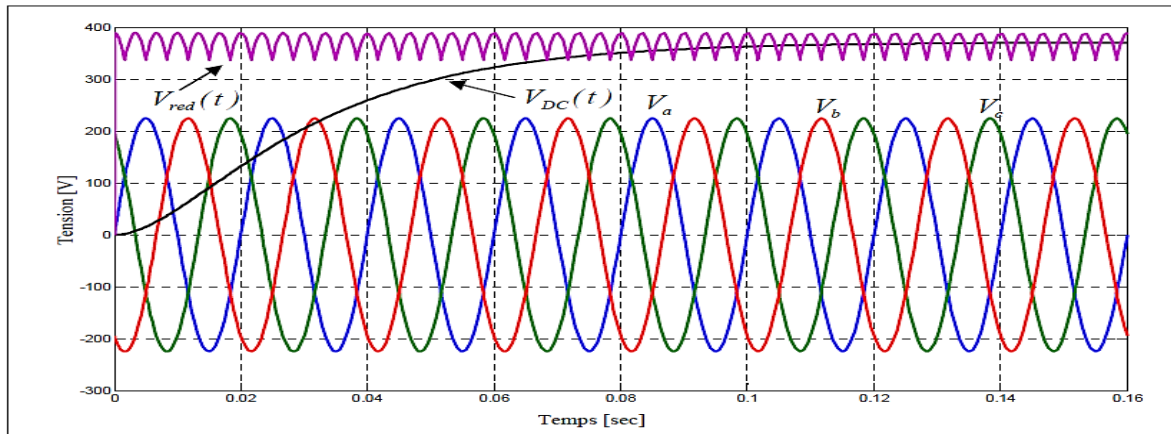


figure II.17 : Tension redressée et filtrée à l'entrée de l'onduleur rotorique.[18]

II.7.3 Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI:

II.7.3.1 Définition d'un onduleur :

Un onduleur qui est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. figure(II.18) [26]

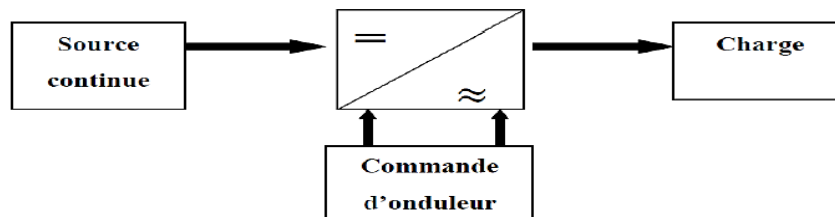


figure II.18 : Synoptique d'une conversion continu- alternatif.[26]

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué des cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor GTO pour les grandes puissances.

Le principe de fonctionnement s'exprime par le séquençage imposé à l'interrupteur statique qui réalise la modulation de largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements rotoriques où statoriques de la machine.

Le schéma structurel des onduleurs triphasés à deux niveaux et de ses charges est illustré par la figure (II.19). Chaque IGBT – diode assemblé en parallèle forme un interrupteur bicommandable (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation par exemple K_{11} et K_{12}

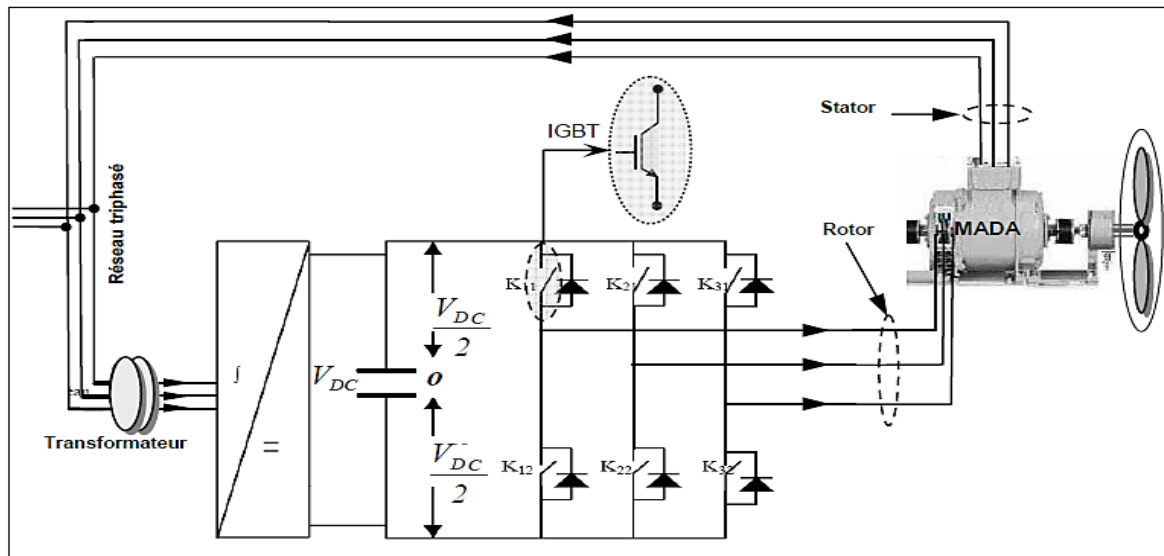


figure II.19 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une GADA

Les couples d'interrupteurs (K_{11} et K_{12}), (K_{21} et K_{22}), (K_{31} et K_{32}) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes (D_i ($i=1, 2, \dots, 6$)) sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBTs.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande $S_i(a,b,c)$:

$S_i=1$, Le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$S_i=0$,Le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phases $V_{in a,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_i :

$$U_{in a,b,c} = S_i U_{DC} - \frac{U_{DC}}{2} \tag{II.55}$$

Les trois tensions composées V_{bc} , V_{ca} et V_{ab} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif «o».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \tag{II.56}$$

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

Soit « n » le point neutre du côté alternatif (GADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

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 ».

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.58})$$

La substitution de (II.58) dans (II.57) nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.59})$$

En remplaçant (II.59) dans (I.57) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

L'utilisation de l'expression (II.55) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{v_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

par conséquent l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert T donnée par :

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

II.7.3.2 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) :

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation).

La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont: La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis[21]

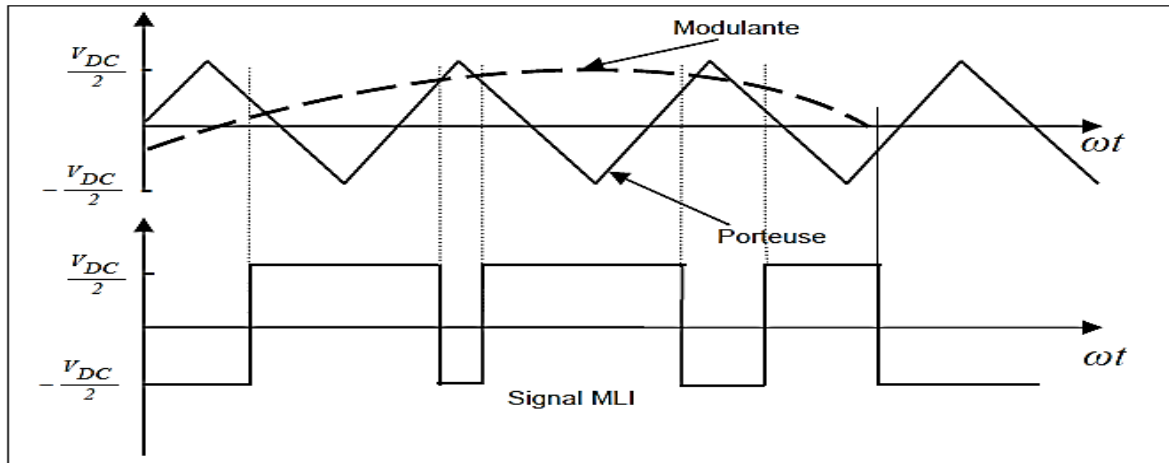


figure II.20 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique enharmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux (Figure II.20) :

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'indice d'amplitude V_{mod}

$$V_{mod} = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II.63})$$

V_p : valeur de crête de la porteuse.

V_m : valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi on peut agir sur l'indice de modulation m :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.64})$$

f_p : fréquence de la porteuse.

f_m : fréquence de la modulante.

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut exactement :

$$V_{1\max} = \frac{V_{DC}}{2} V_{\text{mod}} \quad (\text{II.65})$$

V_{DC} : La tension continue à l'entrée de l'onduleur.

II.8 Résultats de simulation:

On procède à la simulation de la turbine couplée à la génératrice et on s'intéresse aux grandeurs de sortie qui sont les puissances active et réactive à injecter sur le réseau électrique.

Les paramètres de la génératrice et de la turbine sont donnés en annexe

Le schéma bloc global du système étudié sous MATLAB/SIMULINK est donné à la figure II.21.

La turbine éolienne couplée avec la machine asynchrone à double alimentation (GADA), Le stator de la machine est connecté directement au réseau triphasé (398/690 V/ 50 Hz), le rotor alimenté par un onduleur triphasé à deux niveaux commandé par MLI

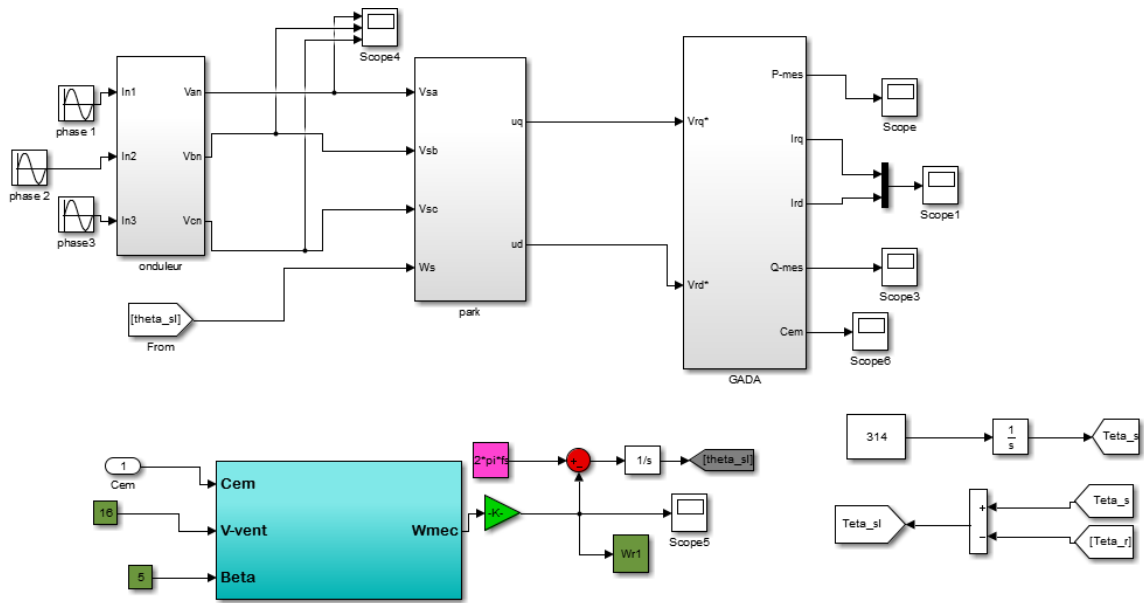


figure II.21 : Schéma globale du système éolien " Turbine + GADA".

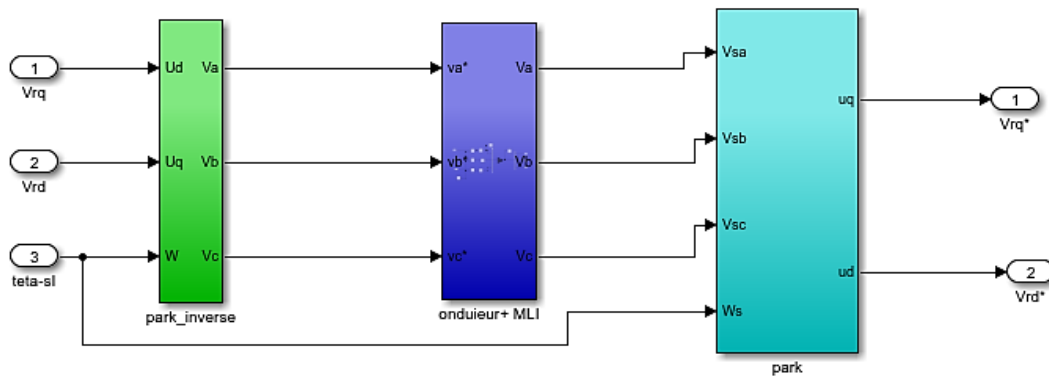


figure II.22 : Schéma block de l'onduleur

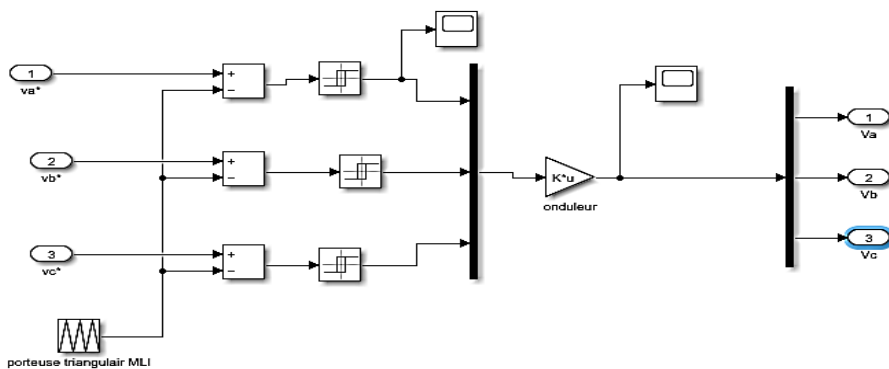


figure II.23 : Schéma block interne (sub-système)de la l'onduleur +MLI

Les résultats de la simulation numérique de l'onduleur commandé par la technique MLI triangulé-sinusoidale sont donnés à la figure II.24 (en haut la comparaison entre la porteuse et la modulante, en bas la sortie d'une phase de l'onduleur).

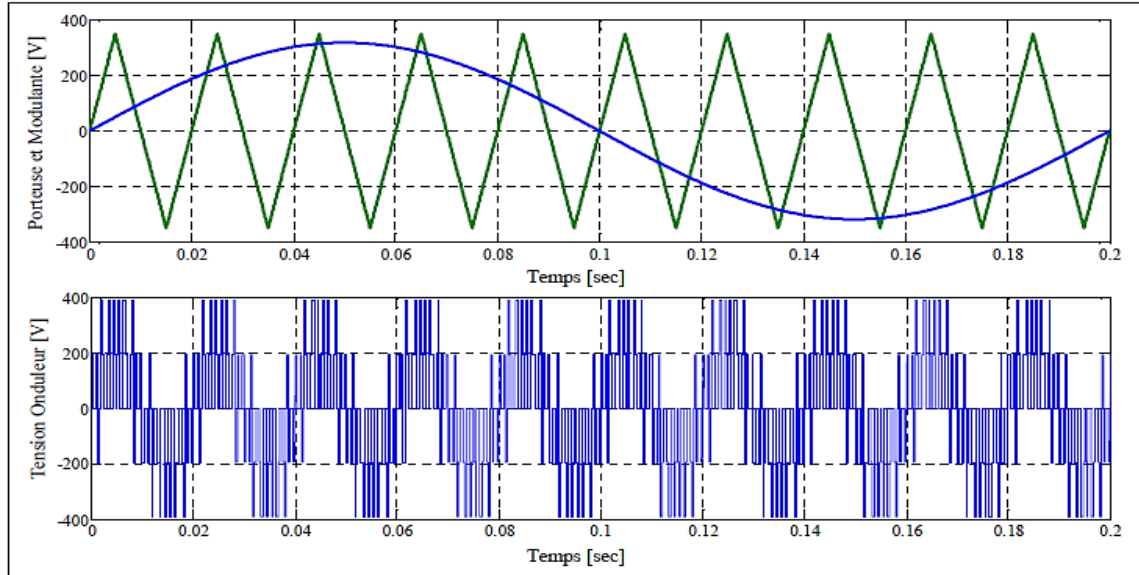


figure II.24 : Résultats de simulation de l'alimentation du rotor.

Les figures (II.25) présente les résultats de simulation de la génératrice couplée à la turbine éolienne, avec les conditions d'essai suivant :

- ❖ Vitesse du vent moyenne est de $16 \text{ m/s} = 57.6 \text{ km/h}$.
- ❖ Angle de calage des pales β est de 5° .
- ❖ Tension coté rotor est de 120V .
- ❖ Fréquence de modulation est de 5 kHz .

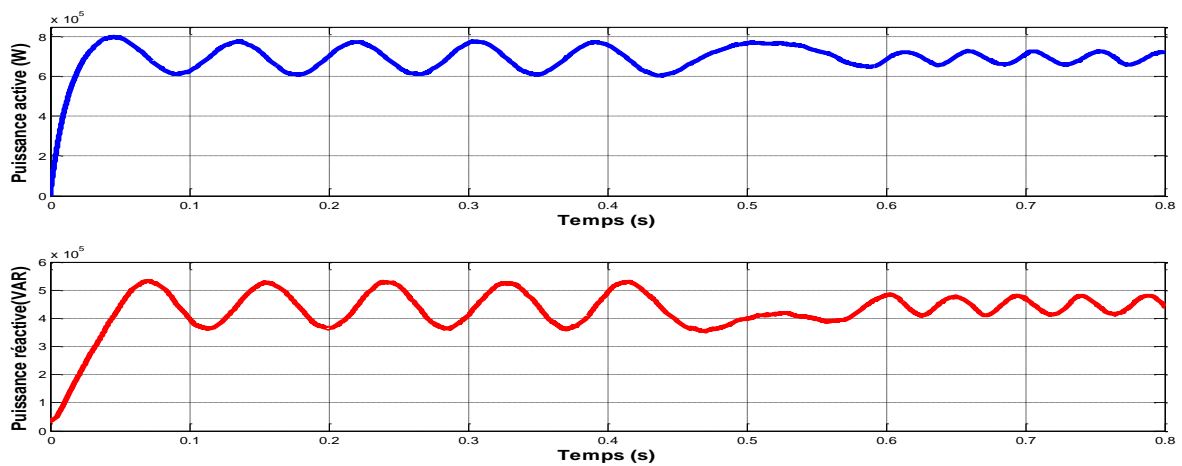


figure II.25 : Puissance Active et Réactive de la génératrice éolienne.

Les résultats de simulation obtenus montrent bien la réponse dynamique rapide de la vitesse (1 s). Cette dernière atteint une valeur légèrement supérieure au vitesse du synchronisme (163.5 rad / s) ça dépend de plusieurs paramètres, principalement à la vitesse du vent, l'angle de calage β et la tension rotorique.

II.9: Conclusion:

Ce second chapitre a été dédié à la présente le modèle de la partie mécanique (turbine, multiplicateur), puis on a modélisé les de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement en générateur. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices 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.

Chapitre III:

**Commandes linéaires des
puissances de la GADA**

III.1 Introduction :

La commande vectorielle est l'une des techniques les plus utilisées pour la commande des machines électriques. Elle repose sur une loi de commande conduisant à une caractéristique de réglage similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Le contrôle vectoriel de la GADA sera question de maîtriser les échanges d'énergie et notamment les transferts de puissances active et réactive envoyées sur le réseau. Pour le cas de ce travail, le référentiel (d, q) est calé sur le flux statorique. La commande concerne, bien entendu, les puissances renvoyées sur le réseau, donc du côté du stator (convention générateur) et par conséquent le rotor sera considéré comme un organe de commande (convention récepteur) [27].

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).

III.2 Commande vectorielle de la GADA:

III.2.1.Principe de la commande vectorielle de la GADA:

La commande par flux orienté (commande vectorielle) est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des moteurs électriques, et dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire mais très importante de l'électromagnétisme.[25]

A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et placé dans une région où règne un champ, il en résulte évidemment une force d'amplitude maximale pour des intensités de courant et de champ données quand le vecteur courant devient perpendiculaire au vecteur champ.[25]

Appliquée au moteur électrique, cette propriété est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

Si le principe est naturellement appliqué pour les MCC, ce n'est pas pour les machines à courant alternatif. Par conséquent, le contrôle par flux orienté des machines à courant alternatif est une commande de ces deux grandeurs.[25]

La figure (III.1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machines à courant continu et la commande Vectorielle d'un GADA.

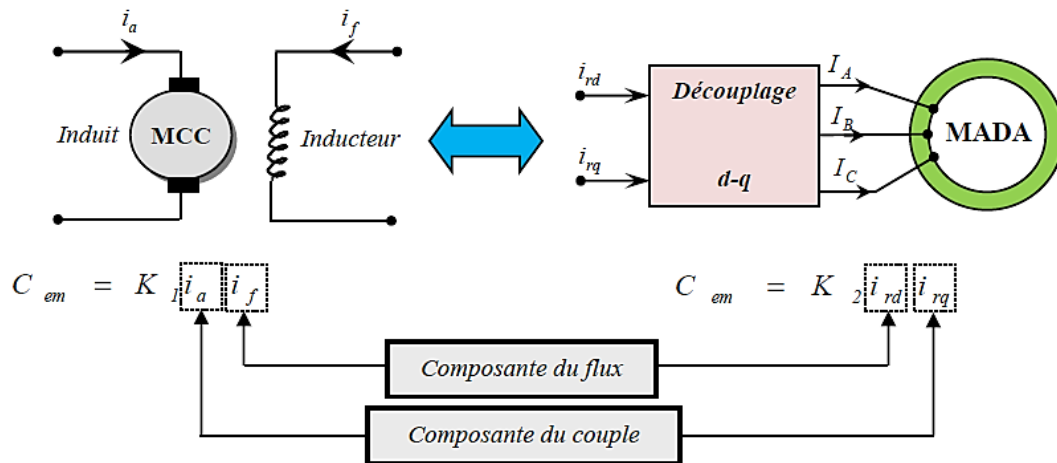


Figure III.1: Schéma de principe du découplage de la GADA par analogie avec la machine à courant continu.[18].

De nombreuses variétés ont été présentes dans les littérateurs, que l'on peut classifier suivant la source d'énergie :

- Commande en tension
- Commande en courant

Suivant l'orientation du repère:

- Le flux rotorique
- Le flux statoriques
- Le flux d'entrefer

Suivant la détermination de la position du flux:

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase) ;
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement ;

L'examen de l'expression du couple de la machine montre qu'elle résulte d'une différence de deux composantes en quadrature du courant statorique et de flux rotorique qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine .Le référentiel de travail pour la commande est celui lié au champ tournant afin que l'axe (d) coïncide avec la direction désiré du flux, qui peut être rotorique, statorique, ou d'entrefer. Ainsi il est possible d'orienter les différents flux de la machine[28]

Le flux résultant φ peut être soit :

- Le flux statorique avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{sd} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{sq} = 0 \quad (\text{III.1})$$

- Le flux rotorique avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{rd} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{rq} = 0 \quad (\text{III.2})$$

- Le flux d'entrefer avec les conditions :

$$\varphi = \varphi_{gd} = \varphi_g \text{ et } \varphi_{gq} = 0 \quad (\text{III.3})$$

III.2.2. Les types de la commande vectorielle :

il ya deux méthode :

III.2.2.1. La commande vectorielle directe :

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 active et réactive. Cette méthode sera appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

Cette méthode de 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.

l'avantage de prendre beaucoup moins ou dépend moins les variations de paramètres de la machine [28]. 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 des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [25]

III.2.2.2. La commande vectorielle indirecte :

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 appelée *méthode 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 [29].[30]

III.2.3. Stratégie de commande en puissance active et réactive de la GADA:

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'intérêt de l'utilisation de la GADA outre la taille du convertisseur, était de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne [31], [32]. Cette caractéristique montre que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale (correspondant à la valeur maximale du coefficient de puissance) permettant à l'éolienne d'avoir le meilleur rendement possible. Pour pouvoir tourner à cette vitesse optimale; à vitesse de vent donné, la turbine doit avoir un couple mécanique résistant donné, c'est à dire une puissance active débitée par la GADA. C'est en utilisant cette référence de puissance que la machine peut alors être commandée.

III.2.3.1. Relations entre courants statoriques et courants rotoriques:

Dans ce paragraphe, nous considérons que la GADA fonctionne en mode hyper-synchrone, ce qui permet un transfert optimal de puissance en utilisant la commande vectorielle directe avec orientation du flux statorique. A cet effet nous allons, donc déterminer les équations qui lient les puissances actives et réactives statoriques aux grandeurs rotoriques sur lesquelles nous agissons pour commander la machine.

Il s'agit d'obtenir un certain découplage entre le stator et le rotor afin que l'expression du couple soit similaire à celle du couple de la machine à courant continu. Le principe consiste à orienter le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant (Figure III.2).

On a donc : $\varphi_{sq} = 0$ et par suite $\varphi_{sd} = \varphi_s$

Dans l'hypothèse où le flux φ_{sd} est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator), le choix de ce repère rend le couple électromagnétique

produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q .

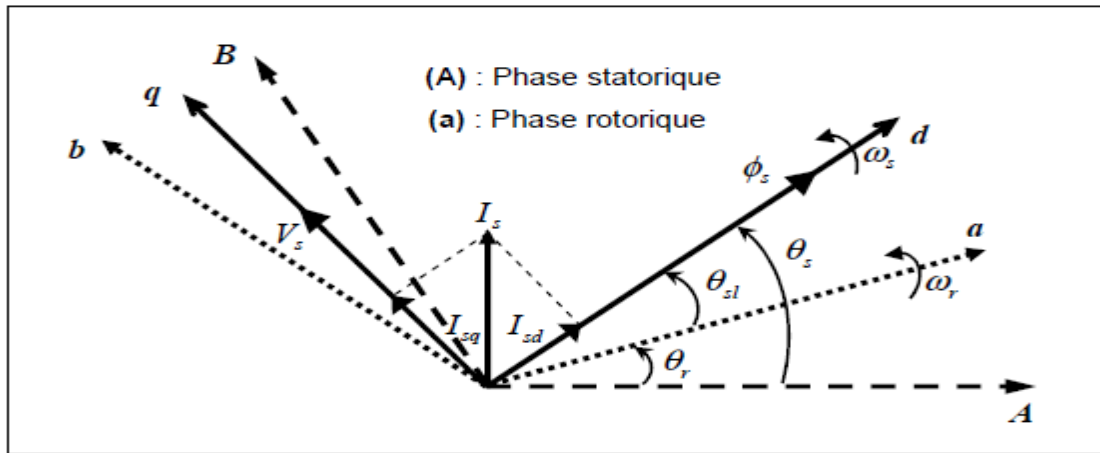


Figure III.2: Orientation du flux statorique sur l'axe d.

Nous allons donc nous contenter de rappeler le modèle diphasé de la machine asynchrone dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant que nous comptons utiliser par la suite pour la commande de la GADA:

- **Equations des tensions:**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

- **Equations des flux :**

$$\begin{cases} \varphi_{sdq} = L_s I_{sdq} + L_m I_{rdq} \\ \varphi_{rdq} = L_r I_{rdq} + L_m I_{sdq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned} C_{mec} &= -\frac{3}{2} \cdot p \cdot (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot (\varphi_{rq} I_{rd} - \varphi_{rd} I_{rq}) \\ &= C_r + J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques on vérifie que:

$$\begin{aligned} C_{mec} = C_e &= -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \\ &= -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

On appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine les équations (III.4), (III.5) et (III.7) deviennent:

$$C_e = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq}) \quad (\text{III.8})$$

Rappelons que ce couple représente une perturbation pour la turbine éolienne et prend une valeur négative.

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

A partir de l'équation (III.10), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

III.2.3.2. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques:

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

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{sd} = 0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (III.11) dans l'équation (III.13) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \frac{\varphi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (III.9), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{rd} \quad (III.15)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante L_m comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $(\frac{V_s^2}{\omega_s L_s})$ près imposée par le réseau.

III.2.3.3. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques:

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (III.5) les valeurs des courants statoriques de l'équation (III.11) et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (III.4). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt} I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + g_s \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.16)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [23]:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + g_s \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.17)$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche le terme $(g \frac{L_m V_s}{L_s})$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [23][29].

Les équations (III.13), (III.14) et (III.16) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la GADA à réguler (Figure III.3).

Les termes de couplage sont désignés par V_2 , V_3 et les f.e.m's par V_1 et V_4 .

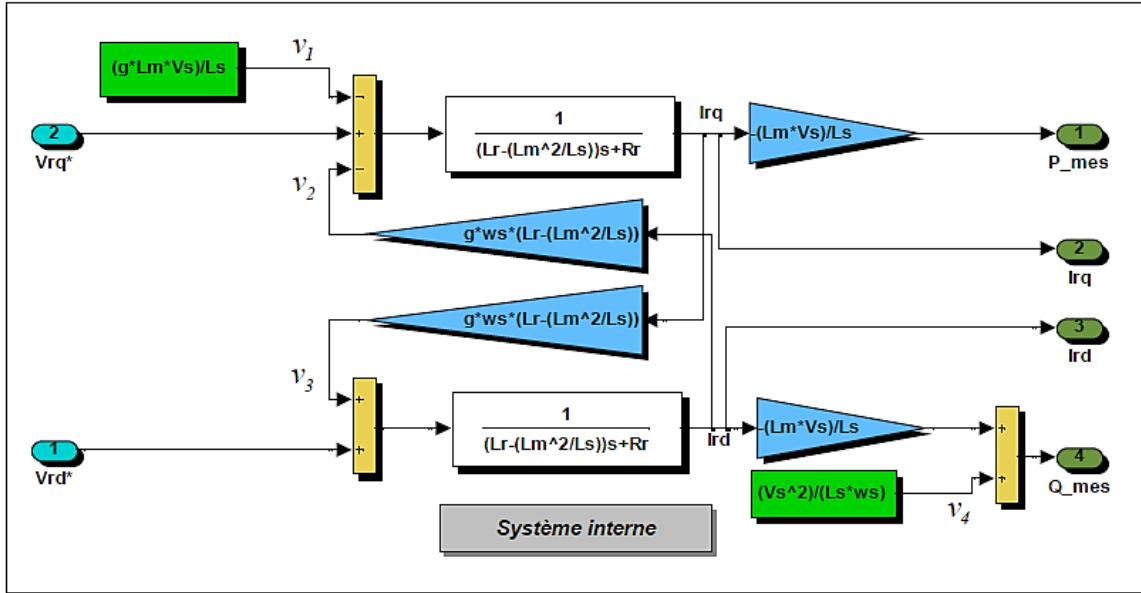


Figure III.3: Schéma bloc du système à réguler.

III.2.4. La commande vectorielle en puissance statorique du système éolien basée sur un régulateur PI

III.2.4.1 Commande vectorielle indirecte :

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [5]. 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 GADA. 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 :

$$\begin{cases} V_{rd} = g\omega_s \frac{(L_r M^2)}{L_s V_s M} * p - \left(\frac{R_r + (L_r \frac{M^2}{L_s})}{\frac{V_s M}{L_s}} * Q + \left(\frac{R_r V_s}{\omega_s M} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \frac{V_s}{\omega_s M} \right) \\ V_{rq} = - \left(R_r + \frac{(L_r M^2)}{L_s} \right) p - \left(\frac{g\omega_s + (L_r \frac{M^2}{L_s})}{\frac{V_s M}{L_s}} * Q + \left(g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right) \frac{V_s}{\omega_s M} \right) \end{cases} \quad (III.18)$$

III.2.4.2 Commande en boucle ouverte (sans boucle de puissance):

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 :

$$\begin{cases} I_{rq-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} * p_{s-ref} \\ I_{rd-ref} = -\frac{L_s}{MV_s} * Q_{s-ref} + \frac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \quad (III.19)$$

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 [33].

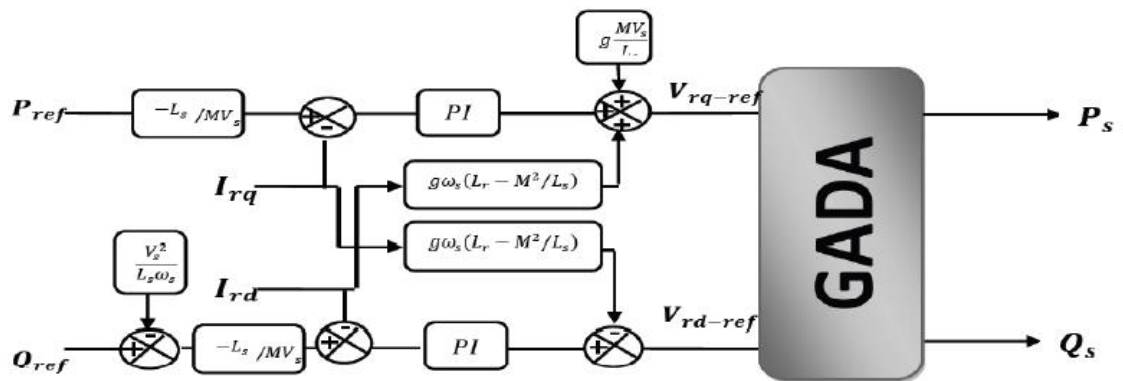


Figure III.4: Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de puissance (en boucle ouverte) [6].

III.2.4.3 Commande avec boucle de puissance:

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 Q_s et P_s en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande est illustré sur la figure III.5

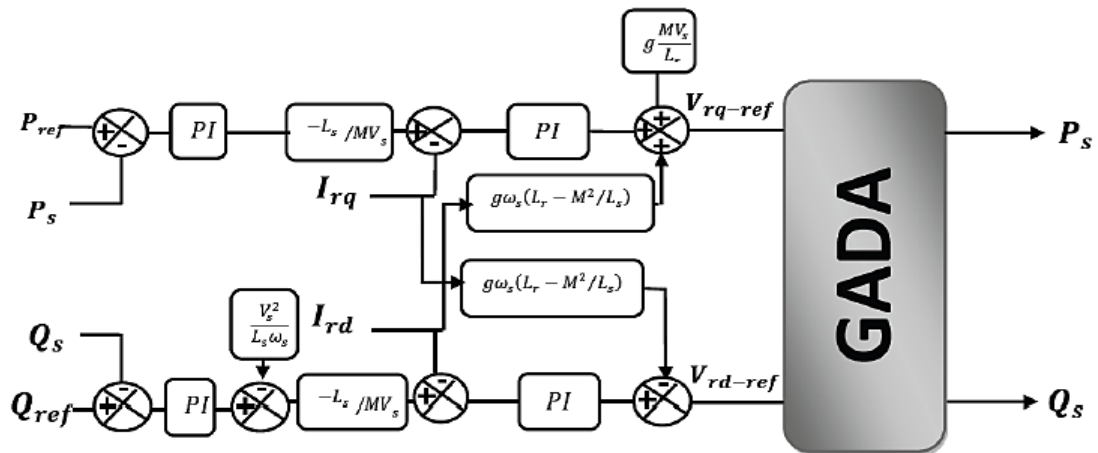


Figure III.5: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance [4].

III.2.5. Calcul des régulateurs:

Le schéma de la figure (III.3) montre une partie de notre système bouclé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme $k_p + \frac{k_i}{p}$. Correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure(III.6).

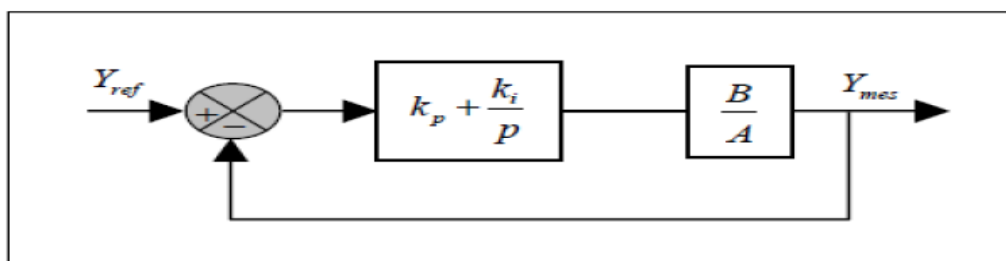


Figure III.6: Schéma bloc de régulateur PI [34]

Pour les axes d et q , la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{L_m V_s}{L_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}} \quad (III.20)$$

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

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)} \quad (\text{III.21})$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation des pôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains k_p et k_i sont établies en fonction de ces mêmes paramètres. Si les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace. Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$\text{FTBO} = \frac{k_p \frac{L_m V_s}{L_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}}{p} \quad (\text{III.22})$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$\text{FTBF} = \frac{1}{1 + p \tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{L_m V_s} \quad (\text{III.23})$$

III.2.6. Résultats de simulation de la commande indirecte du GADA :

La simulation de la machine, de la partie électrique et de la commande indirecte a été implantée dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin d'effectuer de tests de la régulation. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation.

La comparaison sera basée sur les performances et les caractéristiques dynamiques et statiques de commande indirecte. Chaque série d'essais sera suivie de consigne, sensibilité aux perturbations et robustesse. Ceci dans le but d'évaluer l'influence de la commande à choisir sur les performances dynamiques et statiques du système. Ce qui conduira à priori de prévoir les avantages et les inconvénients inhérents à l'emploi de telle ou telle méthode de commande.

Donc, le but attendu est d'évaluer la méthode qui répond mieux aux exigences telle que :

- Meilleure réponse du système sans dépassement ;
- Erreur statique minimale avec bon rejet de perturbation ;

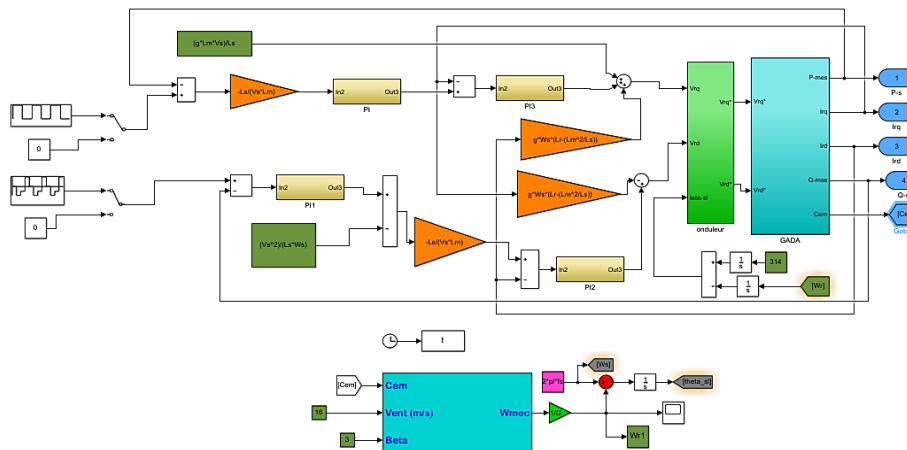


Figure III.7: Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance.

Les gains des correcteurs sont calculés pour la puissance active et réactive sont respectivement : $k_p = \frac{1}{10^{-3}} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m V_s} = 75.75 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ et } k_i = \frac{1}{10^{-3}} \frac{L_s R_r}{L_m V_s} = 5354.5510^{-2} \text{ s}^{-1}$ ainsi pour les régulateurs de courants rotoriques sont respectivement : $k_p = 75.75 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et $k_i = 5354.55 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

- **Sans prise en compte de l'onduleur**

La figure (III.8) présente les résultats de simulation de la commande indirecte de la génératrice asynchrone à double alimentation sans onduleur.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement, les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle de la machine.

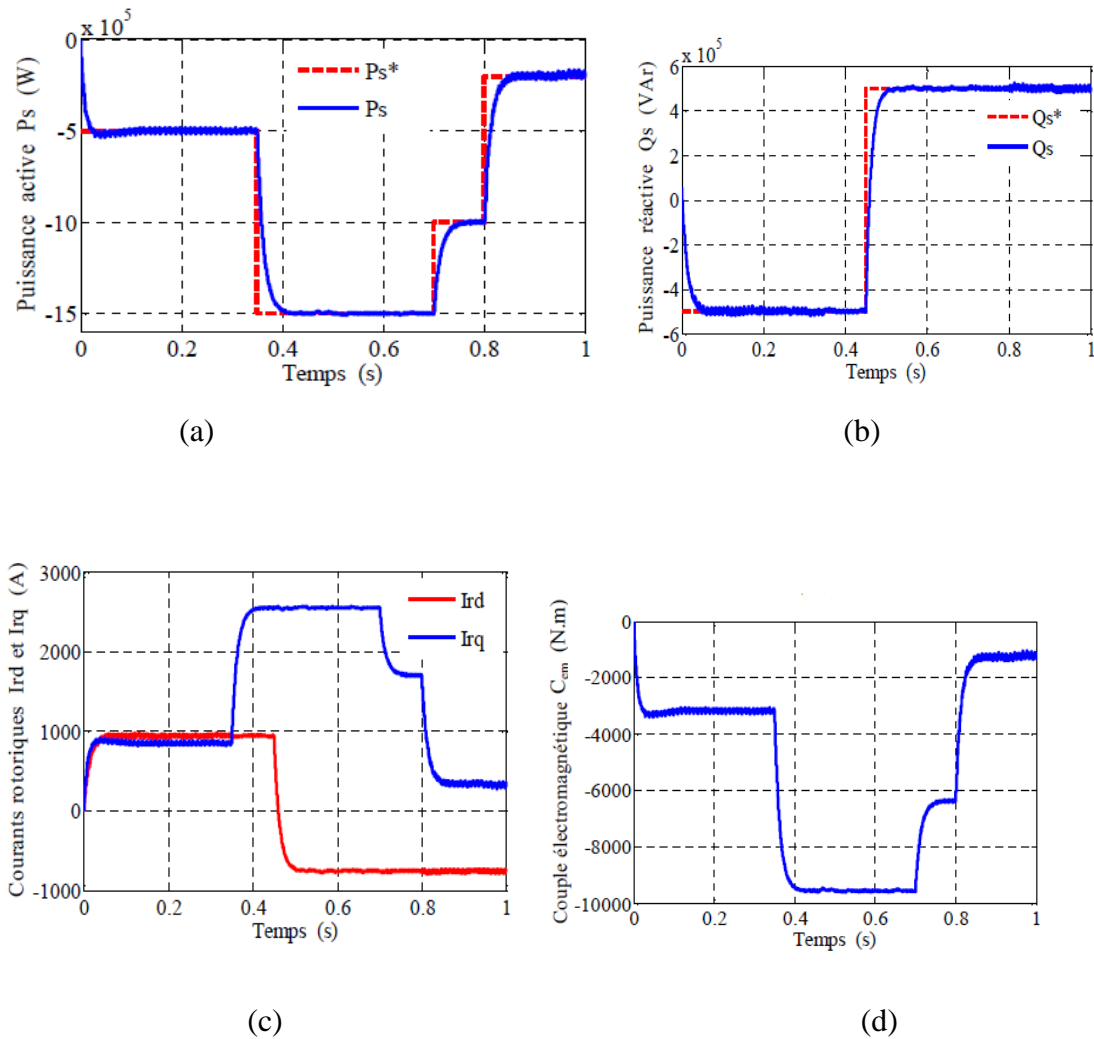


Figure III.8: Résultats de simulations pour la commande indirecte sans onduleur.

- **Intégration de l'onduleur**

Dans cet essai le rotor de la GADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la technique MLI (naturelle).

On garde les mêmes paramètres de l'onduleur utilisé dans la commande directe et les mêmes conditions de simulation précédentes.

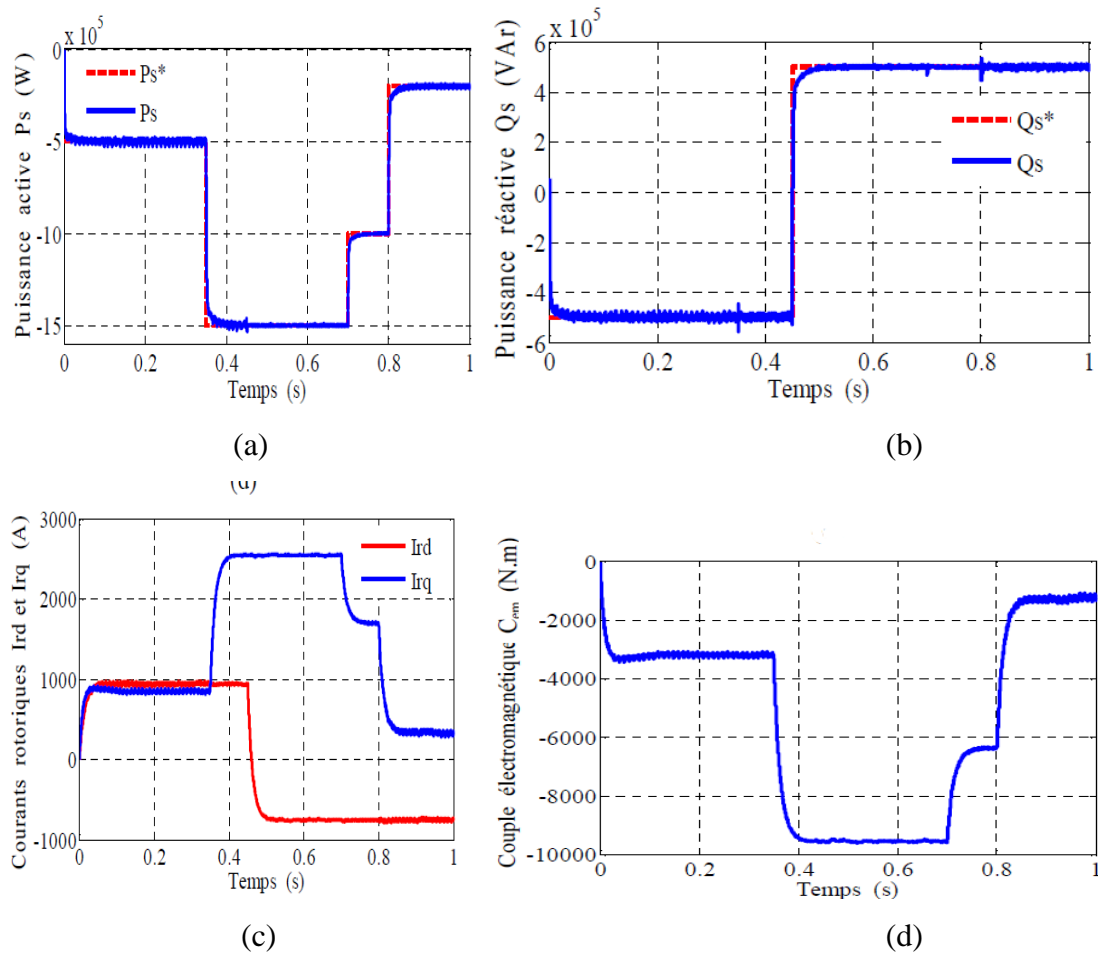


Figure III.9: Résultats de simulations pour la commande indirecte avec onduleur.

Mêmes remarques que l’essai précédent en termes de performances. Aussi sur l’influence de l’onduleur sur la commande sont les mêmes que le cas de la commande directe.

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux méthodes de commande vectorielle en puissance appliquée à la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation à savoir : la commande directe et la commande indirecte.

la méthode indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d’avoir un système performant. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d’avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en

Chapitre III: Commandes linéaires des puissances de la GADA

minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

La synthèse du régulateur PI utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un système de production d'énergie éolienne et l'étude des différents systèmes de contrôle de la génératrice (GADA) qui est la plus utilisée pour ce mode de production d'énergie électrique.

Dans le premier chapitre est consacré à une étude générale de l'énergie éolienne, un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système éolienne. Ensuite on a présenté les différents types d'éoliennes avec les machines électriques utilisées dans cette conversion d'énergie, nous ont amenés à choisir un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement.

Après ces constatations le second chapitre est axé sur la modélisation d'une éolienne. 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 stator à l'aide de la transformation de PARK.

Enfin, nous avons présenté l'aspect théorique de la technique de la commande vectorielle de la GADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes ont été envisagées la commande directe et la commande indirecte, où la machine asynchrone a été contrôlée d'une part à l'aide de régulateurs de type PI, cette méthode testé devant la suivi de consigne et variation des paramètres électriques. Les résultats de simulations obtenus montrent que la commande vectorielle de la GADA donne des résultats satisfaites et de bonnes performances face aux variations paramétriques.

Les résultats de simulations obtenus montrent que la commande vectorielle de la GADA contrôlée d'une part à l'aide de régulateurs de type PI. Le régulateur s'est montré le plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle direct, le modèle servant de base au calcul du régulateur est simplifié et même si la précision statique est meilleure, les performances transitoires du régulateur sont moins bonnes que dans le cas du contrôle indirect.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **WWW.CENTREINFO.COM** « Centre Canadien d'information sur l'énergie »
- [2] **A. MOHAMED, M. ABID , A. ABDELGHANI, R. YOUCEF , B. HOURIA**, « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne », Laboratoire IRECOM Faculté des sciences de l'ingénieur, Université DjillaliLiabes, Algérie,2010.
- [3] **N.CHERFIA** "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens" mémoire Magister. Univ. Constantine. juin2007.
- [4] **P.FREDERIC** " étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ,-Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau" Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique à l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [5] **B. Thawriyyaa, T. Zineb** "Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride" Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen,2016
- [6] **B.A.ASMA**" Etude de la commande d'un système éolien base sur GADA "Mémoire de Magister, Université Hadj lakhdar - Batna , 2016.
- [7] **F. BOUMARAF** "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [8] **B. MERIEM** "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation GADA " Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.
- [9] **S. MOKRANE**, " modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération", université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Août 2013.
- [10] **WWW.ENERGER EOLIENNE** "à partir du dossier ressources éolienne compléter le dossier"
- [11] **AKKARI NADIA**. "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine" Thèse de DOCTORAT de l'université de Batna, 02 /06/ 2010
- [12] **S.HAMACHA** "étude et commande d'une MSAP" mémoire Magister. Univ Tizi Ouzo Juin 2013
- [13] **A. DAVIGNY** « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse

Références bibliographiques

variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007.

[14] **B. YOUCEF. O NABIL** « Contribution à la commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation » mémoire MASTER 2 Université Abderrahmane MIRA de Bejaia 2014/2015

[15] **A. BOYETTE** « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de Doctorat /Université de Henri Poincaré, Nancy, France, Décembre 2006.

[16] **N. AKKARI** « Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » ; thèse de doctorat. Université de Batna, Algérie 2010

[17] **B .RAFIK ET M . MOHAMMED ABDELHALIM** «Commandes non linéaires d'une machine asynchrone double alimentation» mémoire Master 2 Univ Abou BekrBelkaïd – Tlemcen Année Universitaire : 2015 / 2016

[18] **D . YOUCEF** "Commande directe du couple et des puissances d'une GADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle " thèse Doctorat. Université djillaliliabes de sidi-bel-abbes2015

[19] **F.KENDOULI**" Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique" thèse Doctorat. Univ. Constantine.2012

[20] **M.K.TOUATI** "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique" mémoire magister. Univ Batna. Janvier 2015

[21] **S. AIMANI** "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille. 06/12/2004

[22] **F. Poitiers** «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation De l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à Double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[23] **G. ALLOUM**, "contribution a la commande robuste de la machine asynchrone double alimentation", thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse. 13 mars2007.

[24] **C. BENNOUR** «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de magister, université de Biskra, 2012.

Références bibliographiques

- [25] **D . YOUCEF** "Commande par réseaux de neurones d'une GADA intégrée à un système éolien " Mémoire Magister. Université djillaliliabes de sidi-bel-abbes 2009
- [26] **S.GANA,S.ELANANY** « Contrôle robuste d'un stator à base des onduleurs Multi niveaux» ,Mémoire de Master ,Centre Université BelhajBouchib d'ain-Temouchent,2017
- [27]**M. Z.BOUDJEMAA, M. BOUNADJA**, «Commande Non Linéaire par retour d'État d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation par Régulateur PI-Flou», Revue des Sciences et de la Technologie –RST- Volume 1 N°2, janvier 2010.
- [28] **L. KHETTACHE**« Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée»; Mémoire de magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2007.
- [29] **A. L. NEMMOUR**« Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation» ; Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna, 2002.
- [30]**Y. ELBIA**« Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » ; Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 15 Juin 2009
- [31] **F. POITIERS**« Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne»; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 19 Décembre 2003.
- [32] **A. M. SIDDO , I. S. NOUHOU**« Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» ; Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, 2007.
- [33]**S. METAT LA** Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à Base d'une GADA, mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique, 2009.
- [34]**A.ZANA , K. ZAHRA** « Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux» Mémoire MASTER Université Ahmed Draïa Adrar Année Universitaire : 2017/2018



ANNEXE

ANNEXE A

Paramètres du système éolien

Nom et symbole des paramètres	Valeur numérique des paramètres
Puissance nominale P	1.5 MW
Rayon de l'éolienne R	35.25 m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
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
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
Inertie de l'arbre J	1000 kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux de la MADA f_r	0.0024 N.m.s ⁻¹
Glissement g	0.03
Nombre de paires de pôles p	2

La transformation de PARK

Transformation directe de Park	Transformation inverse de Park
Passage du système triphasé (a,b,c) vers le système diphasé (d,q)	Passage du système diphasé (d,q) vers le système triphasé (a,b,c)
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{P(\theta)} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad c - \dot{\alpha} - d \quad \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\theta) [x_{abc}]^T$ <p style="text-align: center;">Avec</p> $P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \xrightarrow{P(\theta)^{-1}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad c - \dot{\alpha} - d \quad \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} [x_{dq}]^T$ <p style="text-align: center;">Avec</p> $P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$

La transformation de CONCORDIA

<i>Transformation directe de Concordia</i>	<i>Transformation inverse de Concordia</i>
<i>Passage du système triphasé (a,b,c) vers le système diphasé (α,β)</i>	<i>Passage du système diphasé (α,β) vers le système triphasé (a,b,c)</i>
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad c-\hat{a}-d \quad \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C [x_{abc}]^T$	$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \xrightarrow{C^{-1}} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad c-\hat{a}-d \quad \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = C^{-1} [x_{\alpha\beta}]^T$
<p>Avec $C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$</p>	<p>Avec $C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$</p>

ANNEXE B

Schéma synoptique du dispositif étudié

