

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

THEME

Commande vectorielle d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la GADA

Présenté par :

Mr. Chelgui Omar Elfarouk

Mr. Ouziala Houssam Eddine

Promoteur : Dr. Haddar Mabrouk

Année universitaire 2023- 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENT

Tous d'abord, nous rendons nos profondes gratitude à Allah, le tout puissant pour la bonne santé, la volonté et de la persévérance qu'il nous a donnée tout au long de nos études.

Alors, tandis que, le Prophète Mohamed qu'Allah le comble de Ses éloges et de Ses salutations

bénies a dit dans le sens du Hadith : N'a pas remercié Allah celui qui ne remercie pas les gens.

nous souhaitons exprimer nos remerciements au Docteur
HADDAR MABROUK

d'avoir accepté encadrer de cette mémoire.

nous tenons à le remercier plus particulièrement pour sa compétence et son expérience.

Nous remercions aussi les membres de jury qui ont accepté de lire et d'évaluer ce modeste travail de recherche.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma Mère et mon Père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant ;

A mes chères frères et sœurs ;

A toute ma famille ;

A tous mes amis ;

A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à formation durant tout le parcours de mes études;

Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Chelgui Omar Elfarouk

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents

A Mon frère et mes sœurs

A toute la famille,

A tous mes amis

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à formation

Durant tout le parcours de mes études jusqu'à ce jour

Ouziala Houssam Eddine

Sommaire

CHAPITRE 1

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

Introduction Générale	1
1.1 Introduction	4
1.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde	4
1.3 Croissance mondiale soutenue	4
1.4 L'énergie éolienne en Algérie	5
1.5 Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne	7
<i>a) Les avantages.....</i>	<i>7</i>
<i>b) Les inconvénients.....</i>	<i>7</i>
1.6 Les différents types d'éoliennes	7
1.6.1 Éoliennes à axe verticale	7
1.6.2 Éoliennes à axe horizontal.....	8
1.6.2.1 Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	9
1.7 Le transformateur élévateur de tension :	10
1.8 Principe de fonctionnement d'une éolienne	10
1.9 CONFIGURATIONS UTILISEES DANS L'INDUSTRIE EOLIENNE	11
1.9.1 Système Eolien à Vitesse Fixe Connecté au Réseau.....	11
<i>a) Avantages.....</i>	<i>11</i>
<i>b) Inconvénients.....</i>	<i>11</i>
1.9.2 Système éolien à vitesse variable connecté au réseau.....	11
<i>a) Avantages.....</i>	<i>12</i>
<i>b) Inconvénients.....</i>	<i>12</i>
1.10 Différents systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne à vitesse variable	12
1.10.1 Machine synchrone (MS).....	12
1.10.2 Machine asynchrone à cage (MAS)	13
1.10.3 Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	14
1.10.3.1 Modes de fonctionnement de la MADA.....	15
1.10.3.2 Avantages de la MADA dans la production éolienne.....	18
1.10.3.3 Inconvénients de la MADA	18

1.11 Problématique, objectif	19
1.11.1 Problématique	19
1.11.2 Objectifs.....	19
1.12 Conclusion	19

CHAPITRE 2

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la Gada

2.1 Introduction	21
2.2 Modélisation de la turbine éolienne	21
2.2.1 Loi de Betz.....	21
2.2.2 Coefficients de puissance	22
2.2.2.1 Approximation numérique	24
2.2.3 Fonctionnement à vitesse variable.....	24
2.2.4 Zones de commande de l'éolienne.....	26
2.3 Modélisation de la partie mécanique d'un système éolienne	28
2.3.1 Modèle de multiplicateur	28
2.3.2 Equation dynamique de l'arbre	28
2.4 Modélisation de la MADA	30
2.4.1 Représentation du modèle	30
2.4.2 Hypothèses simplificatrices	30
2.4.3 Equations de la MADA	31
2.4.3.1 Equation électrique	31
2.4.3.2 Equation magnétique.....	32
2.4.4 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le plan de Park.....	34
2.4.4.1 Transformation de Park.....	34
2.4.4.2 Choix de référentiel	35
2.4.4.3 Equation électrique	36
2.4.4.4 Equation magnétique.....	36
2.4.4.5 Les expressions des puissances active et réactive.....	36
2.4.4.6 Le couple électromagnétique	37
2.4.4.7 Equation mécanique	37
2.5 Modélisation de convertisseur	37
2.5.1 Construction du convertisseur directionnel.....	37
2.5.2 Modèle des convertisseurs de puissance dans le repère naturel	38

2.5.3	Modèle de bus continu	40
2.5.4	Modèle de filtre RL.....	40
2.6	Conclusion	41

CHAPITRE 3

Synthèse et simulation des lois de commande

3.1	Introduction	43
3.2	Stratégie de la commande	43
3.3	Principe de la MPPT	44
3.3.1	<i>Le contrôle sans asservissement de la vitesse (commande en couple optimal - OTC)</i>	44
3.4	Technique de commande MLI (PWM)	45
3.5	Commande vectorielle	45
3.6	Technique d'orientation du flux	46
3.7	Commande vectorielle indirecte	51
3.8	Commande de convertisseur coté machine CCM	51
3.9	Commande du convertisseur coté réseau CCR	52
3.9.1	Contrôle de la tension du bus continu	54
3.10	Simulation et Interprétation	55
3.10.1	Simulation	55
3.10.2	Interprétation des résultats.....	56
3.11	Conclusion	64
	Conclusion générale	65

Liste des figures

CHAPITRE 1

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

Figure 1.1 : nouvelles capacités installées de 2019 à 2023	4
Figure 1.2 : Nouvelles puissances éoliennes terrestres en 2023 installées selon les pays en %.	5
Figure 1.3 : Perspectives des nouvelles installations 2024-2028	5
Figure 1.4 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) à 10m du sol en Algérie ..	6
Figure 1.5 : Eolienne à axe vertical	8
Figure 1.6 : Eolienne à axe horizontal.....	8
Tableau I.1: Les catégories des éoliennes selon leurs puissances	9
Figure 1.7 : Composants d'une éolien.....	9
Figure 1.8 : Principe de la conversion d'énergie éolienne.	10
Figure 1.10 : Système éolien à vitesse fixe connecté au réseau.	11
Figure 1.11 : Système éolien basé sur la machine synchrone	12
Figure 1.12 : Système éolien basé sur la MAS	13
Figure 1.13 : Courbe généralisée du couple en fonction de la vitesse d'une machine asynchrone à cage.....	13
Figure 1.14 : Machine asynchrone à rotor bobiné	14
Figure 1.15 : Système éolien basé sur la machine Asynchrone à double alimentation.....	14
Figure 1.16 : Mode de fonctionnement de la MADA	15
Figure 1.17 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone.....	16
Figure 1.18 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone.....	16
Figure 1.19 : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	17
Figure 1.20 : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	17

CHAPITRE 2

Modélisation de la chaine de conversion éolienne à base de Gada

Figure 2.1 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne	21
Figure 2.2 : Coeffecient de puissssance C_p pour différents types des turbines éoliennes.....	23
Figure 2.3 : Carectéristique $C_p(\lambda, \beta)$	24
Figure 2.4 : Caractéristique de la puissance en fonction des vitesses	25

Figure 2.5 : caractéristiques de puissance des éoliennes à vitesse fixe et variable en fonction de la vitesse de rotation dans différentes vitesses de vent et extraction de maximum puissance	25
Figure 2.6 : Les caractéristiques réelles d'une éolienne de 2.4 MW à vitesse variable	26
Figure 2.7 : Zones de fonctionnement de l'éolienne	26
Figure 2.8 : Modèle mécanique simplifié de multiplicateur	28
Figure 2.9 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne	28
Figure 2.10 : Schéma bloc du modèle de la turbine	29
Figure 2.11 : Modèle triphasé généralisé de la MADA	30
Figure 2.12 : Modèle généralisé biphasé	33
Figure 2.13 : Représentation de la machine dans le repère biphasé de Park.....	35
Figure 2.14 : Repère liée au champ tournant	35
Figure 2.15 : Schéma électrique d'un convertisseur MLI triphasé.....	38
Figure 2.16 : Schéma équivalent pour le circuit du bus continu	40

CHAPITRE 3

Synthèse et simulation des lois de commande

Figure 3.1 : Configuration de la chaine de conversion éolienne à base de la GADA et sa commande	43
Figure 3.2. : MPPT basée sur la commande en couple optimal - OTC.....	45
Figure 3.3 : Principe de la commande vectorielle	46
Figure 3.4 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique	46
Figure 3.5 : Etablissement des angles de transformation à l'aide d'une PLL.	47
Figure 3.6 : Schéma bloc du système à réguler.	50
Figure 3.7 : Schéma synoptique de commande du convertisseur coté machine CCM	52
Figure 3.8 : Schéma synoptique de commande du convertisseur coté réseau CCR.....	55
Figure 3.9 : Schéma global du système de conversion éolien avec simulink	56
Figure 3.10 : Profile de vitesse de vent	56
Figure 3.11 : Courants rotoriques directe et quadrature et leurs références	57
Figure 3.12 : Couple électromagnétique et sa références.....	57
Figure 3.13 : Puissance réactive statorique et sa référence.	58
Figure 3.14 : puissance active statorique.....	58
Figure 3.15 : Tension et courant statoriques.....	59
Figure 3.16 : facteur de puissance statorique	60
Figure 3.17 : Courants des trois phases rotoriques.....	60
Figure 3.18 : Puissance active rotorique et sa référence	61
Figure 3.19 : Tension de bus continu et sa référence.....	61

Figure 3.20 : Puissance réactive coté réseau et sa référence	62
Figure 3.21 : Variations de tension et de courant coté réseau.....	62
Figure 3.22 : Tension simple à la sortie du convertisseur coté réseau CCR.....	63

Liste des Tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1: Les catégories des éoliennes selon leurs puissances	17
---	----

Chapitre 2

Tableau 2.1: Table de vérité d'un onduleur commandé par MLI	47
--	----

Liste des acronymes et des symboles

Acronymes

MS	Machine synchrone
MAS	Machine Asynchrone à cage
MADA	Machine Asynchrone a Double alimentation
GADA	Génératrice Asynchrone a Double Alimentation
PWM	Pulse Width Modulation
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsions
IGBT	Insulated Gate Bipolair Transistor
GTO	Gate turn-off thyristor,
CCM	Convertisseur Côté Machine
CCR	Convertisseur Côté Réseau
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OTC	Optimal torque control
PLL	Phase Locked Loop
PI	Proportionnelle intégrale

Symboles

S	Section de la surface active balayée par les pales
ρ	Densité de l'air.
P_v	La puissance de vent
V_v	Vitesse du vent
$P_{méc}$	Puissance mécanique
C_p	Coefficient de puissance
C_p^{max}	Coefficient de puissance max
λ	Rapport de vitesse
λ_{opt}	Rapport de vitesse optimal
β	Angle de calage des pales
R	Rayon des pales de l'aérogénérateur
Ω_{turb}	Vitesse angulaire de la turbine

$\Omega_{turb-opt}$	Vitesse angulaire optimal de la turbine
Ω_m	Vitesse mécanique de la génératrice
C_c	Coefficient de couple.
$C_{méc}$	Couple mécanique sur l'axe rapide.
C_{turb}	Couple théorique capté par la turbine éolienne.
C_{em}	Couple électromagnétique
C_{em}^*	Couple électromagnétique de référence
C_r	Couple résistant
G	Gain de multiplicateur
J	Inertie totale de l'arbre de transmission
J_{turb}	Inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice
J_g	Inertie de la génératrice
f	Coefficient de frottement dynamique
g	Glissement
P_s, P_r, P_m	Les puissances respectivement du stator, du rotor et mécanique
Ω_s	Vitesse angulaire de synchronisme.
θ	Position angulaire du rotor par rapport au stator
θ_r	Angle de glissement
θ_{coord}	Angle de repère tournant biphasé
ω_s	Vitesse électrique de champ tournant
ω_r	Vitesse électrique de rotor
ω_{coord}	Vitesse de rotation du repère de PARK
$P(\theta)$	Matrice de transformation directe de PARK
p	Nombre de paires de pôles
R_s, R_r	Les résistances des enroulements respectivement statoriques et rotoriques.
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions simples triphasées au stator de la machine
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Tensions simples triphasées au rotor de la machine
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courants dans les enroulements statoriques de la machine

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}	Courants dans les enroulements rotoriques de la machine.
$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	Flux propres circulant dans les enroulements du stator de la machine
$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$	Flux propres circulant dans les enroulements du rotor de la machine
l_s, l_r	Inductances propres statoriques et rotoriques
m_s, m_r	Inductances mutuelles statoriques et rotoriques
L_s, L_r	Inductance cyclique statoriques et rotorique
M_{sr}	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor
$M_{\max}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor
V_{sd}, V_{sq}	Tensions statoriques dans le repère de Park
V_{rd}, V_{rq}	Tensions rotoriques dans le repère de Park
i_{sd}, i_{sq}	Courants statoriques dans le repère de Park
i_{rd}, i_{rq}	Courants rotoriques dans le repère de Park
ϕ_{sd}, ϕ_{sq}	Flux statoriques dans le repère de Park
ϕ_{rd}, ϕ_{rq}	Flux rotoriques dans le repère de Park
P_s, P_r	Puissances actives statoriques et rotoriques
Q_s, Q_r	Puissances réactives statoriques et rotoriques
P_g, Q_g	Puissances actives et réactives de réseau
P_g^*, Q_g^*	Puissances actives et réactives de référence de réseau
V_{dg}, V_{qg}	Tensions de réseau dans le repère d-q
i_{dg}, i_{qg}	Courants de réseau dans le repère d-q
i_{dg}^*, i_{qg}^*	Courants de réseau de référence dans le repère d-q
V_{df}, V_{qf}	Tensions de filtre dans le repère d-q
i_{df}, i_{qf}	Courants de filtre dans le repère d-q
R_f	Résistance de filtre
L_f	Inductance de filtre
P_f	Puissance active de filtre
P_f^*	Puissance active de référence de filtre

σ	Coefficient de dispersion
C	Valeur de la capacité sur le bus continu.
P_c	Puissance active traversant le condensateur
P_c^{ref}	Puissance active de référence traversant le condensateur
i_c	Courant traversant le condenseur.
i_c^{ref}	Courant de référence traversant le condenseur
i_{ms}	Courant de magnétisation
P_{red}	Puissance active à la sortie du redresseur MLI
i_{red}	Courant à la sortie du redresseur MLI
P_{ond}	Puissance active à l'entrée de l'onduleur MLI
i_{ond}	Courant à l'entrée de l'onduleur MLI
V_{dc}	Tension aux bornes du condensateur
V_a, V_b, V_c	Tension de bras de l'onduleur
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Tensions simples modulées par le convertisseur MLI
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	Tensions composées modulées par le convertisseur MLI
S_1, S_2, S_3	Séquences pour les signaux de commande des interrupteurs

Introduction Générale

L'énergie éolienne a connu un essor remarquable ces dernières années, suscitant un intérêt de recherche intense. De nombreux groupes d'experts se sont penchés sur cette technologie prometteuse, menant à des avancées significatives dans le domaine. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne se déclinent généralement en deux catégories principales : les turbines à vitesse fixe et les turbines à vitesse variable. Chacune de ces catégories présente des avantages et des inconvénients spécifiques, offrant ainsi une variété d'options pour répondre aux besoins et aux conditions d'exploitation.

La recherche présentée dans ce travail s'intéresse à une configuration de système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, utilisant un Générateur Asynchrone à Double Alimentation (GADA). Ce choix de générateur, caractérisé par sa robustesse et son efficacité, permet d'offrir une grande flexibilité de fonctionnement et une meilleure adaptation aux fluctuations du vent.

En effet, la structure la plus typique de système de conversion d'énergie éolienne à base GADA consiste à lier le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers deux convertisseurs statiques en mode back-to-back (un côté rotor et l'autre côté réseau). Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable ce qui donne la possibilité de récolter le maximum de puissance possible sur une large plage de variation de la vitesse ($\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme). Par ailleurs, la commande vectorielle de GADA repose, pour notre étude, sur un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques à travers une orientation adéquate du repère (dq).

Par conséquent, une simulation de système de conversion d'énergie éolienne à base GADA est effectuée via l'outil de simulation MATLAB/Simulink pour vérifier et analyser la performance du système sous conditions d'exploitations prédéfinies.

A la lumière de ce constat, le mémoire sera divisé en trois chapitres pour décrire le travail envisagé.

Dans le premier chapitre, une étude sur l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne à base de GADA est présentée. Nous exposerons la capacité mondiale et nationale de production de l'énergie éolienne au cours des dernières années. Ensuite, les différentes structures utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation de différents éléments constituant le système de conversion d'énergie éolienne à base de GADA à partir de laquelle est reposé le travail de ce mémoire. On a donné le modèle aérodynamique de turbine. Après, On décrit le modèle

mathématique de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) et de son convertisseur statique qui alimente le rotor.

Dans le troisième chapitre, Nous avons présenté et la stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking) afin de l'extraction du maximum de puissance de l'éolienne pour chaque vitesse du vent. Après, nous avons présenté la théorie et l'application de la technique de commande vectorielle. Les résultats de la simulation numérique obtenus lors de l'application les commandes de la GADA vis à vis variation de vent.

Dans la dernière partie, une conclusion résume l'ensemble des travaux présentés et des perspectives pour de futurs travaux sont suggérés.

CHAPITRE 1

L'ETAT DE L'ART SUR L'ENERGIE EOLIENNE

1.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie calorifique du Soleil : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propres durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales[1].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion.

1.2 Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

En 2023, l'industrie éolienne mondiale a enregistré un record de 117 GW pour les nouvelles capacités installées, soit la meilleure année de tous les temps pour l'énergie éolienne. Cela correspond à une augmentation de 50 % par rapport à l'année précédente. La capacité totale mondiale pour la production d'électricité éolienne a franchi la première étape de 1 TW en 2023 et s'élève désormais à 1021 GW[2].



Figure 1.1 : Nouvelles capacités installées de 2019 à 2023 [3]

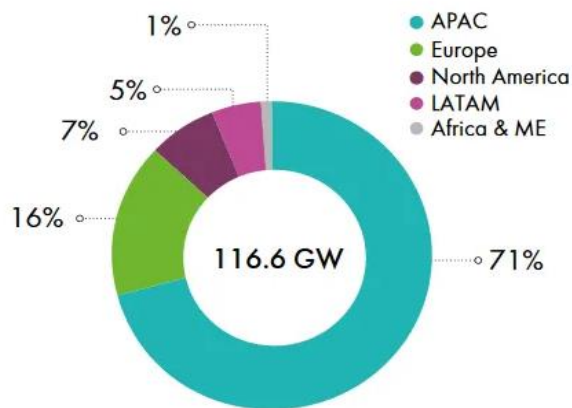
1.3 Croissance mondiale soutenue

L'année 2023 a connu une croissance mondiale soutenue ; 54 pays de tous les continents ont construit de nouvelles éoliennes. Le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) a rehaussé ses prévisions de croissance de 10 % pour la période de 2024 à 2030 (1210 GW). Il réagit ainsi

à l'introduction de politiques industrielles nationales dans les grandes économies, au dynamisme croissant de l'énergie éolienne offshore et à sa croissance prometteuse dans les pays émergents et en développement.[2]

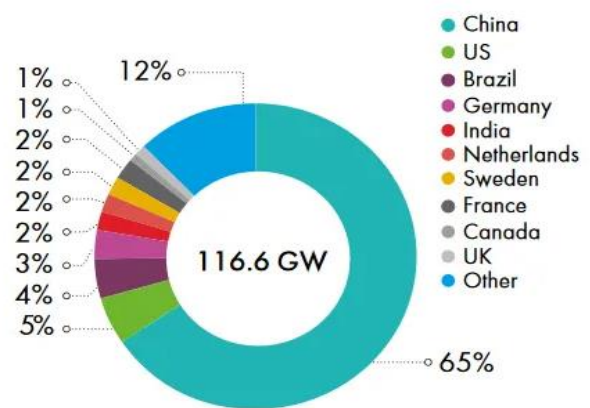
Il aura fallu plus de 40 ans pour que la barre des 1 TW d'énergie éolienne installée dans le monde soit franchie. Selon GWEC, la construction des prochains 2 TW ne devrait prendre que sept ans. Pour atteindre les objectifs fixés par la COP28 et le seuil de +1,5°C, l'industrie éolienne devra cependant multiplier sa croissance par trois, de 117 GW en 2023 à 320 GW minimum en 2030.[2]

New capacity in 2023 installed by region (%)



(a)

New capacity 2023 and share of top five markets (%)



(b)

Figure 1.2 : Nouvelles puissances éoliennes terrestres en 2023 installées selon les pays en %
a) par région, b) part des cinq principaux marchés [3]

New installations outlook 2024–2028 (GW)

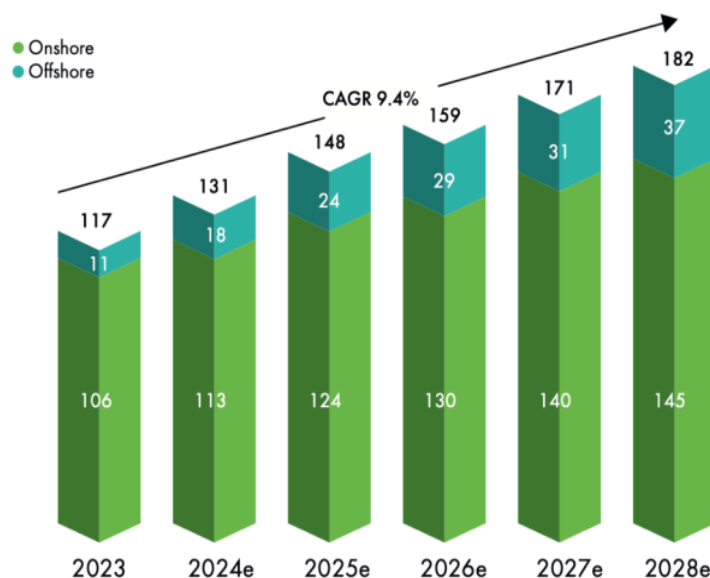


Figure 1.3: Perspectives des nouvelles installations 2024-2028[3]

1.4 L'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie ayant un gisement éolien important, dont le régime du vent est modéré entre **2 et 6 m/s** selon la carte des vents établie par le Centre de Développement Des Energies Renouvelables, **CDER** (Figure 1).

En raison que l'Algérie possède une surface géographique importante, le potentiel éolien se diverge selon chaque région. Au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne du vent modérée (**1 à 4 m/s**) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Le potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux.

Au Sud de pays, la vitesse moyenne du vent dépasse **4m/s**, plus particulièrement au sud-ouest, avec un vent qui dépasse le **6 m/s** dans la région d'Adrar[4].

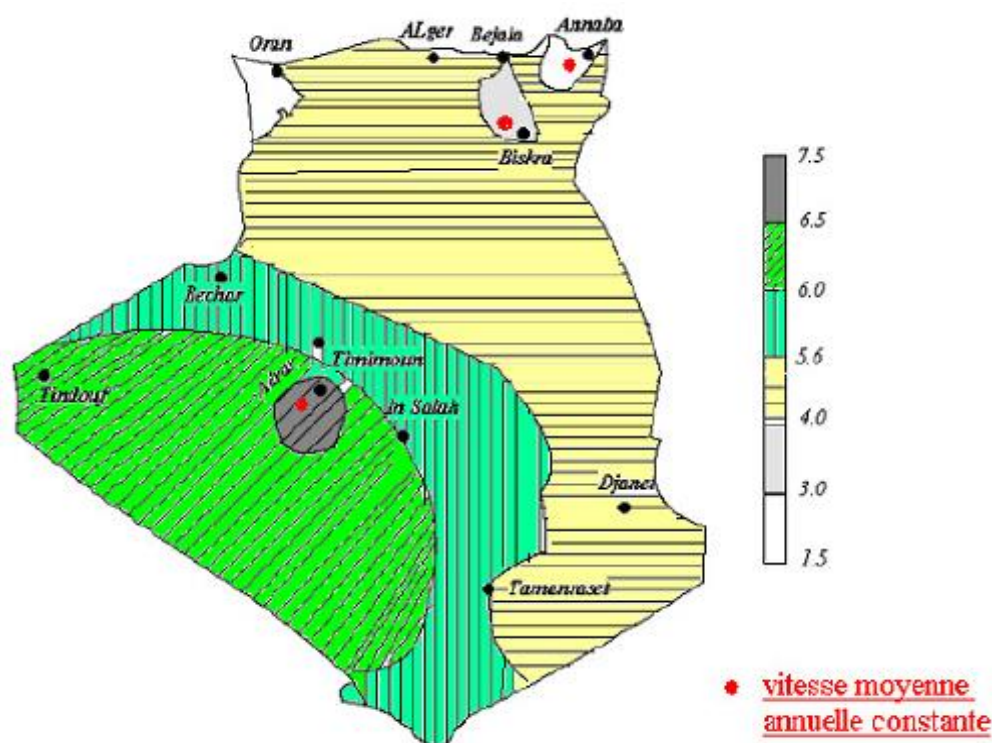


Figure 1.4 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) à 10m du sol en Algérie[4]

Après la chute brutale ces dernières années du prix du baril, l'Algérie affiche de grandes ambitions pour investir dans le secteur des énergies renouvelables. Outre l'installation de plusieurs centrales photovoltaïques dans les Hauts Plateaux et le Sud, des projets de grands parcs éoliens devront voir le jour dès **2017**. En effet, l'Algérie avait réceptionné en **2014** la ferme éolienne pilote de Kabertène à Adrar (**10 MW**) et des études ont été menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période **2017-2030** pour une puissance d'environ **22 GW** [5].

1.5 Inconvénients et avantages de l'énergie éolienne

a) *Les avantages*

- L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchets. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en quelques mois.
- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation.

Au-delà de la donne économique et environnementale, l'énergie éolienne suscite un intérêt particulier car elle peut favoriser la diversification et l'indépendance énergétique d'un pays.

b) *Les inconvénients*

- La pollution visuelle et sonore. La perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige l'installation des éoliennes loin des habitations ;

Sur le plan technique, l'éolien a quelques inconvénients par rapport à d'autres types de production de l'énergie électrique :

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente et difficilement prévisible ;
- Son insertion dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux. En effet, tant que ce type de production reste marginal, les contraintes sont limitées. Aussi pendant longtemps les parcs éoliens n'ont souvent eu pour seules (contraintes) que de produire lorsqu'il était possible de produire et de ne pas dégrader la qualité de tension sur les réseaux.

Aujourd'hui, du fait du développement important et toujours croissant en termes de puissance installée des parcs éoliens, ces derniers sont assujettis à des exigences techniques de plus en plus sévères imposées par des règles de raccordement aux réseaux définies à l'initiative des gestionnaires de réseaux.

1.6 Les différents types d'éoliennes

1.6.1 Éoliennes à axe verticale

Elles sont très peu utilisées de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Ce type d'éolienne présente un axe perpendiculaire à la direction du vent et l'axe est souvent positionné à la verticale.



Figure 1.5: Eolienne à axe vertical

1.6.2 Éoliennes à axe horizontal

Les aérogénérateurs à axe horizontal (figure 1.1.) sont les plus utilisés actuellement comparativement à ceux à axe vertical puisqu'ils présentent un prix moins important. De plus, ils sont moins exposés aux contraintes mécaniques [6]. Ils sont constitués d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le prix et la vitesse de rotation du capteur éolien [7]. Dans la littérature, les principales éoliennes étudiées sont tripales à axe horizontal [8].



Figure 1.6 : Eolienne à axe horizontal

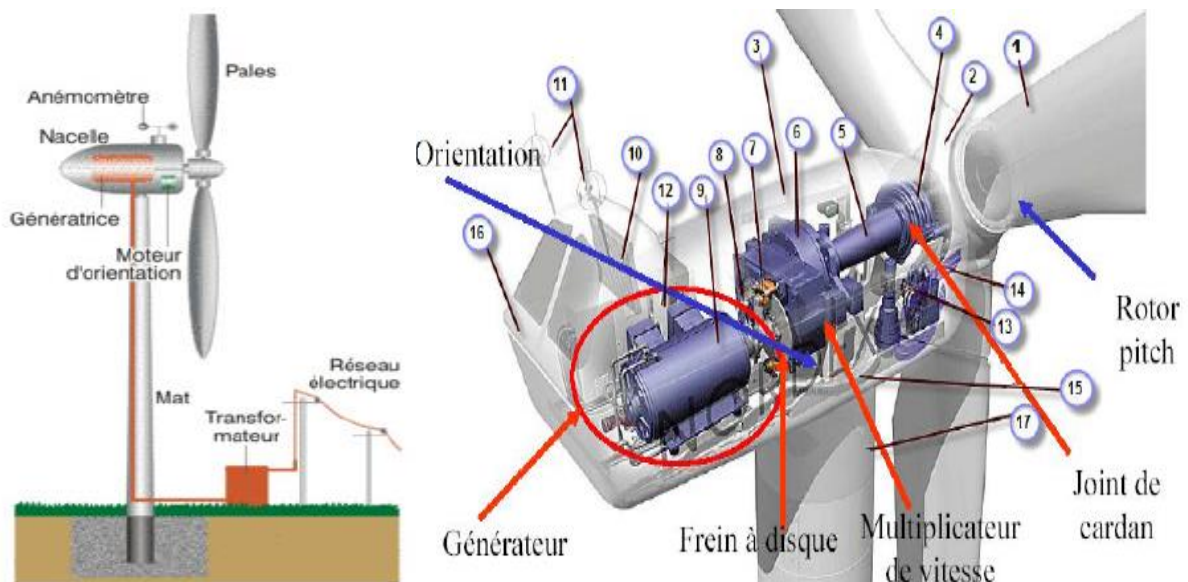
Les éoliennes peuvent être classées aussi en trois catégories selon leur puissance nominale comme il est indiqué sur le tableau suivant :

Echelle	Diamètre des pales	Puissance
Petite puissance	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne puissance	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande puissance	46 et plus	Plus de 1 MW

Tableau 2.1: Les catégories des éoliennes selon leurs puissances

1.6.2.1 Constitution d'une éolienne à axe horizontal

La figure 1. représente les différents composants d'une éolienne NORDEXS77/1500kW[9] [10].



1 pales	7 frein à disque	13 centrale hydraulique
2 Moyeu de rotor	8 accouplement	14 mécanisme d'orientation des pales
3 nacelle	9 génératrice	15 paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
4 cardan	10 radiateur de refroidissement	16 capot
5 transmission	11 centrale de mesure du vent	17 mat
6 multiplicateur de vitesse	12 contrôle	

Figure 1.7 : Composants d'une éolien

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

a) Le mât : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

b) La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle sont nécessaires pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent.

c) Le rotor est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor tripal est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

1.7 Le transformateur élévateur de tension :

Les générateurs de turbine d'éolienne ont en général une tension de sortie de l'ordre de 690 (V). Le transformateur permet d'élever la tension pour le raccord au réseau de distribution « par exemple 20 (kV) ». Actuellement, il n'y a pas d'éolienne directement connectée sur le réseau.

1.8 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne ou un aérogénérateur est un dispositif capteur et convertisseur d'énergie, elle transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

La conversion éolienne se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. Le fonctionnement général est illustré par la figure 1.6: l'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

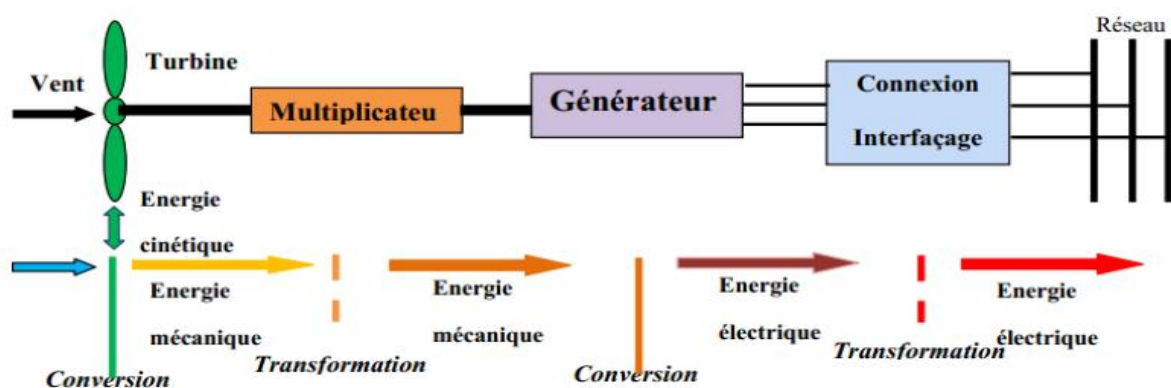


Figure 1.8 : Principe de la conversion d'énergie éolienne.

1.9 CONFIGURATIONS UTILISEES DANS L'INDUSTRIE EOLIENNE

En fonction du type de fonctionnement, du type de générateur et du milieu où l'éolienne est installée, il existe plusieurs configurations dont les plus utilisés :

1.9.1 Système Eolien à Vitesse Fixe Connecté au Réseau

Elle est basée dans la plupart des cas sur l'utilisation de la machine asynchrone à induction (MAS) en raison qu'elle peut supporter de légères variations de vitesse de rotation, ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Le type de configuration est illustré par la Figure 1.10.

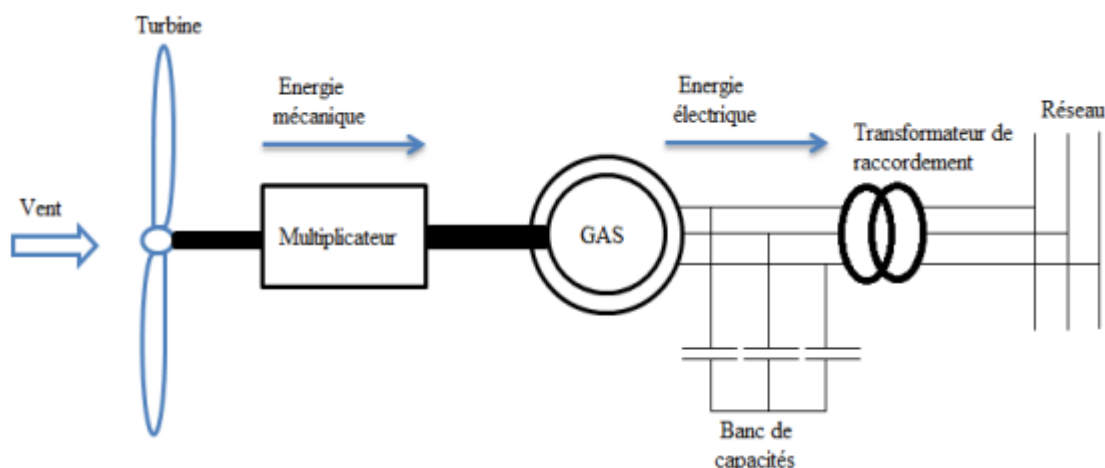


Figure 1.9 : Système éolien à vitesse fixe connecté au réseau.

a) Avantages

- Simple et utilisée depuis longtemps,
- Economiquement plus intéressante.

b) Inconvénients

- Vibrations plus importantes,
- Usure des pièces plus importante (maintenance plus importante),
- Seule une opération avec une vitesse fixe possible,
- Mauvaise qualité d'énergie produite entraînant des perturbations sur le réseau,
- Compensation de puissance réactive requise.

1.9.2 Système éolien à vitesse variable connecté au réseau

Actuellement, les éoliennes de forte puissance fonctionnent sous vitesse variable. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. Leurs pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées. Ces

systèmes à vitesse variable permettent à la fois de récupérer plus d'énergie, de réduire les coûts du système mécanique, de réduire le bruit et d'améliorer la qualité de l'énergie produite.

a) Avantages

- Optimisation de l'énergie captée,
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée sur le réseau.

b) Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales,
- Convertisseur de puissance "complexe",
- Coût élevé.

1.10 Différents systèmes de conversion électromagnétique de l'énergie éolienne à vitesse variable

1.10.1 Machine synchrone (MS)

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux à très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéro turbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

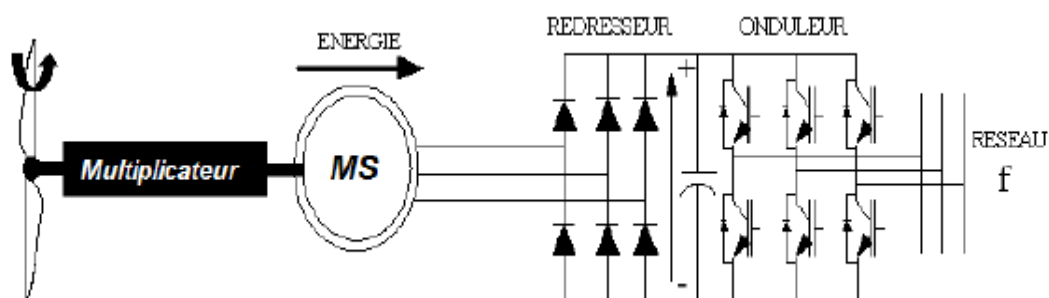


Figure 1.10 : Système éolien basé sur la machine synchrone

Dans la configuration précédente (figure 1.15), la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance [11].

1.10.2 Machine asynchrone à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien.

Une topologie consiste à relier directement une MAS à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur est associé à la machine et une batterie de condensateurs assure sa magnétisation. La vitesse de rotation peut alors être faiblement variable, limitée par le glissement maximum de la MAS. L'avantage de cette architecture est sa simplicité et son faible coût [12].

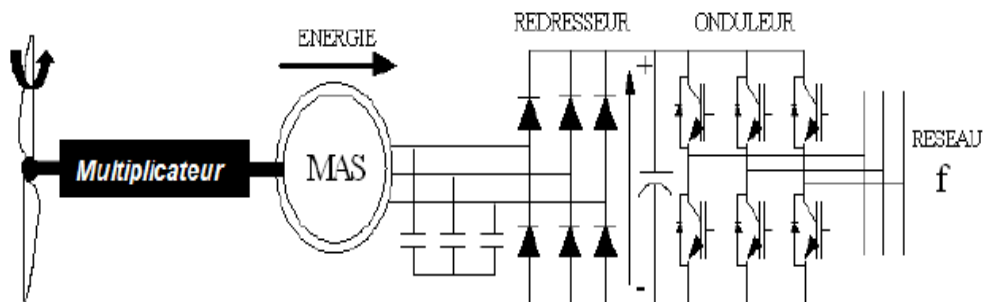


Figure 1.11 : Système éolien basé sur la MAS

La machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en génératrice.

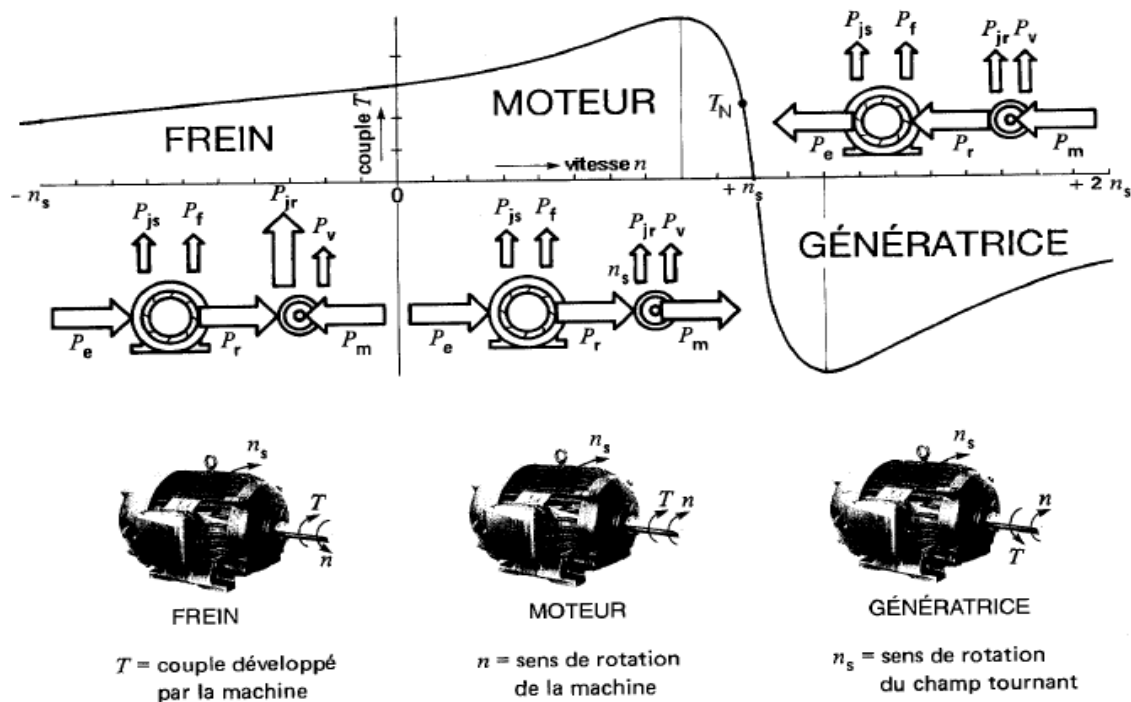


Figure 1.12 : Courbe généralisée du couple en fonction de la vitesse d'une machine asynchrone à cage[13].

1.10.3 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

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

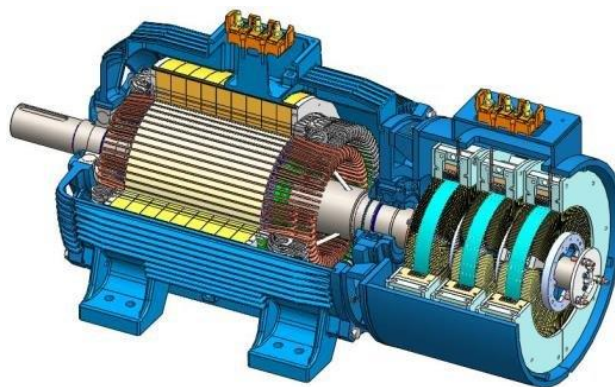


Figure 1.13 : Machine asynchrone à rotor bobiné [14]

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...).

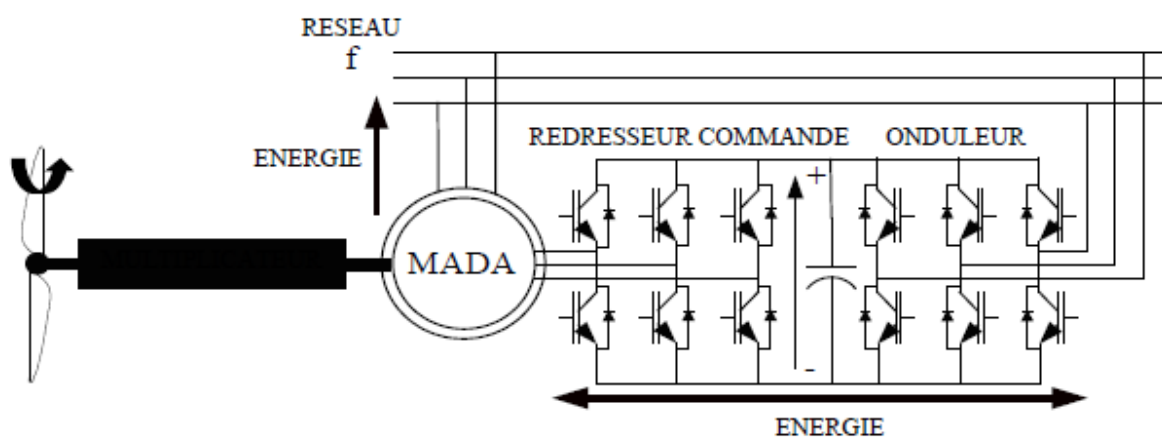


Figure 1.14 : Système éolien basé sur la machine Asynchrone à double alimentation

1.10.3.1 Modes de fonctionnement de la MADA

Le stator est directement connecté au réseau et le rotor est alimenté par un onduleur. Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [15].

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur.

Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

Tel que :

$$\begin{aligned} P_r &= -gP_s \\ P_m &= -(1-g)P_s \end{aligned} \quad (1.1)$$

Avec P_s , P_r et P_m sont les puissances respectivement du stator, du rotor et mécanique.

g : Le glissement de la machine

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement (figure I.18).

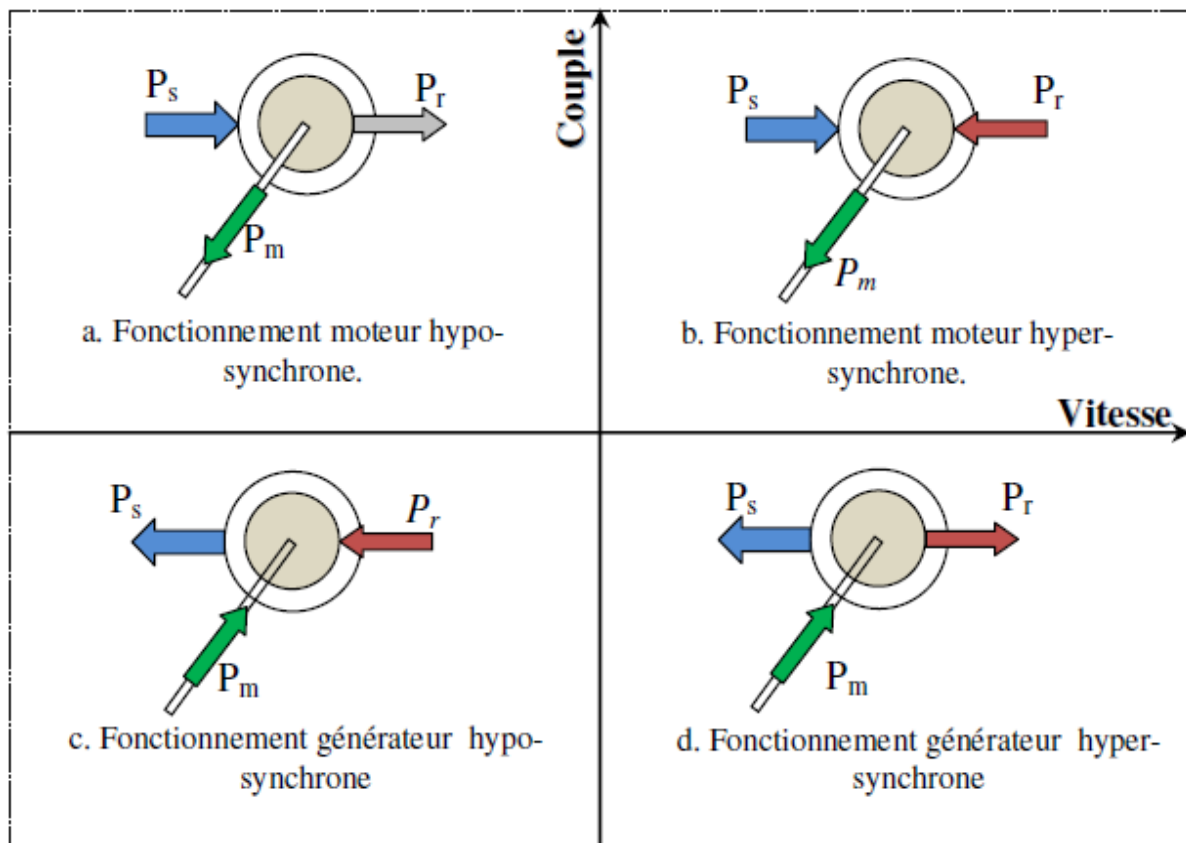


Figure 1.15 : Mode de fonctionnement de la MADA

a) **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone** : La (figure 15, a) 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 au-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.

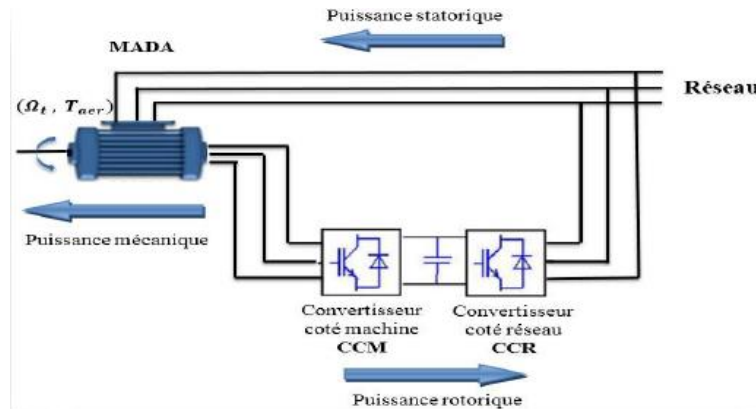


Figure 1.16 : Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

b) **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone** : La (figure 1.15, b) montre que la puissance est fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

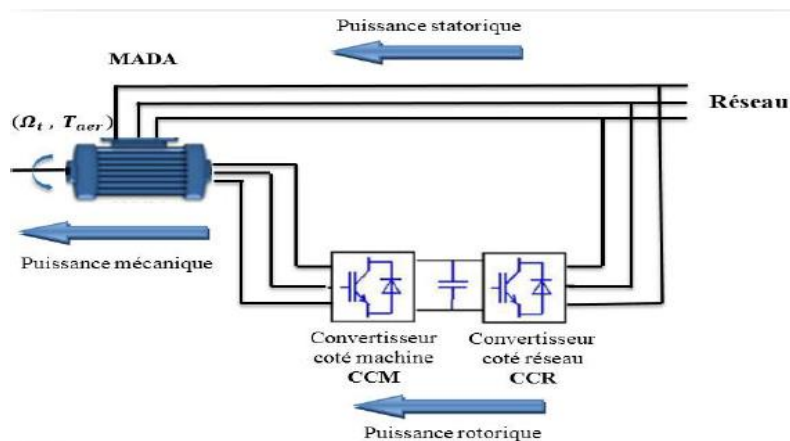


Figure 1.17 : Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

c) **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone** : La (figure 1.15, c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

La machine asynchrone classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

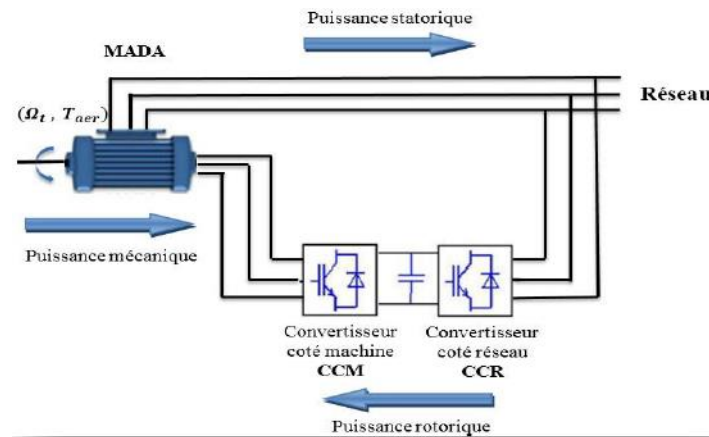


Figure 1.18 : Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

d) Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone : La (figure 1.15, d) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator est 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.

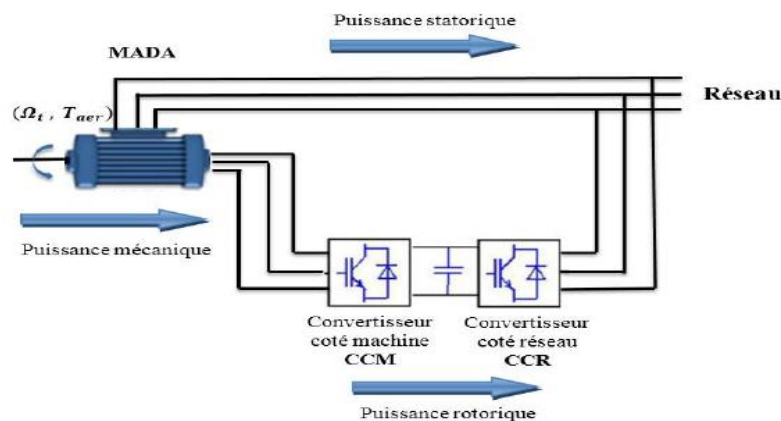


Figure 1.19 : Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

On peut remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique: la production de puissance électrique quelle que soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement. La machine est capable donc de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale.

1.10.3.2 Avantages de la GADA dans la production éolienne

Durant la dernière décennie, le marché des générateurs éoliens à vitesse variable s'est orienté vers des puissances supérieures à 1 MW notamment pour tirer le maximum du gisement éolien sur le site d'implantation. Ces générateurs utilisent souvent la (MADA) comme génératrice étant donné ses avantages. En effet, la variation de la vitesse acceptable pour un fonctionnement stable de la GADA est de $\pm 30\%$ (correspondant à la valeur du glissement g) autour de la vitesse de synchronisme ; ceci va limiter la puissance circulant dans le circuit rotorique à $|gP_s|$ [16].

De ce fait, les convertisseurs statiques utilisés sont dimensionnés pour faire transiter uniquement la puissance de glissement ; c'est à dire au maximum 30% de la puissance nominale de la machine. Par ailleurs, les éoliennes à base de la GADA procurent ainsi plusieurs avantages :

- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant ainsi un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimants permanents[7].
- Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré.
- Le dimensionnement des filtres est réduit et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri.
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone [17]. En effet, les puissances active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la GADA [18] [19] .
- Contrairement à la machine à cage, la mesure des courants au stator et rotor est accessible, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.

1.10.3.3 Inconvénients de la GADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le prix de la machine est plus important que celui de la machine à cage.
- Elle nécessite une maintenance, ce qui va augmenter le coût d'exploitation.

1.11 Problématique, objectif

1.11.1 Problématique

Le système de conversion de l'énergie éolienne à base de GADA présentes les inconvénients majeurs suivantes :

- Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système multidisciplinaire qui demande une connaissance approfondie de plusieurs spécialités.
- Besoin d'avoir un modèle mathématique de système de conversion de l'énergie éolienne à base de GADA non seulement fiable et efficace, mais aussi ouvert aux acteurs sur la scène de recherche pour l'application de différentes commandes classique ou récente. Ainsi que capable de montrer le comportement global du système via un outil de simulation en vue d'atteindre les meilleures performances.

1.11.2 Objectifs

Nos travaux a pour objectifs :

- Etablir un modèle mathématique précis et simple de système de conversion de l'énergie éolienne à base GADA avec une stratégie de commande MPPT basé sur le couple optimal.
- Etablir une loi de commande robuste et permanente pour le système de conversion de l'énergie éolienne basée sur la commande vectorielle.
- L'implémentation et vérification de modèle de simulation de système de conversion de l'énergie éolienne à base de GADA à l'aide de l'environnement logiciel MATLAB/Simulink.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, on a évoqué la description de l'ensemble des composants d'un système éolien. Le principe de fonctionnement d'une éolienne, avantages et inconvénients, types des éoliennes, aérogénérateurs utilisés dans les conversions de l'énergie éolienne, ont fait l'objet de ce chapitre. On va s'intéresser dans ce mémoire à l'aérogénérateur à structure MADA.

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE A BASE DE LA GADA

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous s'intéresserons à la modélisation des différents composants des éoliennes à base d'une GADA. La première partie va se baser sur un modèle mathématique simplifiant l'ensemble mécanique, de la turbine ainsi que ça coefficient de puissance et les zones de fonctionnement d'une éolienne. Nous consacrons la deuxième partie pour modéliser la GADA par des équations mathématiques non linéaires en se basant sur la transformation de Park. À la fin, nous présenterons la modélisation de convertisseur statique, le bus continu et le filtre RL.

2.2 Modélisation de la turbine éolienne

2.2.1 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, (figure I.10).

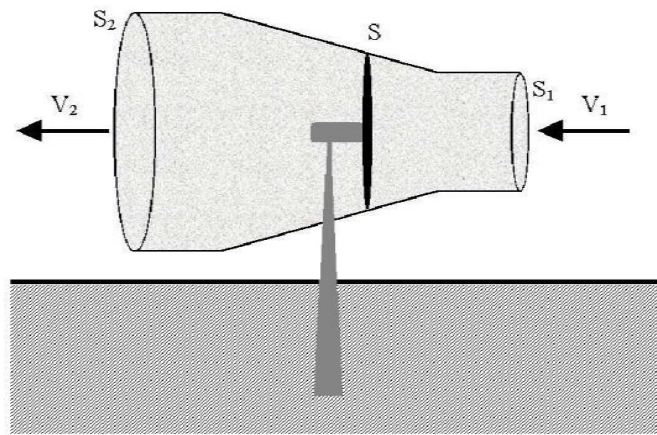


Figure 2.1 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

La puissance de la masse d'air P , qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donné :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (2.1)$$

Où ρ est la densité de l'air, égale à $1,225 \text{ kg/m}^3$, V_v est la vitesse du vent en m/s.

La théorie de Betz est une approche simplificatrice découverte en 1920 par le physicien allemand Albert Betz. Elle donne la quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être recueillie par une éolienne.

Cette quantité est définie par la limite de *Betz* :

$$P_m = P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot P_v = 0.59 \cdot P_v \quad (2.2)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut en aucun cas dépasser 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_p^{\max} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2P_{\max}}{\rho.S.V_v^3} \leq 0.59 \quad (2.3)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée :

$$\lambda = \frac{R.\Omega_{turb}}{V_v} \quad (2.4)$$

λ : Rapport de vitesse (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent) ;

Ω_{turb} : Vitesse de rotation avant le multiplicateur ;

R : Rayon des pales de l'aérogénérateur.

2.2.2 Coefficients de puissance

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine et de la vitesse du vent. On peut représenter la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et l'angle de l'orientation des pales β .

Sur le graphique ci-dessous, on remarque dans un premier temps que les aérogénérateurs à axe horizontal et à axe vertical de type Darrieus ont un meilleur rendement aérodynamique. De plus, leur coefficient de puissance décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Les aérogénérateurs "américains" ont un nombre de pales important car ils évoluent à de faibles vitesses de rotation. Ils produisent un couple aérodynamique important afin de produire de l'énergie mécanique (application de pompage).

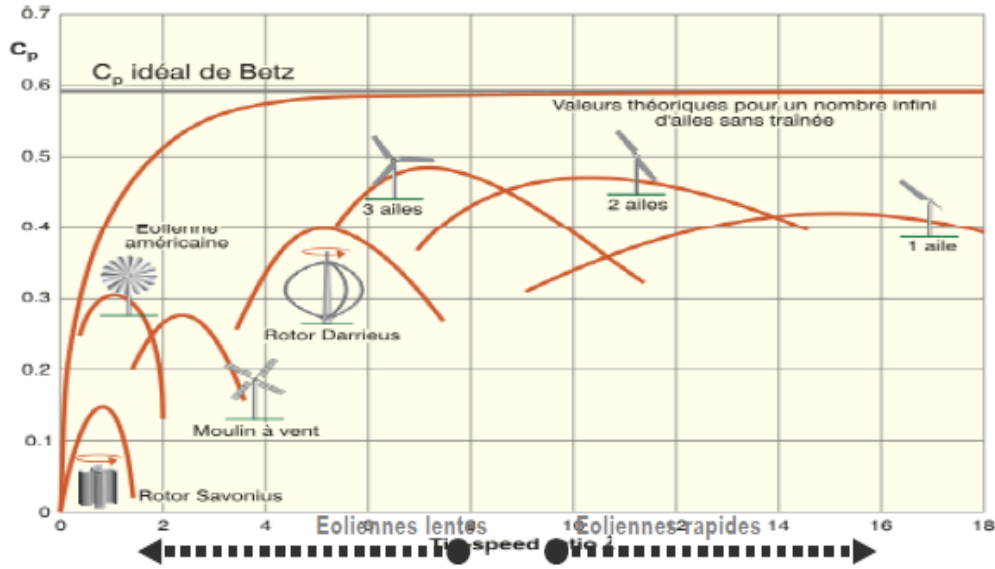


Figure 2.2 : Coefficient de puissance C_p pour différents types des turbines éoliennes[20]

Les éoliennes tri pales 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 atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent égale à 3 m/s.

Alors :

En combinant les équations (2.1), (2.2) et (2.3), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p(\lambda) \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (2.5)$$

Le couple C_T produit par cette éolienne (couple théorique) est alors déduit :

$$C_T = \frac{P_m}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_p(\lambda)}{\Omega_{turb}} \right) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (2.6)$$

En introduisant le terme $C_c(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$, appelé coefficient du couple, on obtient la relation

Suivante :

$$C_T = \frac{1}{2} C_c(\lambda) \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_v^2 \quad (2.7)$$

2.2.2.1 Approximation numérique

L'expression du coefficient de puissance de notre turbine éolienne étudiée de 2 MW est approximé par l'équation (2.8 [21]).

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} + \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \\ C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) \left(e^{\frac{-18.4}{\lambda_i}} \right) \end{cases} \quad (2.8)$$

A partir de cette expression nous avons présenté les courbes de coefficient de puissance en fonction de rapport de vitesse λ pour différents valeurs de l'angle de calage β :

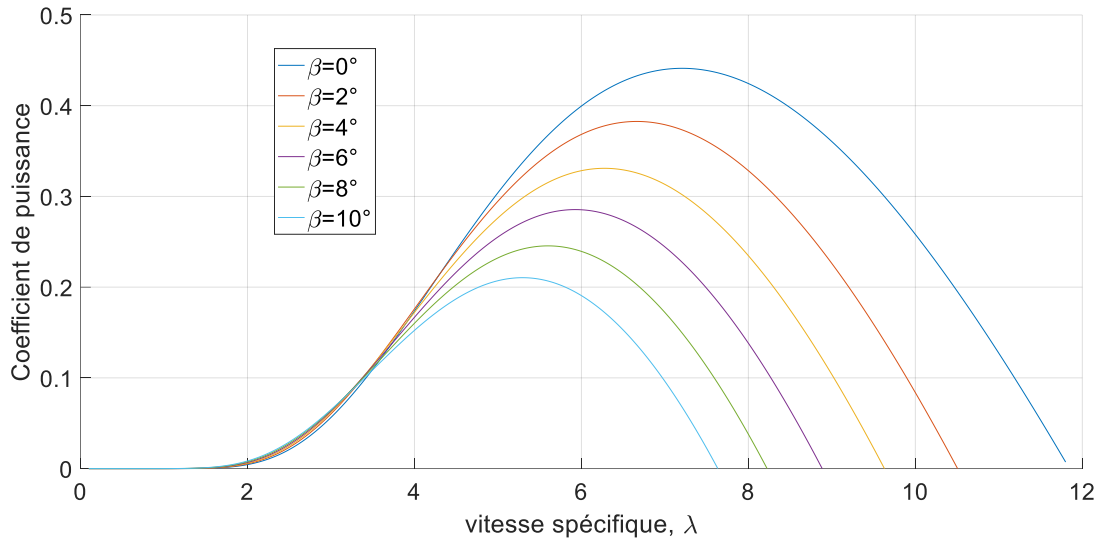


Figure 2.3 : Caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$

2.2.3 Fonctionnement à vitesse variable

Pour une vitesse du vent $V1$ et une vitesse mécanique Ω_1 de la génératrice, on obtient une puissance nominale $P1$ (point A) (Figure 1.18). Si la vitesse du vent passe de $V1$ à $V2$ et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (éolienne à vitesse fixe), la puissance $P2$ se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

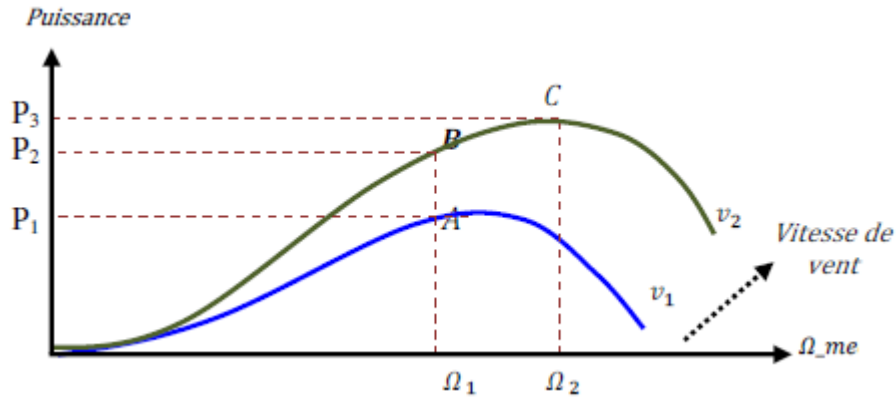


Figure 2.4 : Caractéristique de la puissance en fonction des vitesses

Nous avons présenté les résultats de simulation dans les courbes suivantes :

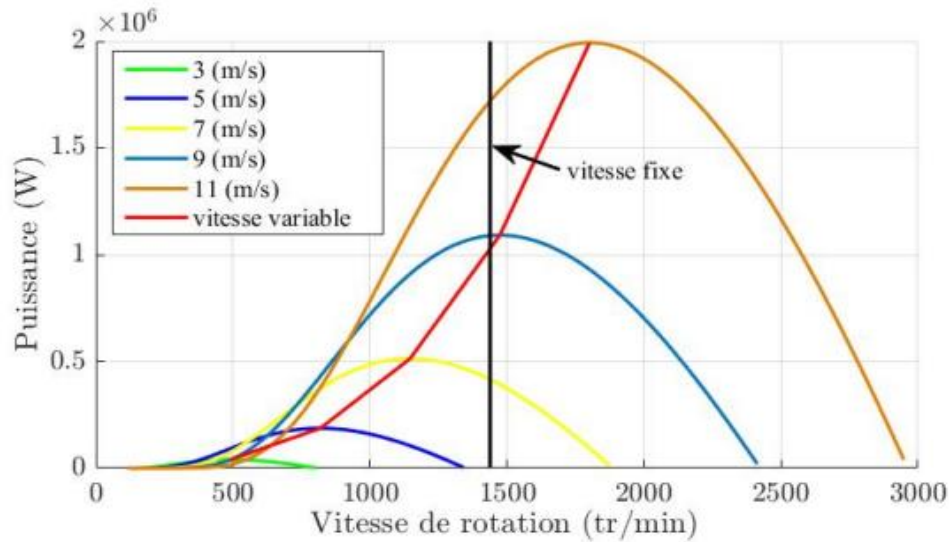


Figure 2.5 : caractéristiques de puissance des éoliennes à vitesse fixe et variable en fonction de la vitesse de rotation dans différentes vitesses de vent et extraction de maximum puissance

Théoriquement, la GADA au mode hyper-synchrone fonctionne normalement à une vitesse maximale de +30% par rapport au mode hypo synchrone. Donc, la puissance maximale que la machine produira à la fois du stator et du rotor peut être donnée approximativement par [21] [22]:

$$(P_r + P_s) \approx P_m = P_s (1 - g) = 2(1 + 0.3) = 2.6 \text{ MW} \quad (2.9)$$

Pratiquement, La turbine éolienne de puissance maximale 2,4 MW a été sélectionnée car elle sera de puissance suffisante pour être adaptée à une GADA de puissance nominale 2.0 MW[23].

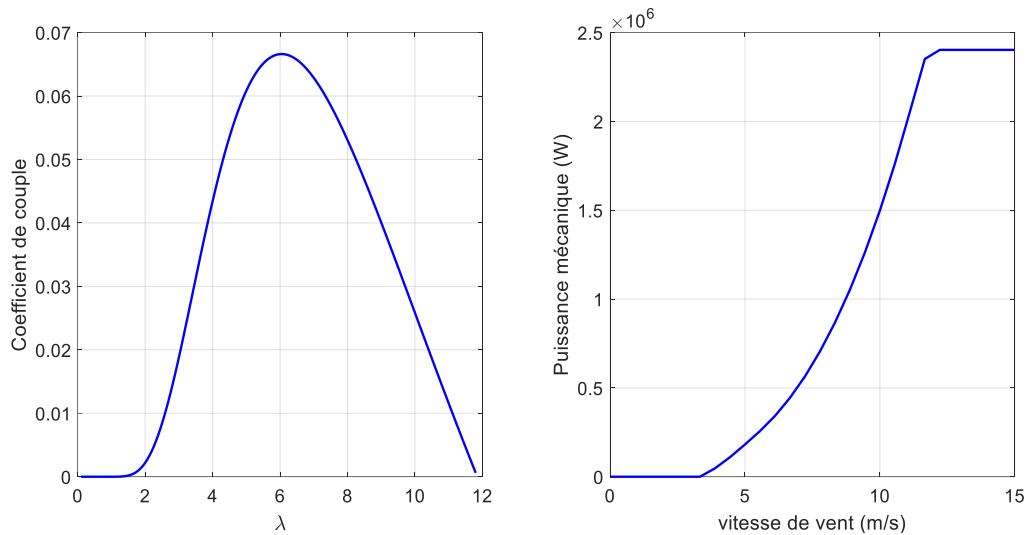


Figure 2.6 : Les caractéristiques réelles d'une éolienne de 2.4 MW à vitesse variable

2.2.4 Zones de commande de l'éolienne

Il y a trois zones de fonctionnement d'une éolienne intégrant une GADA pour un fonctionnement à charge partielle ou à pleine charge. Ces zones sont représentées sur la figure :

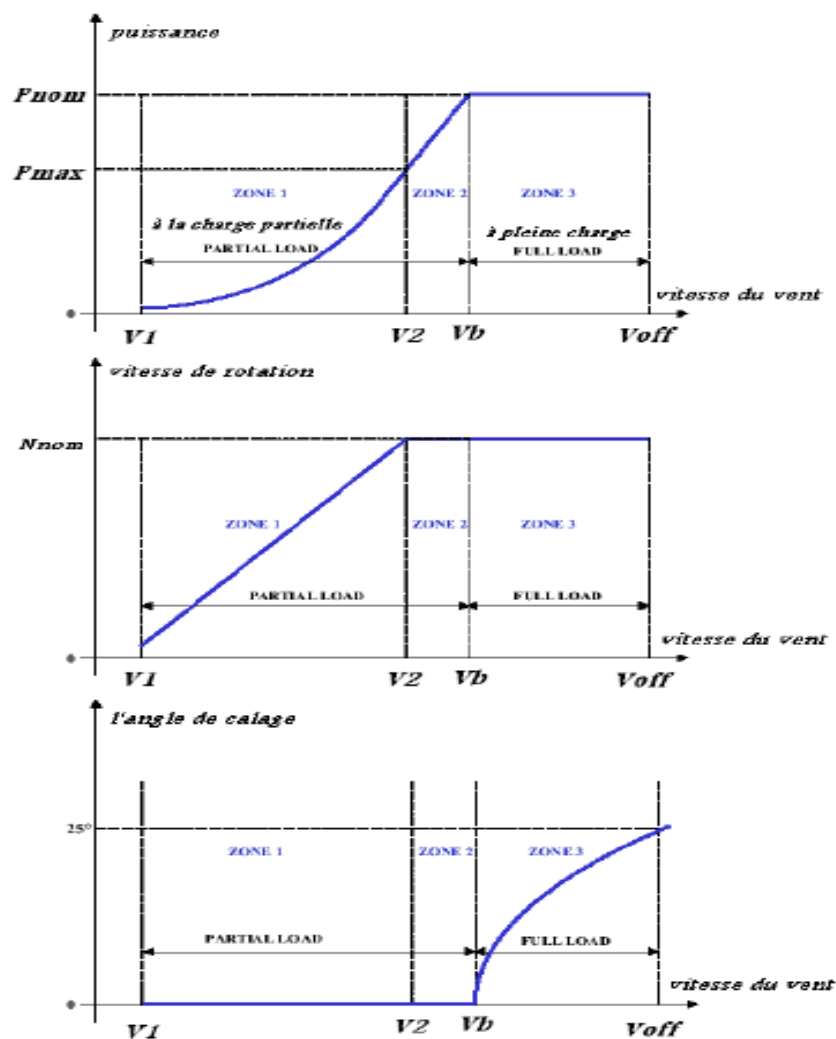


Figure 2.7 : Zones de fonctionnement de l'éolienne

Le fonctionnement à charge partielle vise à optimiser dans un premier temps la conversion énergétique jusqu'à limitation de la vitesse de rotation. Dans ce mode de fonctionnement, l'angle de calage des pales β est fixe. On distingue alors deux zones :

ZONE 1 ($\lambda_{opt}, C_{p_{max}}, \beta = 0$) : dans cette zone que l'on nomme charge partielle 1 on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de λ_{opt} . Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale $C_{p_{max}}$.

ZONE 2 ($N_{nom}, \beta = 0$) : cette zone fait toujours partie du mode de fonctionnement en charge partielle. On la nomme d'ailleurs charge partielle 2. Mais cette fois-ci on ne peut plus faire varier la vitesse de rotation de la machine car elle a atteint sa valeur nominale. La conversion énergétique ne peut donc plus être optimale et on va "dégrader" le coefficient de vitesse spécifique de l'éolienne.

Nous avons fixé l'angle de calage à 0° pour toute la zone de fonctionnement en charge partielle.

ZONE 3 (N_{nom}, P_{nom}) : dans cette dernière zone, la vitesse de rotation est toujours égale à sa valeur nominale mais cette fois la puissance délivrée par l'éolienne a atteint sa valeur nominale. Pour le fonctionnement à charge partielle, il faut maintenir constante la puissance électrique produite à sa valeur nominale en agissant sur l'angle de calage. On distingue une seule zone. Mais, pour le contrôle à pleine charge la puissance produite est constante et égale à sa valeur nominale en modifiant l'angle de calage des pales[1].

Il est noté que la plupart des éoliennes démarrent lorsque la vitesse du vent atteint une certaine valeur qui presque égale 3 m/s (Cut in) et s'arrêtent lorsque cette vitesse atteint 25 m/s (Cut out). Généralement, les éoliennes sont dimensionnées afin d'exploiter au mieux les vents de puissance intermédiaire.

2.3 Modélisation de la partie mécanique d'un système éolienne

2.3.1 Modèle de multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est l'adapter la vitesse lente de la turbine Ω_{turb} à la vitesse rapide de la génératrice Ω_m .

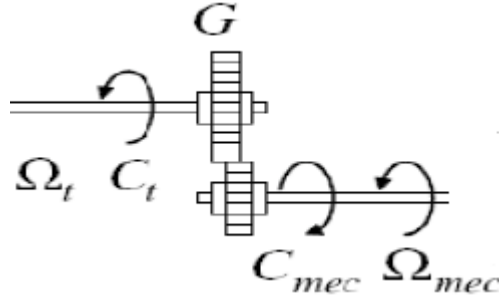


Figure 2.8 : Modèle mécanique simplifié de multiplicateur.

Il est modéliser par les deux équations suivantes :

$$C_{mec} = \frac{C_{turb}}{G} \quad (2.10)$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_{turb} \quad (2.11)$$

Avec :

G : Le gain de multiplicateur

C_{mec} : Le couple mécanique sur l'axe rapide.

Ω_{mec} : La vitesse mécanique de la génératrice.

2.3.2 Equation dynamique de l'arbre

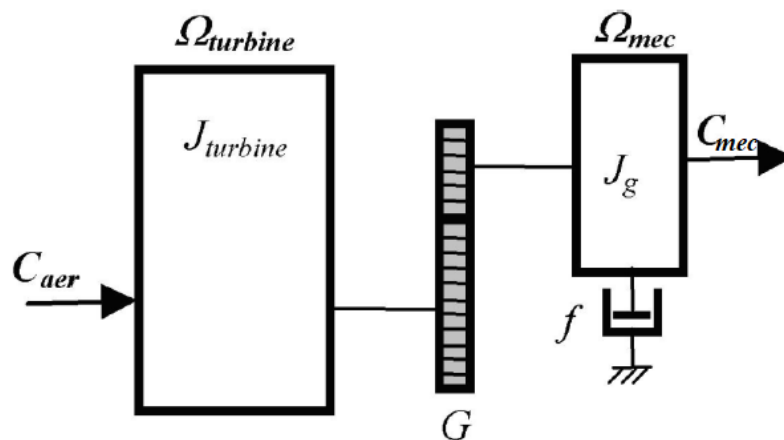


Figure 2.9 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne

Le modèle dynamique est déterminé par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{méc} - C_{em} - f \Omega_{méc} \quad (2.12)$$

Avec :

$$J = \frac{J_{turb}}{G^2} + J_g \quad (2.13)$$

Où :

J : Inertie totale de l'arbre de transmission $kg.m^2$.

J_{turb} : Inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

J_g : Inertie de la génératrice.

C_{em} : Couple électromagnétique $N.m$.

f : Coefficient de frottement dynamique $kg.m^2.s^{-1}$.

Le schéma bloc correspondant à l'ensemble de ces modélisations se traduit sur la Figure 2.3

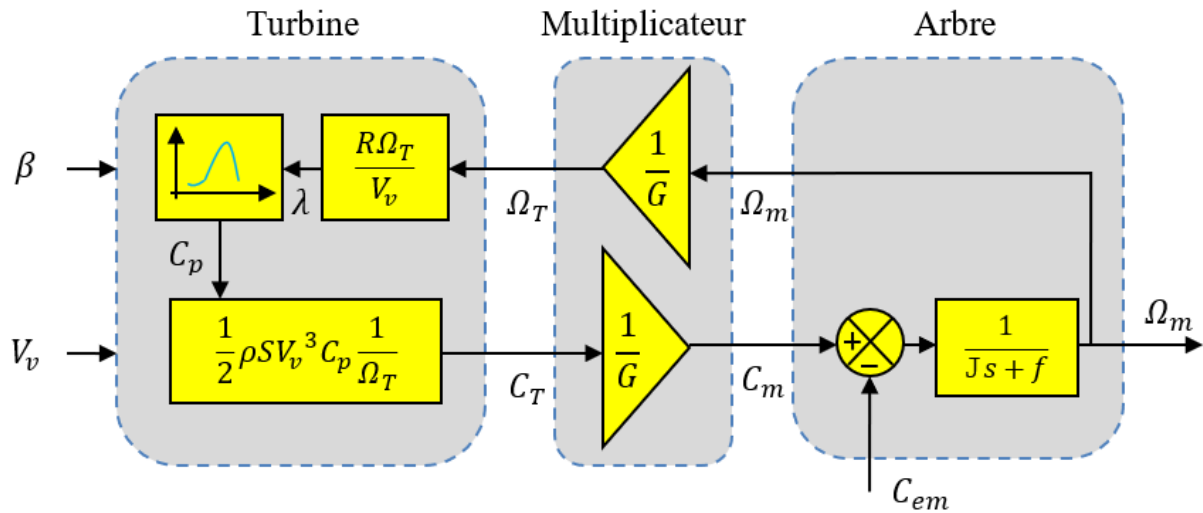


Figure 2.10 : Schéma bloc du modèle de la turbine

2.4 Modélisation de la MADA

2.4.1 Représentation du modèle

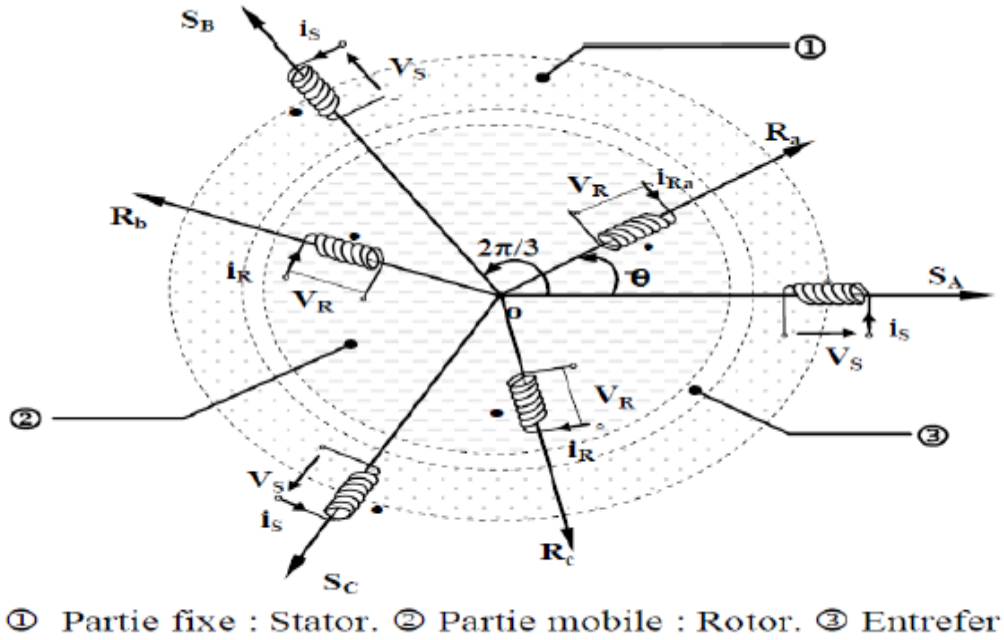


Figure 2.11 : Modèle triphasé généralisé de la GADA.

La vitesse de glissement de champ tournant par rapport au stator est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (2.11)$$

$\omega_s = 2\pi f$: La vitesse électrique de champ tournant (pulsation de réseau).

p : Nombre de paires de pôle.

Le rotor tourne par rapport au stator à la vitesse :

$$\Omega_{méc} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.12)$$

θ : L'angle de position entre le rotor et le stator.

2.4.2 Hypothèses simplificatrices

La GADA est une machine très complexe. Nous devons procéder à quelques simplifications pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la GADA).

On suppose que :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.

- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte le fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé. De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [24].

2.4.3 Equations de la GADA dans le repère triphasé

2.4.3.1 Equation électrique

La tension aux bornes d'un enroulement (de résistance R et d'une inductance L) parcourue par un courant I est donnée par :

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.13)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (2.14)$$

- R_s et R_r sont les résistances des enroulements respectivement statoriques et au rotoriques.
- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} et V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} sont les tensions simples respectivement au stator et au rotor.
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} et I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} sont les courant respectivement au stator et au rotor.
- $\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$ et $\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$ sont les flux propres circulant respectivement au stator et au rotor.

2.4.3.2 Equation magnétique

❖ Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par:

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

Ou sous forme condensée :

$$\begin{aligned} [\phi_{sabc}] &= [L_s][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \\ [\phi_{rabc}] &= [L_r][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \end{aligned} \quad (2.16)$$

Où :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} = l_s \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} = l_r \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Avec :

- l_s et l_r représentent les inductances propres statoriques et rotoriques ;

- $m_s = -\frac{l_s}{2}$ et $m_r = -\frac{l_r}{2}$ représentent les inductances mutuelles statoriques et rotoriques ;
- $[M_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor tel que $M_{\max}$ est la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor obtenue lorsque les bobinages sont vis à vis.

En remplaçant (2.15) dans (2.13) et (2.14), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [U_s] = [R_s][I_s] + [L_s] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d([M_{sr}][I_r])}{dt} \\ [U_r] = [R_r][I_r] + [L_r] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d([M_{rs}][I_s])}{dt} \end{cases} \quad (2.20)$$

Les équations modélisant la MADA dans les repères ABC sont fortement non linéaire et leur manipulation est très difficile d'où la nécessité d'utiliser un changement de variable pour rendre ce modèle exploitable.

A cet effet, on passe des axes naturels (sa, sb, sc) pour le stator et (ra, rb, rc) pour le rotor aux axes réunis pour le stator et le rotor $(\alpha\beta)$ varient en fonction du temps puis aux (d, q) invariant dans le temps qui tournent avec une vitesse quelconque ω_{coor} . Le modèle de cette machine est représenté sur la figure (2.12)

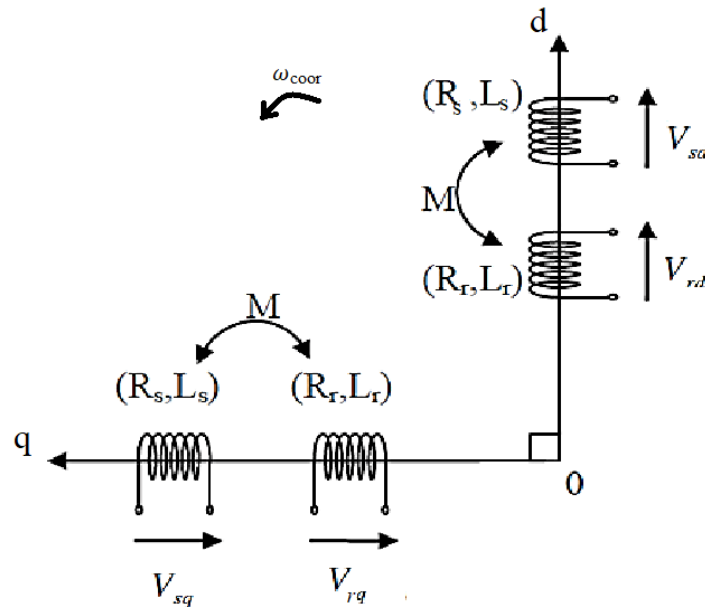


Figure 2.12 : Modèle généralisé biphasé

Du moment que le rotor est immobile par rapport au stator, l'inductance mutuelle entre les enroulements du stator et du rotor devient une valeur constante et les coefficients des dérivées des courants sont également constants[25].

2.4.4 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) dans le plan de Park

2.4.4.1 Transformation de Park

La transformation de *Park* conserve des grandeurs d'amplitude mais ni la puissance ni le couple (on doit multiplier par un coefficient $m=3/2$).

- La transformation de *Park* modifiée définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ est donnée sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} [x_{dqo}] &= [P(\theta)][x_{abc}] \\ [P(\theta)] &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} [x_{abc}] &= [P(\theta)]^{-1} [x_{dqo}] \\ [P(\theta)]^{-1} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Avec : θ est l'angle électrique.

- $\theta = \theta_{\text{coor}}$: pour les grandeurs statoriques.
- $\theta = \theta_r = \theta_{\text{coor}} - \theta_e$: pour les grandeurs rotoriques.

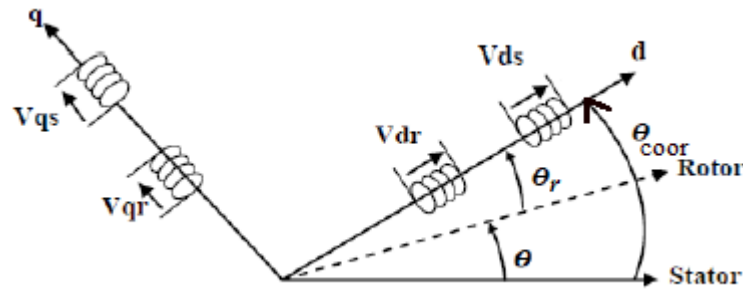


Figure 2.13 : Représentation de la machine dans le repère biphasé de Park

2.4.4.2 Choix de référentiel

- ❖ Le système d'axes (d, q) lié au champ tournant est recommandé pour étudier les machines à double alimentation, les machines asynchrones, en particulier, les moteurs asynchrones à commande fréquentielle[26] car les tensions du stator sont des tensions continues et ne dépend pas de la fréquences du réseau [25].

Dans notre travail, nous avons choisi de fixer le repère $d-q$ au champ tournant, Ce système est immobile par rapport au champ tournant c.a.d tourne avec la vitesse du champ électromagnétique ω_s crée par les enroulements du stator donc $\omega_{coord} = \omega_s$, ce qui permet d'avoir des grandeurs constantes dans le régime permanent, et donc une régulation plus aisée.

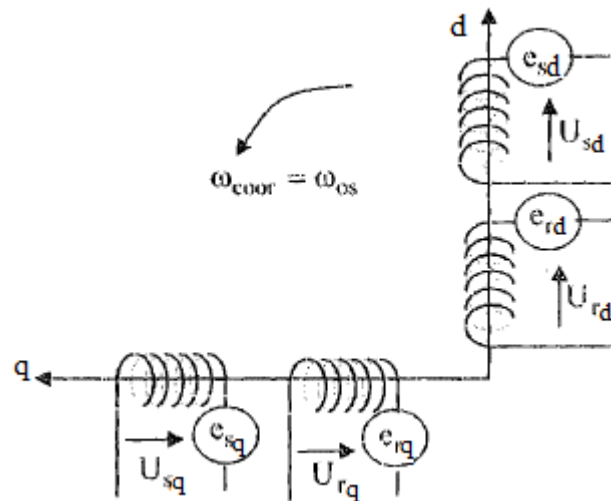


Figure 2.14 : Repère liée au champ tournant[26]

2.4.4.3 Equation électrique

Après développement le système d'équations statorique et rotorique les tensions est comme suit

$$\begin{aligned}
 V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\
 V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\
 V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\
 V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

V_{sd}, V_{sq} et V_{rd}, V_{rq} : les tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park.

i_{sd}, i_{sq} et i_{rd}, i_{rq} : les courants statoriques et rotoriques dans le repère de Park.

ϕ_{sd}, ϕ_{sq} et ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : les flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park.

$\omega_s - \omega = \omega_r$: la vitesse angulaire du système d'axes (d, q) par rapport au rotor tournant à la vitesse ω .

2.4.4.4 Equation magnétique

Les équations de flux deviennent :

$$\begin{aligned}
 \phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\
 \phi_{sq} &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \\
 \phi_{rd} &= L_r i_{rd} + M i_{sd} \\
 \phi_{rq} &= L_r i_{rq} + M i_{sq}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

L_s : Inductance cyclique rotorique.

L_r : Inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2} M_{\max}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

2.4.4.5 Les expressions des puissances active et réactive

$$\begin{aligned}
 P_s &= \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \\
 P_r &= \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \\
 Q_s &= \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \\
 Q_r &= \frac{3}{2} (V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq})
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

2.4.4.6 Le couple électromagnétique

$$\begin{aligned}
 C_{em} &= p(\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \\
 C_{em} &= \frac{3}{2}pM(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) \\
 C_{em} &= \frac{3}{2}p\frac{M}{L_s}(\phi_{sq}i_{rd} - \phi_{sd}i_{rq})
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

2.4.4.7 Equation mécanique

$$J_g \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \tag{2.27}$$

Où :

Ω : Vitesse mécanique de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

J_g : Moment d'inertie.

2.5 Modélisation de convertisseur

2.5.1 Construction du convertisseur directionnel

* L'onduleur de tension à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) est un convertisseur statique DC-AC constitué des cellules de commutation généralement à transistors IGBT ou à thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tension à amplitudes et fréquence variables à partir d'une tension continue, après redressement.

* Un redresseur triphasé à (MLI) est un convertisseur statique AC-DC. Son circuit principal est similaire à celui d'un onduleur, constitué par des interrupteurs statiques bidirectionnels en courant, unidirectionnels en tension. La partie continue est connectée à un condensateur jouant le rôle d'accumulateur d'énergie, monté en parallèle avec l'onduleur.

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance soit un onduleur ou un redresseur, (constitués des diodes en anti-parallèles et d'IGBT commandés en ouverture et en fermeture par la technique MLI) dans le repère triphasé naturel. Le convertisseur considéré dans notre étude, est celui relié soit au réseau par l'intermédiaire d'un filtre (R, L) soit au rotor de la GADA[1].

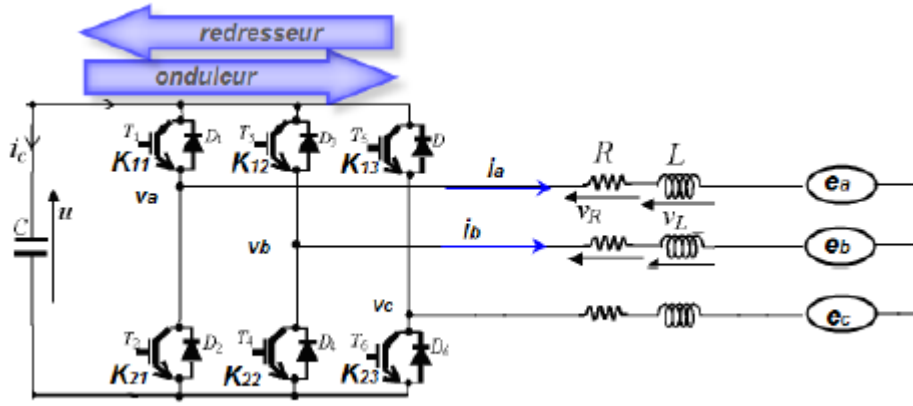


Figure 2.15: Schéma électrique d'un convertisseur MLI triphasé

Les couples d'interrupteurs (K11 et K21), (K12 et K22), (K13 et K23) 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 ($i=1,2,.. 6$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des transistors.

En supposant un mode de fonctionnement continu, chaque ensemble transistor-diode peut être considéré comme un interrupteur idéal, bidirectionnel en courant et unidirectionnel en tension. L'emploi de la technique MLI pour déterminer les intervalles de conduction des interrupteurs permet de régler de manière indépendante les valeurs moyennes de chacune des tensions U_{an}, U_{bn}, U_{cn} sur chaque période de commutation. Dans ce cas les instants de commutation sont déterminés par la comparaison de trois ondes de référence déphasées d'un tiers de période les unes par rapport aux autres avec une onde porteuse qui fixe la fréquence de commutation. Cette comparaison fournit trois signaux logiques S_1, S_2 et S_3 qui valent 1 quand les interrupteurs du côté haut sont en conduction et ceux de côté bas sont bloqués et valent 0 dans le cas contraire. A partir de ces signaux l'électronique de commande élabore les signaux de commande des interrupteurs[1].

2.5.2 Modèle des convertisseurs de puissance dans le repère naturel

Les tensions de sortie des trois phases d'un convertisseur (les tensions composées) :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = U_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

On aura alors trois tensions possibles aux bornes des phases : 0, $-u_c$ et $+u_c$

S_1, S_2, S_3 : Sont les valeurs d'états des interrupteurs K11, K12, K13.

S_1', S_2', S_3' : Sont les valeurs d'états des interrupteurs K21, K22, K23.

Les interrupteurs de chaque bras sont commandés de manière complémentaire.

Donc $S + S' = 1$

$S_1 = 1$: L'interrupteur à l'état fermé.

$S_1' = 0$: L'interrupteur à l'état ouvert.

Si les références forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales on obtient à la sortie de l'onduleur des ondes de tension dont les « valeurs moyennes » forment elles aussi un système triphasé équilibré. On parle dans ce cas d'une modulation sinus-triangle. Donc le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Tableau 2.1 : Table de vérité d'un onduleur commandé par MLI

Etat	Vecteur de commutation			Les tensions composées			Les tensions simples		
	S_1	S_2	S_3	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
V_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_1	U_c	0	0	U_c	0	$-U_c$	$(2/3)U_c$	$-(1/3)U_c$	$-(1/3)U_c$
V_2	U_c	U_c	0	0	U_c	$-U_c$	$(1/3)U_c$	$(1/3)U_c$	$-(2/3)U_c$
V_3	0	U_c	0	$-U_c$	U_c	0	$-(1/3)U_c$	$(2/3)U_c$	$-(1/3)U_c$
V_4	0	U_c	U_c	$-U_c$	0	U_c	$-(2/3)U_c$	$(1/3)U_c$	$(1/3)U_c$
V_5	0	0	U_c	0	$-U_c$	U_c	$-(1/3)U_c$	$-(1/3)U_c$	$(2/3)U_c$
V_6	U_c	0	U_c	U_c	$-U_c$	0	$(1/3)U_c$	$-(2/3)U_c$	$-(1/3)U_c$
V_7	U_c	U_c	U_c	0	0	0	0	0	0

Si i_a, i_b, i_c sont les courants de la partie alternative, le courant dans la partie continue peut être obtenu à partir de la loi de conservation de puissance.

$$u_c i_c = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.30)$$

En remplaçant les tension v_a, v_b, v_c par leur expression, on trouve :

$$i_c = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & S_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.5.3 Modèle de bus continu

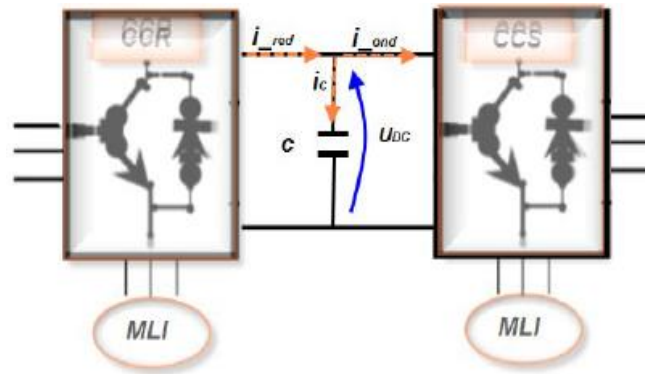


Figure 2.16 : Schéma équivalent pour le circuit du bus continu

L'évolution temporelle de la tension de bus continu est obtenue à partir de l'intégration de courant capacitif :

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (2.31)$$

Le courant de condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur figure ...

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (2.32)$$

On a également :

$$U_c = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad (2.33)$$

Où $u(t_0)$ est la valeur de la tension à l'instant initial t_0

2.5.4 Modèle de filtre RL

Selon la loi des tensions de Kirchhoff, les tensions de filtre (R_f, L_f) connecté au réseau est donné ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{af} = R_f + L_f \frac{d}{dt} i_{ag} + V_{ag} \\ V_{bf} = R_f + L_f \frac{d}{dt} i_{bg} + V_{bg} \\ V_{cf} = R_f + L_f \frac{d}{dt} i_{cg} + V_{cg} \end{cases} \quad (2.34)$$

À travers une transformation $abc \rightarrow \alpha\beta$, puis une transformation $\alpha\beta \rightarrow dq$, nous pouvons obtenir l'équation de tension dans le repère tournant :

$$\begin{cases} V_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{d}{dt} i_{dg} + V_{dg} - \omega_s L_f i_{qg} \\ V_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{d}{dt} i_{qg} + V_{qg} - \omega_s L_f i_{dg} \end{cases} \quad (2.35)$$

2.6 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. 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.

Dans la dernière partie, nous avons modélisé les convertisseurs statiques intégrés dans le système étudié et le filtre et le bus continu de système en expliquant leurs principes de fonctionnements.

CHAPITRE 3

SYNTHESE ET SIMULATION DES LOIS DE COMMANDE

3.1 Introduction

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions générées par le convertisseur, aux puissances actives et réactives [27]. Pour la réalisation de ce contrôle nous avons utilisé la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentée. La technique de la commande appliquée à cette machine est réaliser aux moyens des régulateurs PI pour les puissances actives et réactives.

La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation de toute la chaîne de conversion pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la génératrice, validant ainsi la commande établie.

3.2 Stratégie de la commande

La figure 3.1 illustre la configuration du système global étudié. L'aéroturbine capte une partie P_m de la puissance P_v , contenue dans le vent, puis la machine électrique la transforme en puissance électrique. La plus grande partie de celle-ci est transférée au réseau directement par le stator de la machine, alors que le reste (moins de 30%) y est transféré à travers le rotor et les deux convertisseurs côté machine (CCM) et réseau (CCR).

Le convertisseur CCM est commandé par une MLI (PWM) dont les consignes proviennent d'une commande vectorielle de la MADA. Cette commande permet de contrôler le couple électromagnétique C_{em} de la machine (la puissance active P_s) et la puissance réactive Q_s échangée entre le stator et le réseau. La commande par MLI du convertisseur CCR contrôle la tension dans le bus continu V_{dc} et l'énergie réactive échangée entre le rotor de et le réseau.

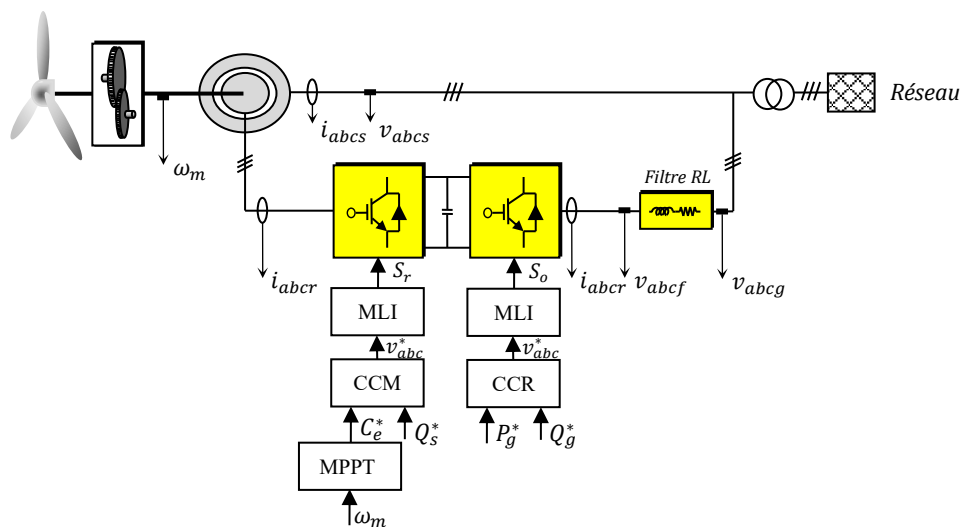


Figure 3.1 : Configuration de la chaîne de conversion éolienne à base de la GADA et sa commande

La commande du CCM consiste à donner les références de puissance active selon des critères d'optimisation de la puissance électrique produite et la référence de puissance réactive selon les critères du réseau (facteur de puissance).

3.3 Principe de la MPPT

La MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une stratégie de contrôle très fiable et simple à implémenter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée pour un angle de calage « Beta » donnée de sorte à avoir à tout moment un coefficient de puissance optimale C_p^{opt} correspondant à une vitesse relative λ_{opt} .

La vitesse de rotation de la machine est contrôlée par le couple électromagnétique. Cette stratégie de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence[28].

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du rapport de vitesse « λ_{opt} » (pour notre étude on a pris un angle de calage fixe $\beta = 0^\circ$ pour un fonctionnement optimal)[28] d'après la courbe de la figure (2.3).

Nous pouvons donc réécrire l'équation (2.4) de la façon suivante :

$$\Omega_{turb-opt} = \frac{V_v \cdot \lambda_{opt}}{R} \quad (3.1)$$

3.3.1 Le contrôle sans asservissement de la vitesse (commande en couple optimal - OTC)

Depuis l'équation dynamique de la turbine, nous avons : En mode permanent, on peut écrire (en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux) : $C_m = C_{em}$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple de vent [29].

$$V_{v-estimé} = \frac{\Omega_{turb} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (3.2)$$

Lorsque la turbine fonctionne au point de puissance maximale, alors : $\lambda = \lambda_{opt}$ et $C_p = C_p^{opt}$

Le couple électromagnétique de référence doit être régulé avec la valeur suivante :

$$C_{em-réf} = \frac{C_{T-estimé}}{G} \quad (3.3)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p-opt} .

A partir de l'équation (2.6) et (3.2) le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur :

$$C_{em-réf} = \frac{C_{p-opt}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \pi R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{méc}^2}{G^3} \quad (3.3)$$

Par conséquent :

$$C_{em-réf} = K_{opt} \cdot \Omega_m^2 \quad (3.4)$$

$$\text{Où : } K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot R^3 \frac{C_p^{opt}}{\lambda_{opt}^3 G^3} \quad (3.5)$$

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse du générateur.

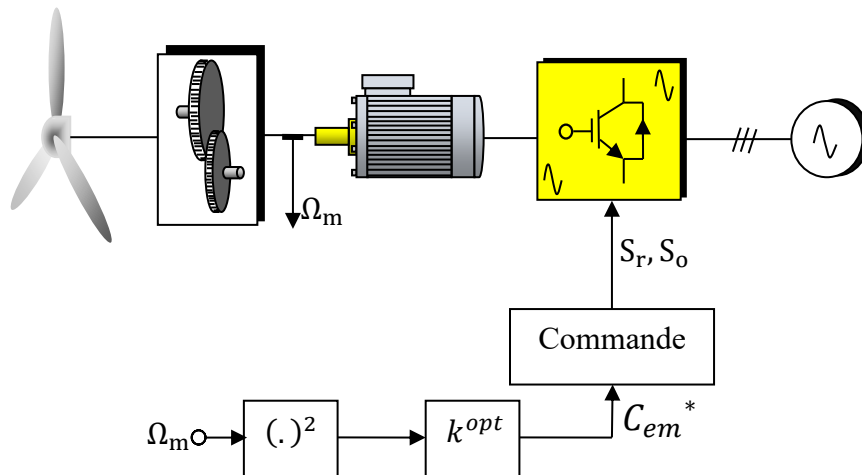


Figure 3.2. : MPPT basée sur la commande en couple optimal - OTC

3.4 Technique de commande MLI (PWM)

Elle consiste à convertir une modulante tension de référence (au niveau de commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs. Le signal modulé est généré à la sortie de convertisseur (au niveau de puissance). Le principe de modulation MLI repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). Dans ce travail, on va utiliser la MLI naturelle en se basant sur la comparaison entre deux signaux pour commander chaque bras du convertisseur[1].

La commande considérée où les deux convertisseurs CCM et CCR sont commandés par des techniques MLI dérivées de la commande vectorielle.

3.5 Commande vectorielle

La commande vectorielle des machines à courant alternatif est effectuée par un découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. L'application de la commande vectorielle introduite par Blaschk en 1972 constitue une révolution pour le contrôle de la machine [30], cette technique consiste à ramener le comportement de la machine semblable à celui d'un moteur à

courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit qui fournit le couple électromagnétique. Ceci est réalisé par une orientation convenable de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. La commande vectorielle à flux orienté est très utilisée dans le domaine de l'énergie éolienne, et ce, autant pour les MAS à cage que les MADA. La différence entre ces deux machines est que la MAS à cage est manipulable uniquement via son stator, contrairement à la MADA où les grandeurs rotoriques sont accessibles ce qui donne une meilleure flexibilité à la commande de cette dernière.

Le principe du contrôle vectoriel réside dans l'orientation du flux dans la machine au stator, au rotor ou dans l'entrefer suivant l'un des deux axes d ou q . Par conséquent, on peut commander indépendamment les deux puissances active et réactive au stator de la machine à induction.

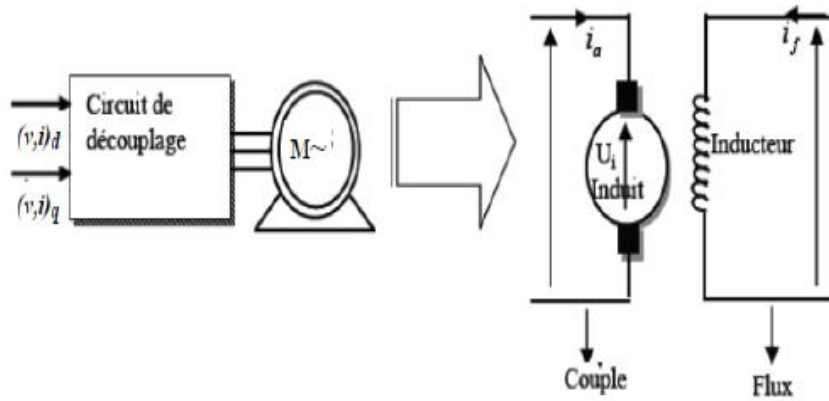


Figure 3.3 : Principe de la commande vectorielle[1]

3.6 Technique d'orientation du flux

Notre commande par orientation du flux, consiste à aligner le flux statorique suivant l'axe d du référentiel tournant, (Figure 3.4). On a donc :

$$\phi_{sd} = \phi_s \text{ et par suite } \phi_{sq} = 0.$$

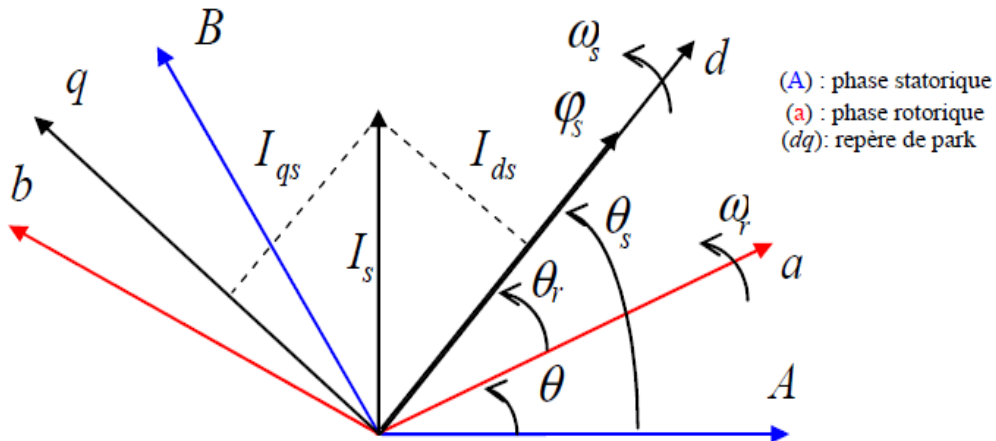


Figure 3.4 : Orientation de l'axe d sur le flux statorique[31]

Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statoriques θ_s et pour les grandeurs rotoriques θ_r , nous pouvons utiliser une boucle à verrouillage de phase appelée plus communément PLL (Phase Locked Loop). Cette PLL permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau [32].

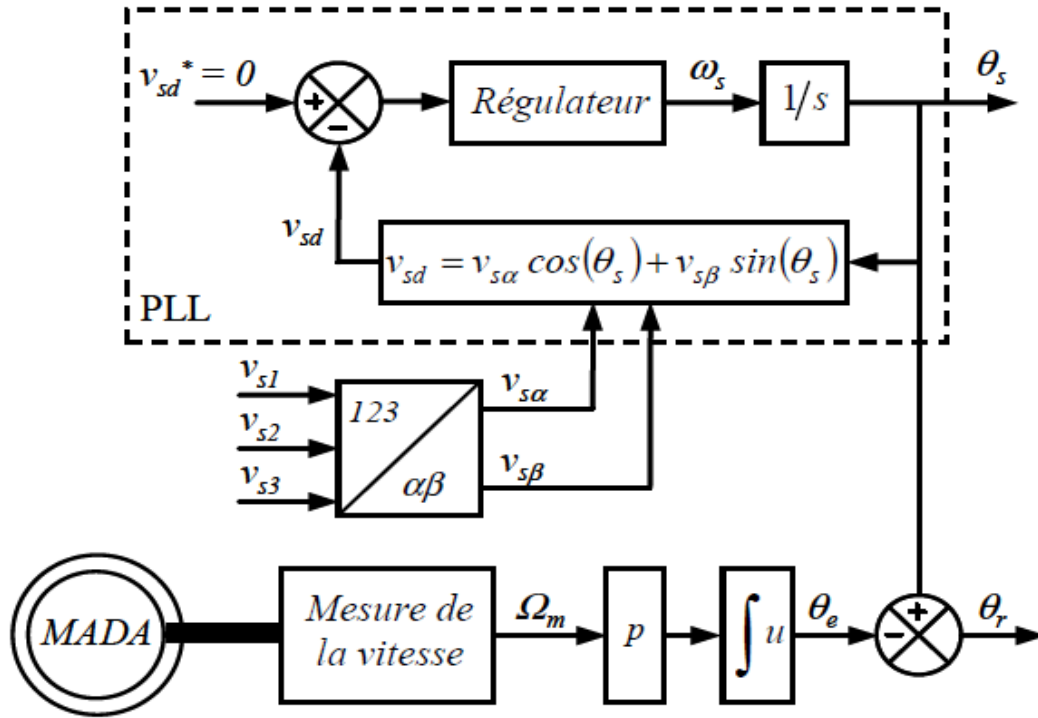


Figure 3.5 : Etablissement des angles de transformation à l'aide d'une PLL[28].

La phase rotative forme un angle électrique θ_e avec la phase statorique. C'est l'angle θ_r . Les transformations de rotor nécessaires sont le résultat d'angles de soustraction θ_s et θ_e . Pour la méthode décrite ici, il est nécessaire d'avoir un capteur de tension et un capteur de vitesse pour établir ces différents angles[33].

Le couple électromagnétique de l'équation (2.26) s'écrit alors :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \phi_{sd} i_{rq} \quad (3.6)$$

Et l'équation (2.24) des flux devient :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = 0 = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \quad (3.7)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple V_s , cela conduit à un flux statorique ϕ_s constant. Cette considération associée à l'équation (3.6) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature i_{qr} [27].

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques (2.23) de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s \end{cases} \quad (3.9)$$

A l'aide de l'équation (3.7), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (3.10)$$

Les puissances actives et réactives statoriques (2.25) s'écrivent d'après l'équation (3.9) par :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s i_{sq} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s i_{sd} \end{cases} \quad (3.11)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (3.10) :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(-V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} + V_s \frac{\phi_s}{L_s} \right) = \frac{3}{2} \left(-V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \right) \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\text{tel que } \phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

Pour pouvoir contrôler les puissances active et réactive de la génératrice, il nous faut établir les relations entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliquées à la machine. Pour cela, exprimons d'abord les flux rotoriques. En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions (3.10) dans l'équation des flux (2.24), nous obtenons :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{MV_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rq} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (3.13)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées (2.23). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \omega_s \frac{MV_s}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\text{tel que : } g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \Rightarrow \omega_s - \omega = \omega_r = g \omega_s$$

Où g correspond le glissement.

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.15)$$

Les équations précédentes permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure (3.6).

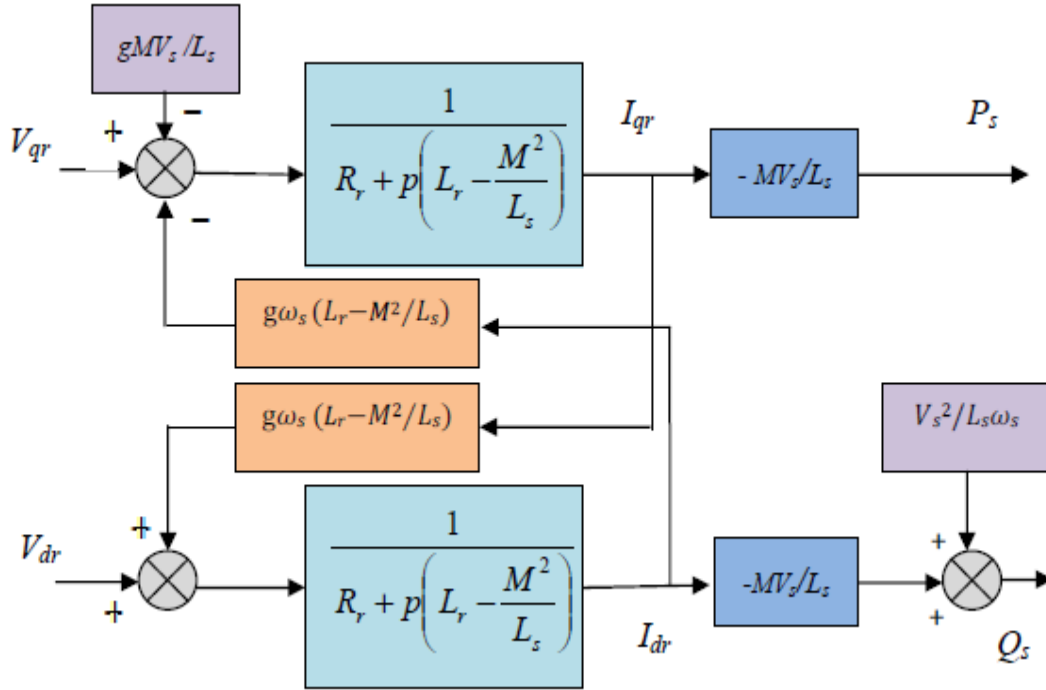


Figure 3.6 : Schéma bloc du système à réguler.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q , pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs[31].

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.16)$$

On peut écrire d'une autre manière :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \cdot \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_r \sigma L_r \cdot i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \cdot \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_r \sigma L_r \cdot i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad (3.17)$$

Où le coefficient de dispersion $\left(\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right)$.

Alors, en régime permanent :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_r \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_r \sigma L_r i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad (3.18)$$

3.7 Commande vectorielle indirecte

La méthode indirecte a été introduite par K. Hasse. Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et 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 [34].

La commande vectorielle indirecte 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[31].

- ❖ Notre commande vectorielle est indirecte et sans asservissement de vitesse (contrôle indirect de vitesse).

3.8 Commande de convertisseur coté machine CCM

Pour cette commande, les équations du générateur (GADA) sont données pour un système de référence lié au flux du stator. Ce système de référence correspond aux axes (d, q) . Il permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du générateur ou encore celles du flux et du couple[1].

La composante quadratique du rotor i_{rq} contrôle le couple électromagnétique (la puissance active P_s débité au réseau) et la composante directe i_{rd} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

Les deux composantes du courant au rotor sont commandées par deux régulateurs PI donnant les références de la tension au rotor. Cette tension est ensuite commandée par une MLI dérivées de la commande vectorielle.

Par conséquent, le couple et la puissance réactive sont contrôlés indépendamment l'un de l'autre.

L'expression du couple dans le repère dq peut être simplifiée comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \phi_s i_{rq} \Rightarrow C_{em-réf} = K_T i_{rq-réf} \quad (3.19)$$

$$\text{Où : } K_T = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \phi_s$$

Et l'expression de la puissance réactive du stator dans le repère dq :

$$Q_s = -\frac{3}{2} \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \left(i_{rd} - \frac{\phi_s}{M} \right) \Rightarrow Q_s^{réf} = K_Q \left(i_{rd}^{réf} - \frac{\phi_s}{M} \right) \quad (3.20)$$

$$\text{Où : } K_Q = -\frac{3}{2} \omega_s \frac{M}{L_s} \phi_s \quad \text{et} \quad \frac{\phi_s}{M} = i_{ms} \quad \text{avec : } i_{ms} \text{ est le courant de magnétisation.}$$

La structure générale de contrôle CCM est illustrée à la figure (3.7).

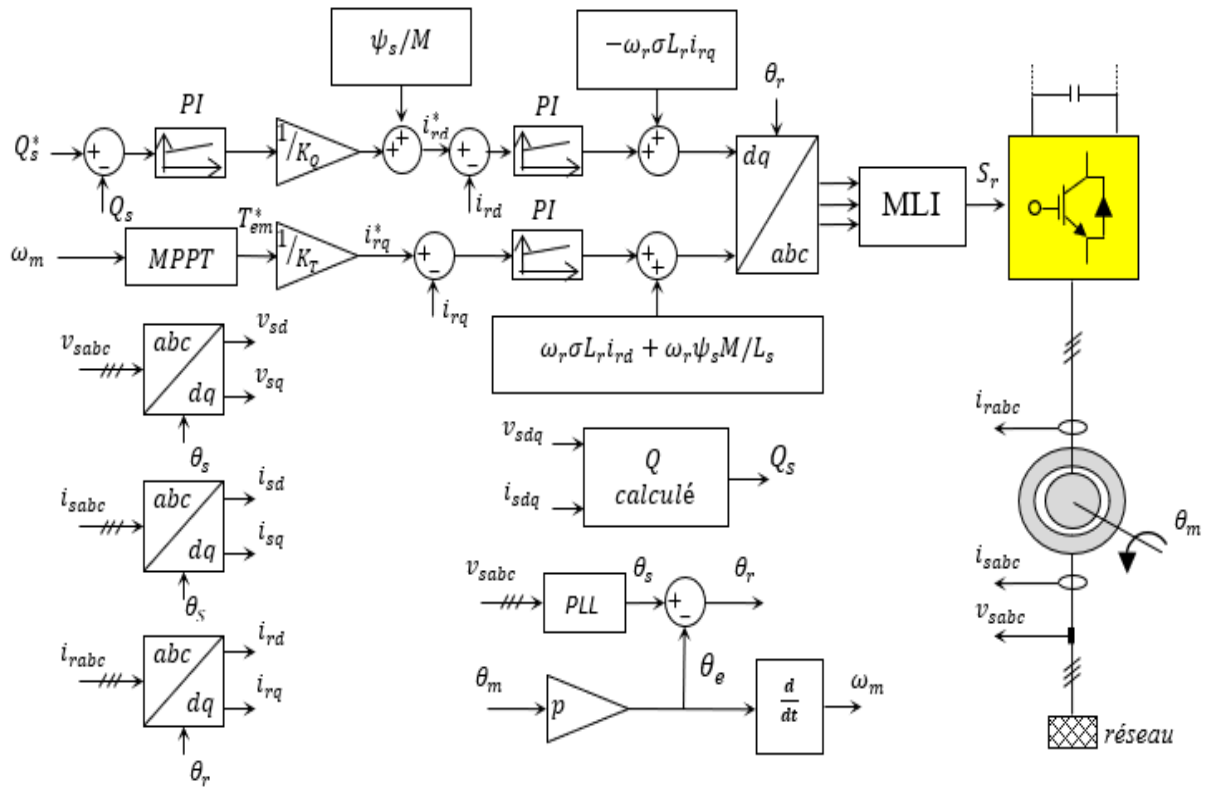


Figure 3.7 : Schéma synoptique de commande du convertisseur coté machine CCM

3.9 Commande du convertisseur coté réseau CCR

Le CCR est connecté entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre (R_f , L_f). Ce convertisseur a deux rôles :

- 1) maintenir la tension du bus continu constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA[35].

2) maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique.

Dans le repère (d, q) lié au champ tournant statorique, les équations (2.34) et (2.35) deviennent :

$$\begin{cases} V_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + V_{dg} - \omega_s L_f i_{qg} \\ V_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + V_{qg} + \omega_s L_f i_{dg} \end{cases} \quad (3.21)$$

Les équations du filtre sont reportées au système de référence commun lié au vecteur de la tension de réseau. Il permet de découpler les expressions des puissances active et réactive du rotor afin de stabiliser la tension de bus continu et l'échange en qualité d'énergie réactive avec le réseau[5].

Alors selon le concept de la commande vectorielle, on trouve les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{dg} = V_g \\ V_{qg} = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

C'est-à-dire :

$$\begin{cases} V_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + V_{dg} - \omega_s L_f i_{qg} \\ V_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_f i_{dg} \end{cases} \quad (3.23)$$

L'expression du puissance active dans le repère dq peut être simplifiée comme suit :

$$P_g = \frac{3}{2} (V_{dg} i_{dg} + V_{qg} i_{qg}) = \frac{3}{2} V_g i_{dg} \Rightarrow i_{dg}^{ref} = K_{Pg} P_g^{ref} \quad (3.24)$$

$$\text{Où : } K_{Pg} = \frac{2}{3V_g}$$

La puissance active est proportionnelle au i_{dg} .

L'expression du puissance réactive dans le repère dq peut être simplifiée comme suit :

$$Q_g = \frac{3}{2} (V_{qg} i_{dg} - V_{dg} i_{qg}) = -\frac{3}{2} V_g i_{qg} \Rightarrow i_{qg}^{ref} = K_{Qg} Q_g^{ref} \quad (3.25)$$

$$\text{Où : } K_{Qg} = -\frac{2}{3V_g}$$

La puissance réactive est proportionnelle au i_{qg} .

La composante directe i_{df} permet de contrôler la puissance active et par conséquent la tension du bus continu. La composante quadratique i_{qf} contrôle la puissance réactive échangée entre le rotor et le réseau[36].

Les deux composantes du courant sont commandées par deux régulateurs PI donnant les références de la tension au filtre. Cette tension est ensuite commandée par une MLI dont les consignes proviennent d'une commande vectorielle.

3.9.1 Contrôle de la tension du bus continu

A partir de l'équation (1.32), nous pouvons exprimer les puissances mises en jeu sur le bus continu :

$$\begin{aligned} P_{red} &= V_{dc} \cdot i_{red} \\ P_c &= V_{dc} \cdot i_c \\ P_{ond} &= V_{dc} \cdot i_{ond} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Ces puissances sont liées par la relation :

$$P_{red} = P_c + P_{ond} \quad (3.27)$$

Si l'on néglige l'ensemble des pertes Joule devant la puissance échangée entre le rotor de la MADA et le réseau électrique (pertes dans le condensateur, le convertisseur et le filtre RL), on peut alors écrire :

$$P_f = P_{red} = P_c + P_{ond} \quad (3.28)$$

En réglant la puissance P_f , il est alors possible de contrôler la puissance P_c dans le condensateur et donc de réguler la tension du bus continu. Pour ce faire, les puissances P_{ond} et P_c doivent être connues afin de déterminer $P_{f-réf}$.

La référence de puissance pour le condensateur est liée au courant de référence circulant dans le condensateur :

$$P_c^{réf} = V_{dc} \cdot i_c^{réf} \quad (3.29)$$

La structure générale de contrôle CCR est illustrée à la figure (3.8).

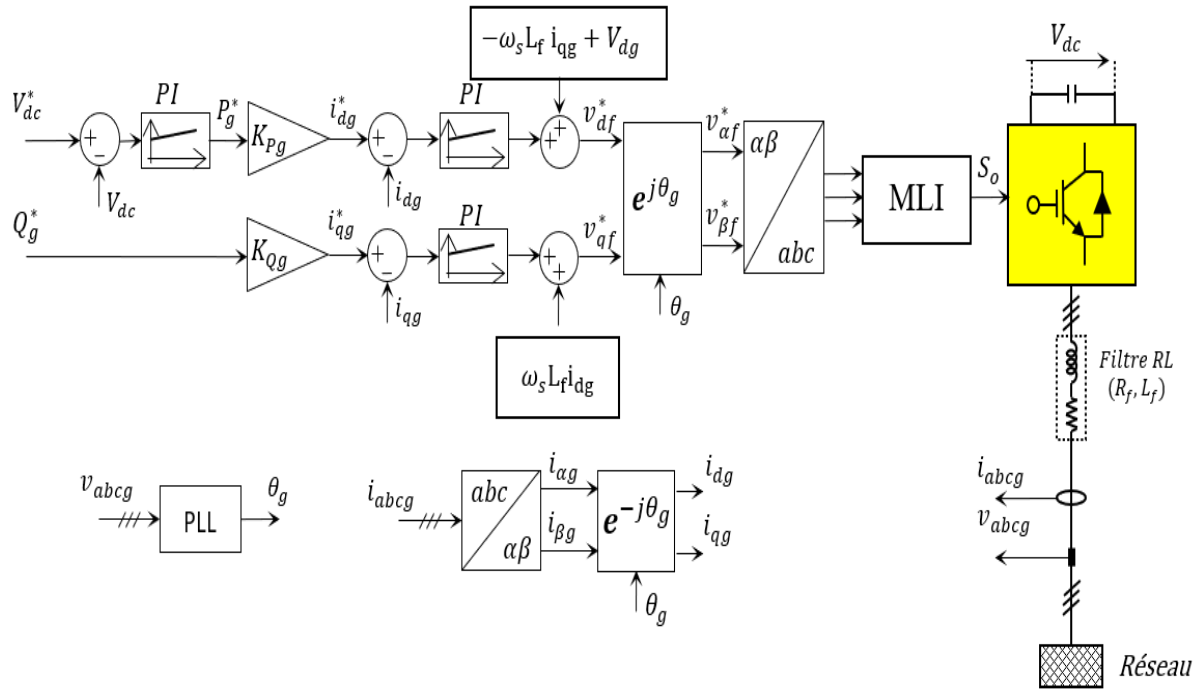


Figure 3.8 : Schéma synoptique de commande du convertisseur coté réseau CCR

3.10 Simulation et Interprétation

3.10.1 Simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation des stratégies de contrôle proposées pour une génération éolienne basée sur GADA, réalisées à l'aide de l'environnement Matlab/Simulink. Le GADA a une puissance nominale de 2 MW, et les principaux paramètres du système utilisés dans la simulation sont énumérés dans le tableau : Annexe ().

- La fréquence de commutation des interrupteurs de puissance du CCM et du CCR est réglée à 4 kHz, et la fréquence du réseau AC est de 50 Hz. Pour atteindre la valeur maximale du coefficient de puissance correspondant, nous choisissons un angle de calage nul ($\beta = 0$ rad).

Pour notre étude on a pris un angle de calage fixe $\beta = 0^\circ$ pour un fonctionnement optimal

Le contrôleur du convertisseur côté réseau est testé dans les conditions suivantes :

- La référence de la tension du bus continu V_{dc}^{ref} est fixée à 1150 V.
- La valeur de référence de la puissance réactive $Q_{rés}^{ref}$ est fixée à zéro pour un fonctionnement du convertisseur à facteur de puissance unitaire.

Le contrôleur du convertisseur côté rotor est testé dans les conditions suivantes :

- Le couple de référence C_{em}^{ref} est calculé selon la stratégie OTC MPPT.
- La valeur de la puissance réactive du stator de référence Q_s^{ref} est fixée à zéro pour un facteur de puissance unitaire.

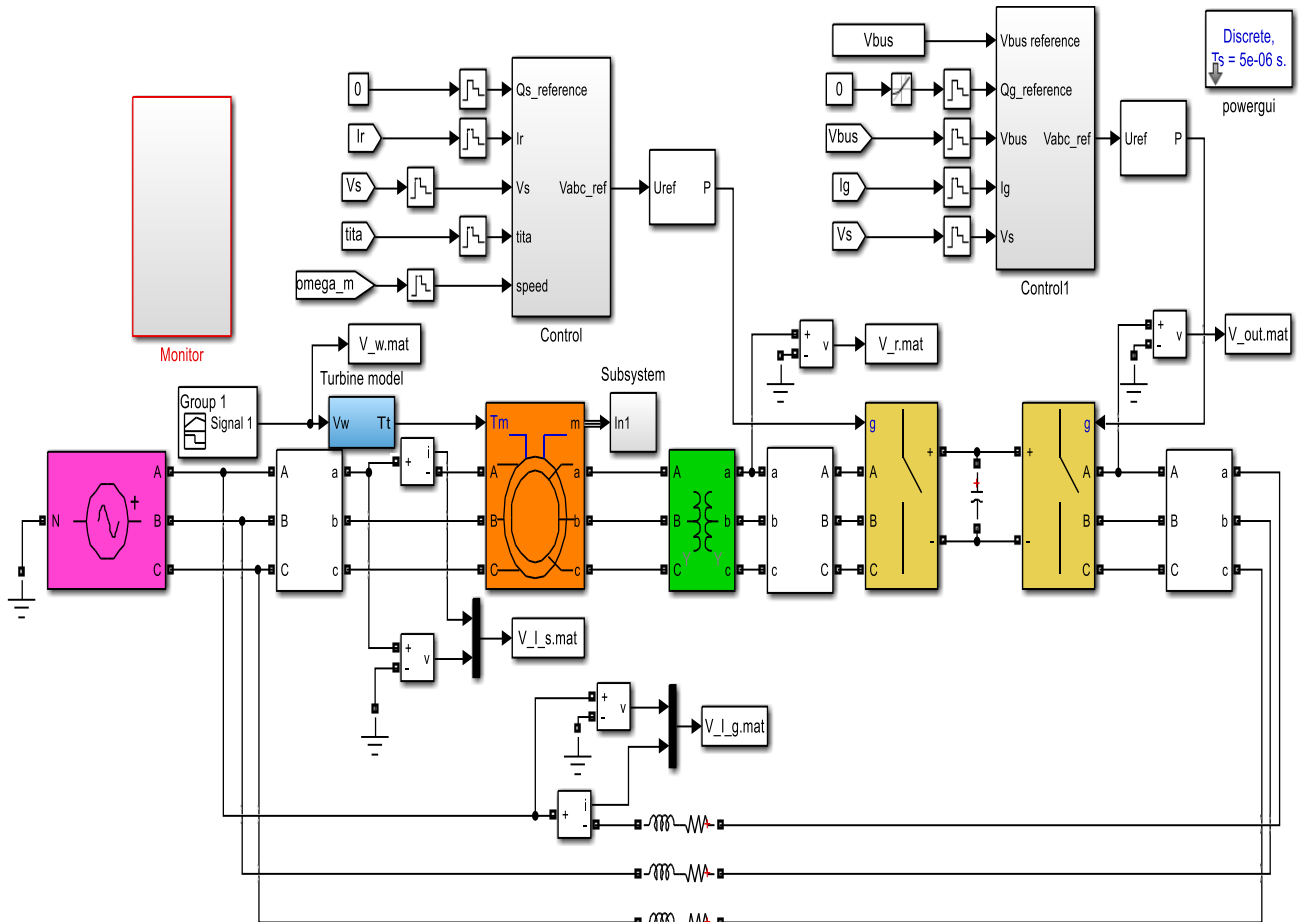


Figure 3.9 : Schéma global du système de conversion éolien avec simulink

3.10.2 Interprétation des résultats

La figure (3.10) montre que le profil de vitesse du vent appliqué utilisé sur la simulation varie en fonction de temps comme suit : De 0 à 4s, constant à 8m/s, puis de 4 à 7s, il varie linéairement pour atteindre 12m/s, puis reste stable jusqu'à 10s.

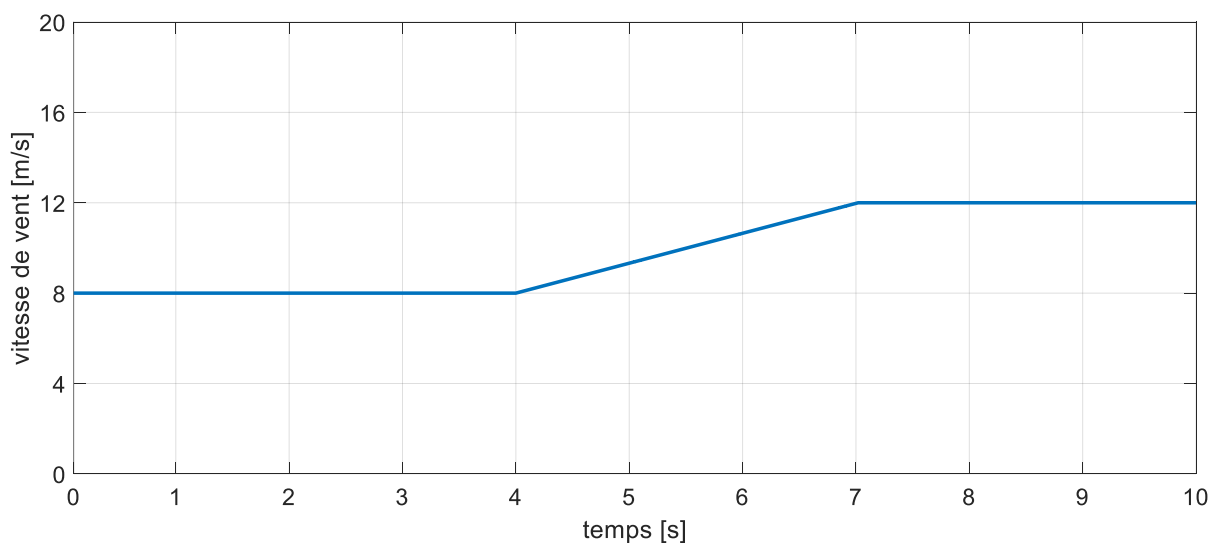


Figure 3.10 : Profil de vitesse de vent

La figure (3.11) illustre les résultats du test de poursuite des courants rotoriques direct et en quadrature. On remarque bien qu'ils suivent tous les deux leurs références, le courant direct est à l'image de la puissance réactive et le courant en quadrature contrôle la puissance active donc elle est à l'image du couple électromagnétique.

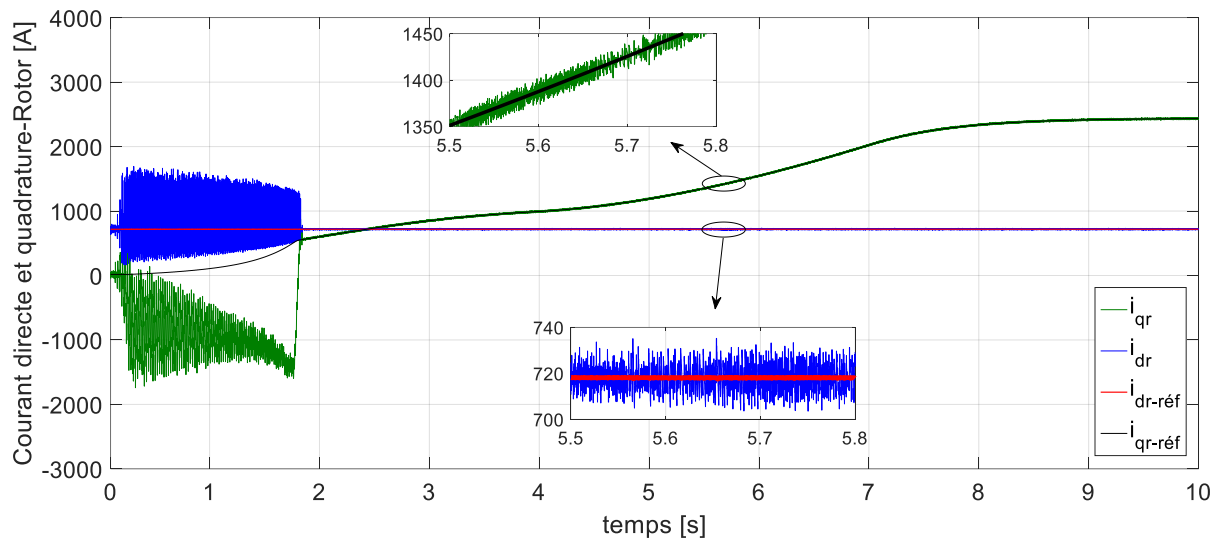


Figure 3.11 : Courants rotoriques directe et quadrature et leurs références

La figure (3.12) montre que le couple électromagnétique fourni par la GADA suit sa référence pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans des conditions d'optimisation, ce manière de fonctionnement qui a été juger par des valeurs maximales de coefficient de puissance ($C_{p-opt} \approx 0,44$, dans le régime permanent, il est dans un sens négatif ceci qui représente le fonctionnement en génératrice.

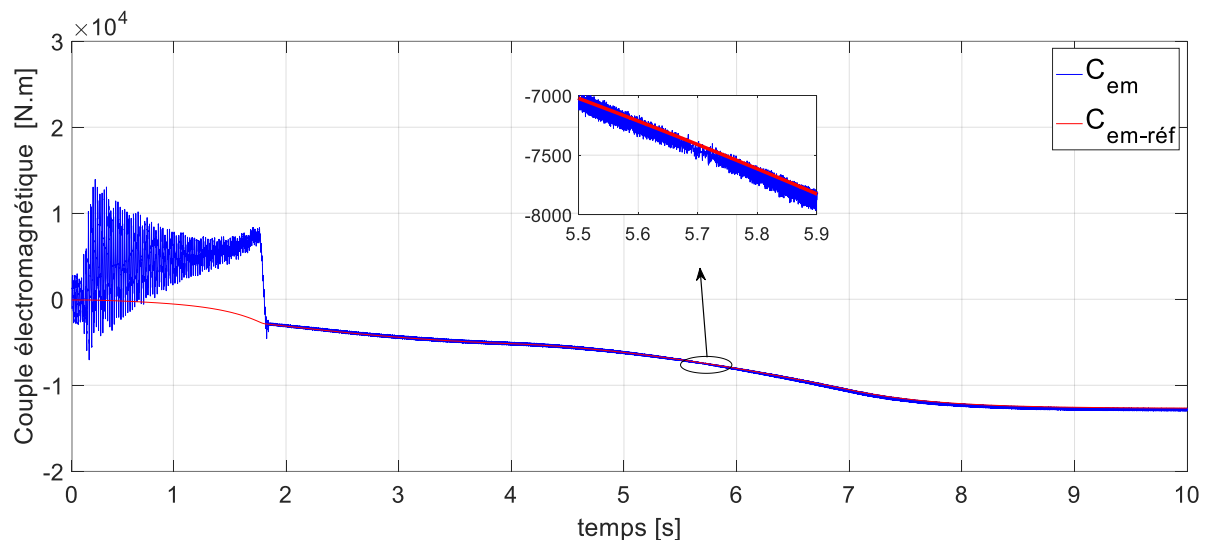


Figure 3.12 : Couple électromagnétique et sa références

La Figure (3.13) illustre les résultats du test de poursuite de puissance réactive statorique, on remarque qu'elle suit sa consigne, Ceci est dû au contrôle de composante directe du courant rotorique. Notons que leurs oscillations en régime statique deviennent de la variation continue de la puissance active, cette dernière qui change avec la vitesse du vent et selon la fonction (MPPT).

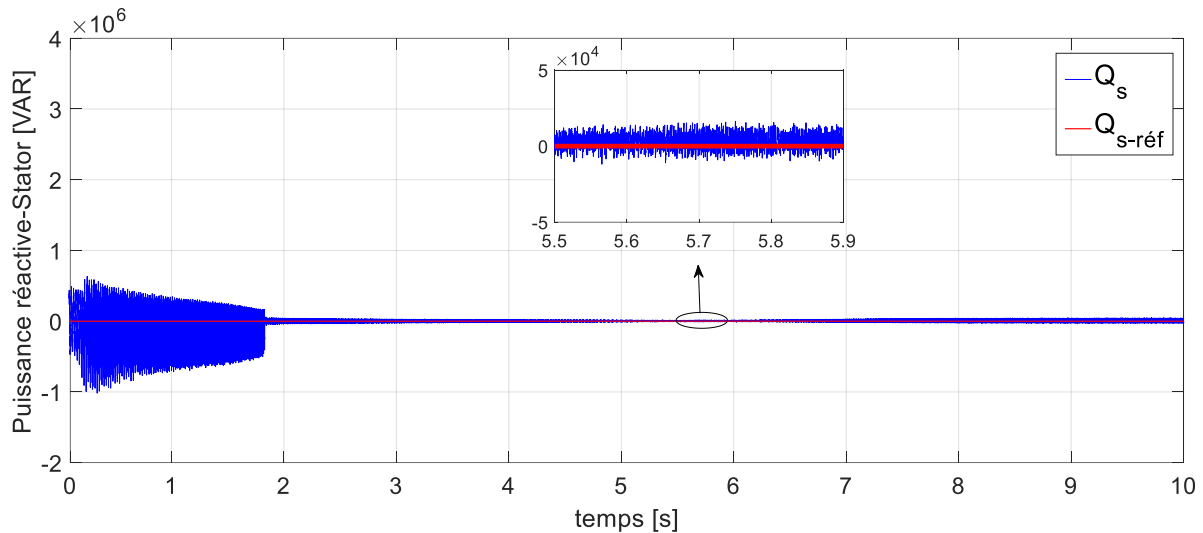


Figure 3.13 : Puissance réactive statorique et sa référence.

La figure (3.14) montre que la puissance active statorique est toujours négative, que ce soit en mode hypo ou hyper synchrone, ce qui signifie que sa direction est toujours vers le réseau dans les deux modes. Elle est commandée selon des critères d'optimisation de la puissance électrique produite. Elle est à l'image du couple électromagnétique, ce que justifie la proportionnalité entre eux. Ainsi, montre qu'une petite variation de vent (8-12m/s) peut induire une grande variation sur la puissance extraite (0-2MW).

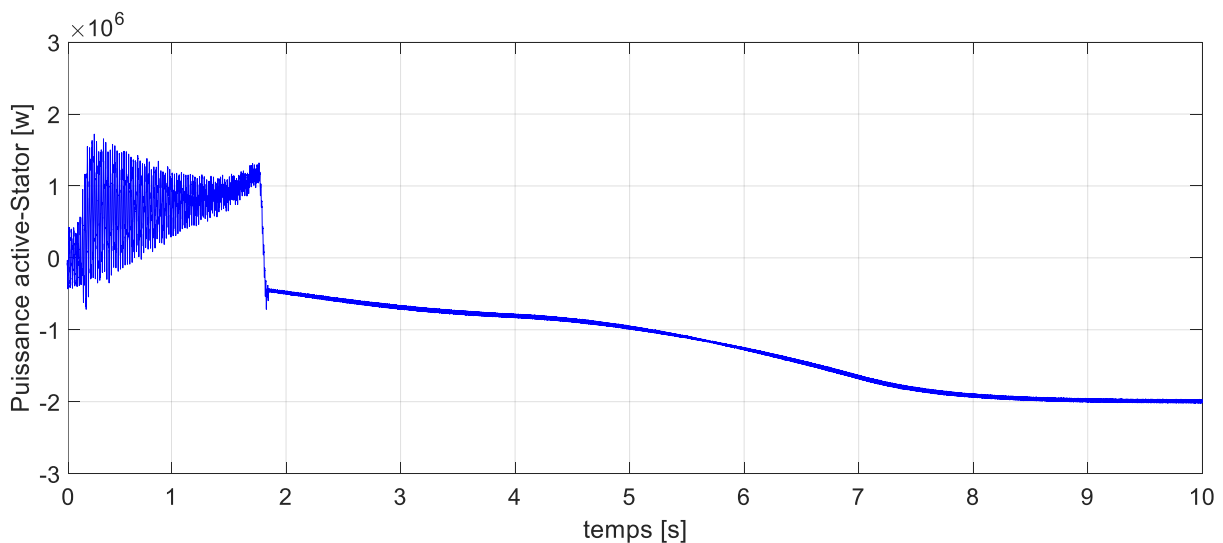


Figure 3.14 : puissance active statorique

À partir des résultats obtenus sur la figure (3.15), on remarque que la tension de stator et le courant de stator sont en opposition de phase, le déphasage entre eux 180° , Cela signifie que la puissance active de stator est délivrée au réseau, cela est dû à l'énergie réactive est nulle ce qui résulte un facteur de puissance unitaire (ils stabilisent après l'instant 1.83s). Le courant est en augmentation dans les deux modes.

On remarque bien que la forme des tensions de phases est purement sinusoïdale.

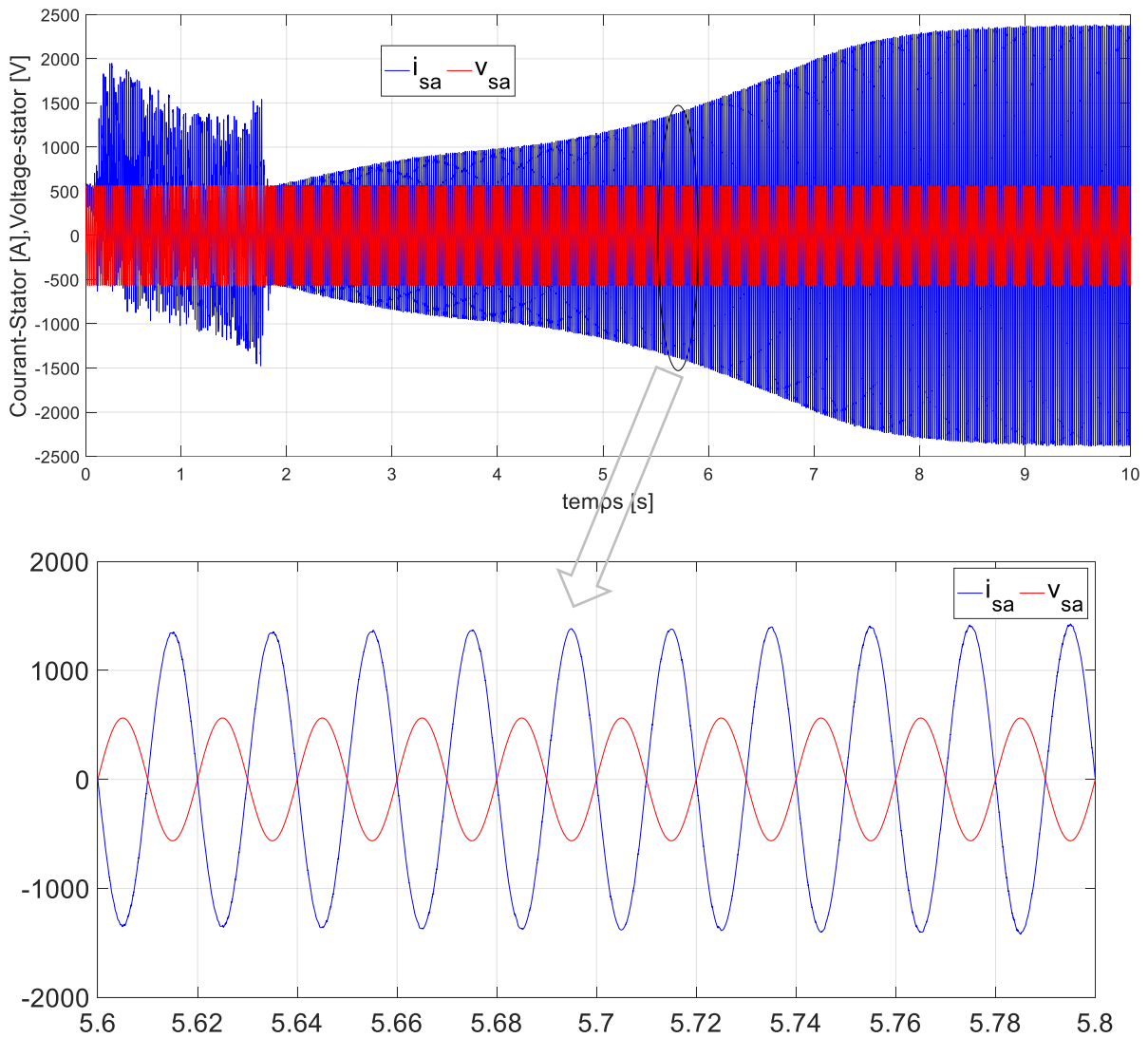


Figure 3.15 : Tension et courant statoriques

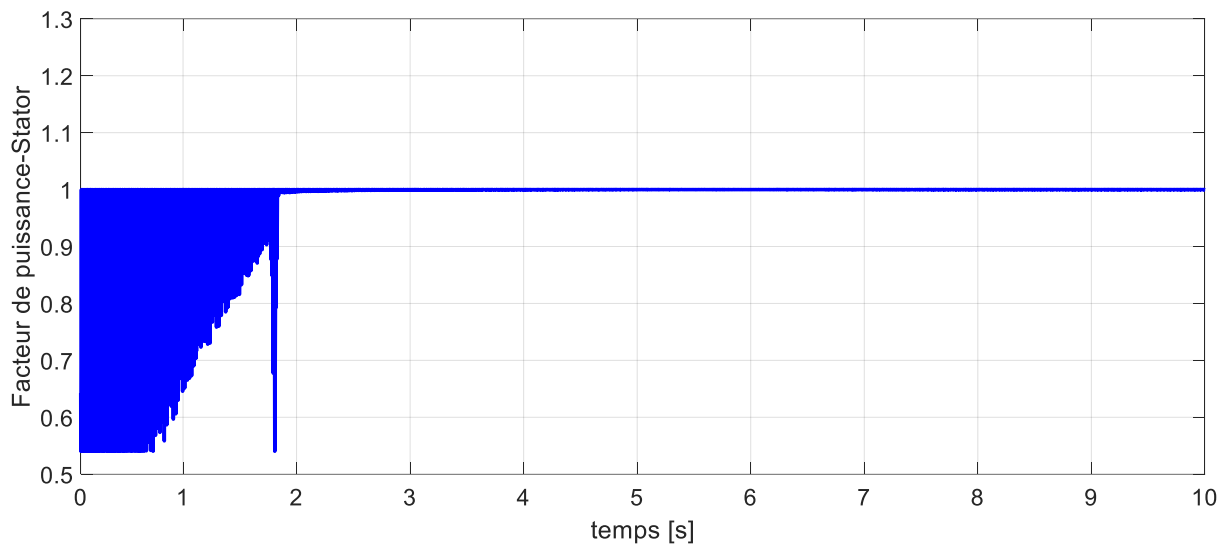


Figure 3.16 : *facteur de puissance statorique*

La figure (3.17) donne les trois courants rotoriques, On observe bien que la direction des courants est inversée à l'instant 5.72s ainsi que l'amplitude et la fréquence ceci est justifié par le fait que la vitesse du rotor atteint la vitesse de synchronisme 157 rad/s (la vitesse de vent 12 m/s et le glissement devient négative) et alors le passage du mode hypo synchrone au hyper synchrone, donc le rotor envoie de l'énergie au réseau électrique.

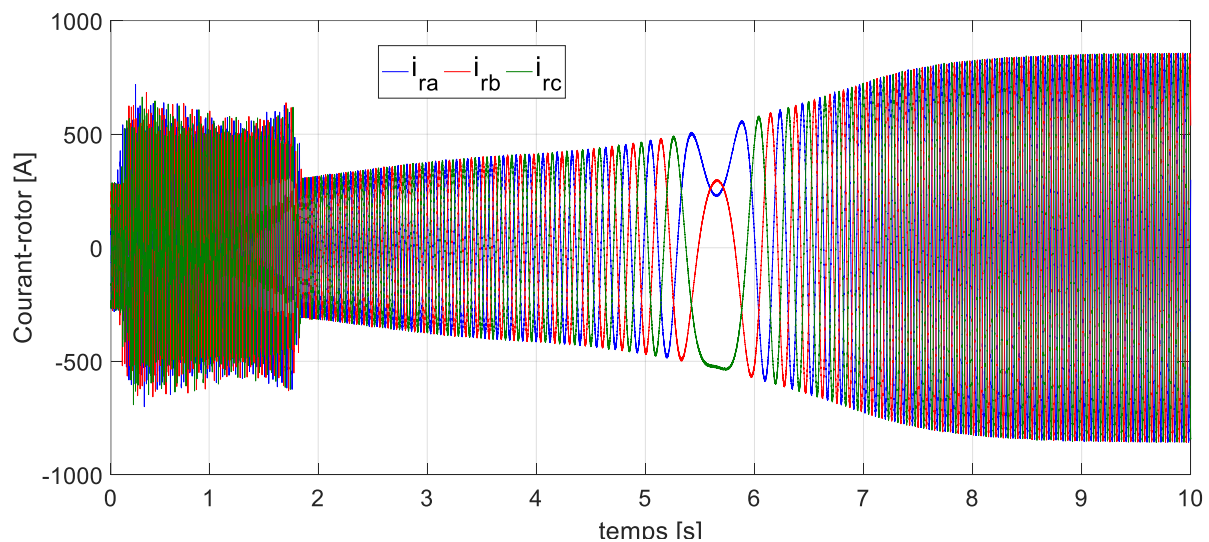


Figure 3.17 : *Courants des trois phases rotoriques*

La figure (3.18) donne la puissance active rotorique, dans le mode hypo synchrone, on a des valeurs positives (glissement positive : environ 0.3 à 0 donc la vitesse de rotation environ 1050 à 1500tr/min), Cela veut dire que le rotor reçoit l'énergie de la part du réseau électrique. Dans le mode hyper synchrone, on a un changement de direction de la puissance active rotorique qui est devenu négative (glissement négative : 0 à -0.3 donc la vitesse de rotation environ 1500 à 1968 tr/min). Cela veut dire que le rotor génère de l'énergie au réseau électrique.

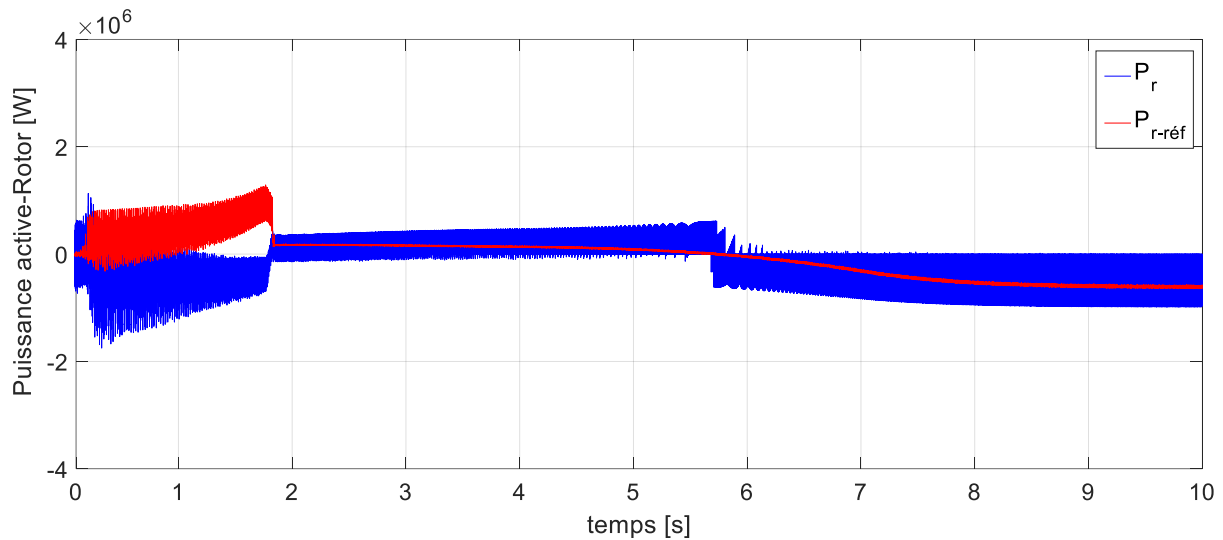


Figure 3.18 : Puissance active rotorique et sa référence

Nous observons sur la figure (3.19) que La tension de bus continue suit sa référence avec un régime transitoire un peu lent et un dépassement. Cela est dû à la charge du condensateur et à la variation importante d'énergie réactive au rotor, puis V_{dc} se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande $V_{dc} = 1150V$.

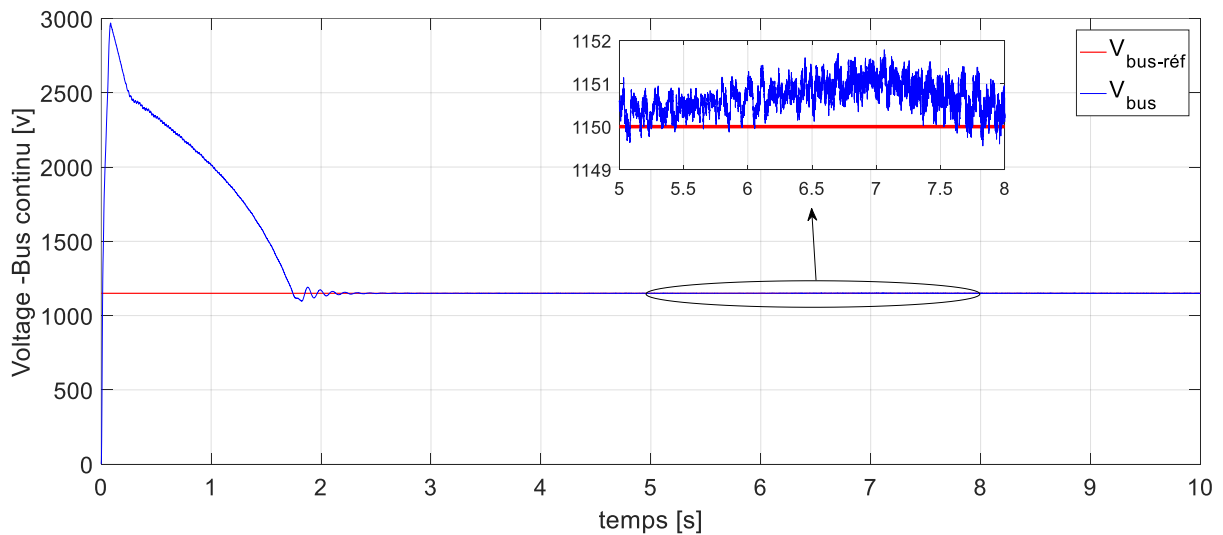


Figure 3.19 : Tension de bus continu et sa référence

La Figure (3.20) illustre les résultats du test de poursuite de puissance réactive coté réseau, on remarque qu'elle suit sa consigne, selon les critères du réseau (facteur de puissance). Ceci est dû au contrôle de composante en quadrature du courant du filtre.

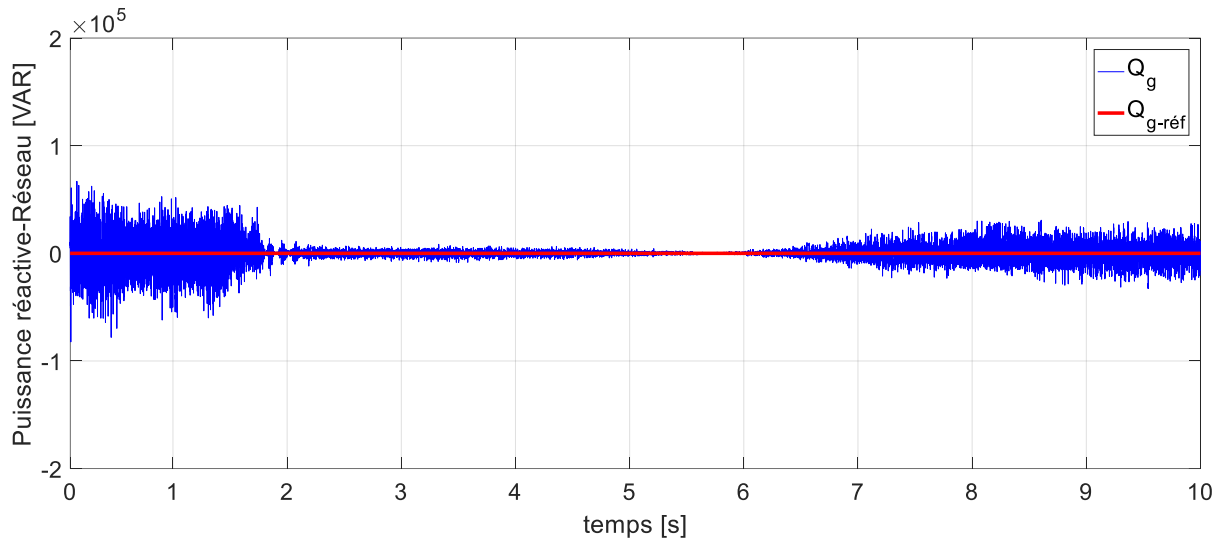


Figure 3.20 : Puissance réactive coté réseau et sa référence

Nous avons représenté sur la figure (3.21) les variations de tension et de courant coté réseau après le filtre RL. On remarque que le déphasage entre la tension et le courant dans le mode hypo synchrone est 0° cela est dû à l'énergie réactive est nulle et signifie que le réseau envoie de l'énergie au rotor, le courant diminue ici, après l'instant 5.72s lorsque le fonctionnement passe au mode hyper synchrone la tension et le courant sera en opposition de phase (déphasage 180°) cela signifie que le réseau reçoit l'énergie de la part du rotor, ici le courant est en augmentation. On remarque bien que la forme de tension de phase est purement sinusoïdale après filtrage.

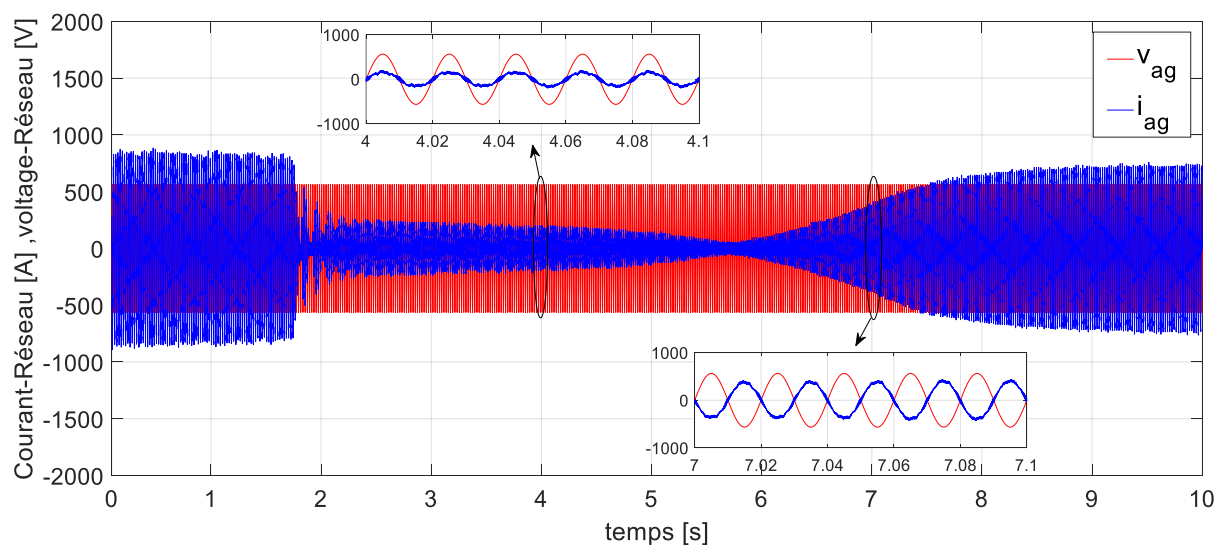


Figure 3.21 : Variations de tension et de courant coté réseau

La figure (3.22) présente l'allure de la tension simple à la sortie du convertisseur coté réseau CCR avant le filtre, ayant la même allure dans les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone. il s'agit d'une tension à deux niveaux provienne de l'application de la technique MLI dérivées de la commande vectorielle.

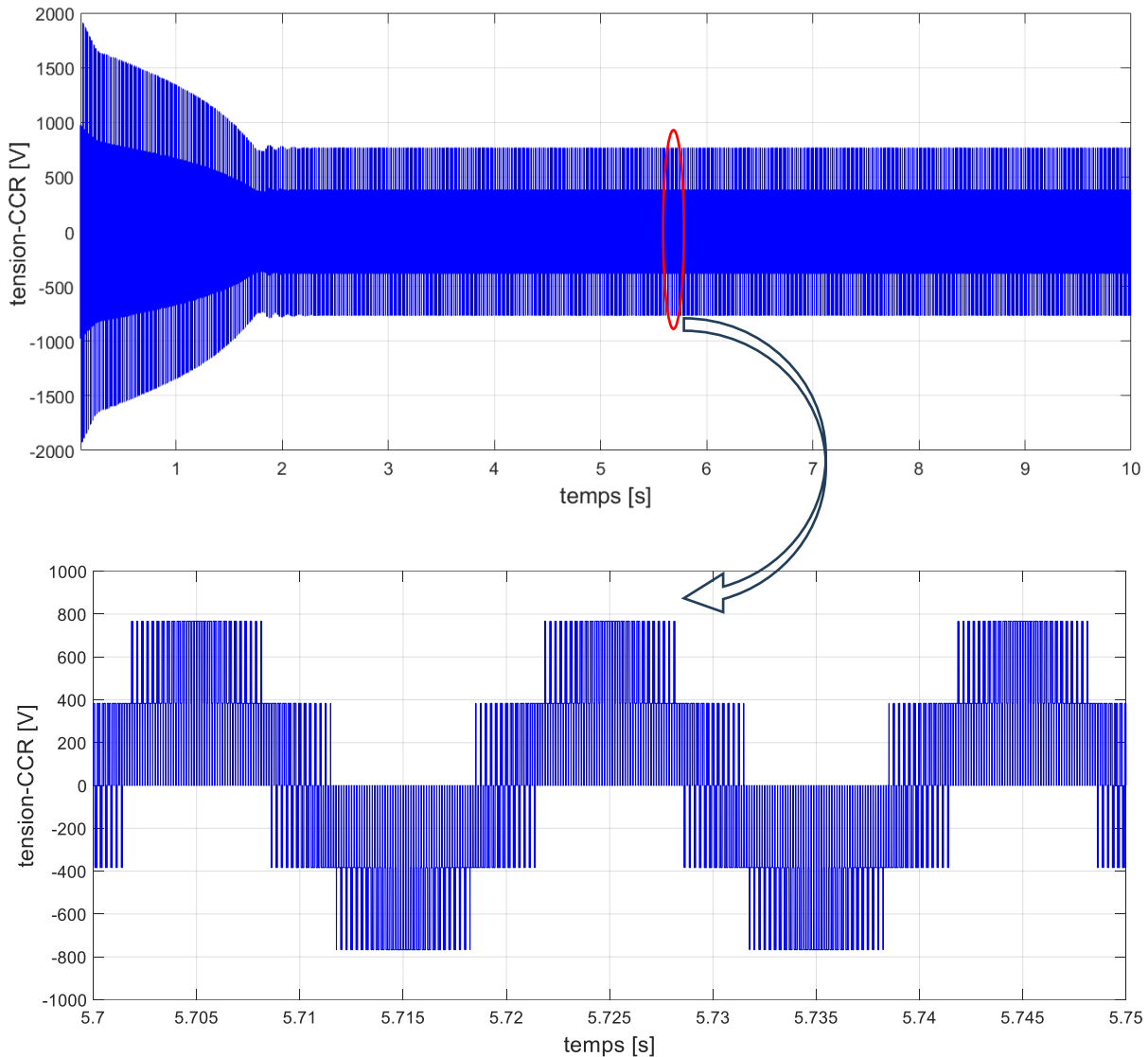


Figure 3.22 : Tension simple à la sortie du convertisseur coté réseau CCR

On peut constater également que, malgré, les oscillations la réponse de système suit bien sa référence en régime permanent.

Notons aussi que le courant électrique peut dépasser sa valeur nominale dans certains cas de régime transitoire, ce que obligé en pratique de placer des limiteurs de courant afin de faire protéger les éléments électriques dans le système (les bobinages ou les convertisseurs).

- Les résultats montrent une bonne performance en ce qui concerne le maintien de chaque réponse à sa consigne en garantissant un bon temps de réponse et une bonne précision.

En fin de compte, nous pouvons dire que la commande vectorielle a été appliqué et réalisé.

3.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la commande de la chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation, dans un premier temps, nous avons présenté le principe de MPPT. Ensuite, nous avons présenté la synthèse de la commande vectorielle par orientation du flux statoriques dont le but est le contrôle indépendant des puissances active et réactive en utilisant des régulateurs classiques de type Proportionnel Intégral (PI). Nous avons présenté les résultats de simulations où un profil de vent a été appliqué dans le but de tester la validation de notre système éolien.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de la commande vectorielle pour l'entraînement de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA dédiée aux éoliennes en vue d'atteindre les meilleures performances.

Les principales contributions et conclusions de ce travail de recherche sont résumées comme suit :

- Un bref aperçu sur l'état de l'art des systèmes de conversion éolienne à base de GADA et Mettre en évidence ses grands trait favorable.
- Une modélisation de l'ensemble du système éolien basé sur GADA en dérivant les équations qui décrivent le comportement dynamique du système.
- Une commande vectorielle qui utilise le modèle de système de conversion éolienne à base de GADA pour mesurer et calculer les variables de commande requises.
- Des études de simulation sont réalisées pour vérifier le fonctionnement du système en utilisant l'outil de simulation Matlab/Simulink.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuées à l'amélioration du fonctionnement de la GADA sont envisageables :

- L'étude des perturbations du fonctionnement de la GADA vis à vis des déséquilibres du réseau.
- L'utilisation des différentes commandes proposées dans ce mémoire associés aux autres commandes, tels que l'intelligence artificielle (le réseau neuronal et le régulateur par méthode floue).

- [1] T. Azzouz, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra, 2015.
- [2] Suisse Eole. <https://suisse-eole.ch/>
- [3] « GWEC », Global Wind Energy Council. <https://gwec.net/>
- [4] S. M. Boudia, « Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie », Thèse de Doctorat, 2013.
- [5] R. CHEIKH, « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [6] F. Poitiers, « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [7] A. Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, 2005.
- [8] T. Ghennam, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat, École Militaire Polytechnique (Alger), 2011.
- [9] Nordex SE. <https://www.nordex-online.com>
- [10] « I. HAMZAOUI, "« Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur »", Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008. »
- [11] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », These de doctorat, Paris, ENSAM, 2003.
- [12] S. Belakehal, « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », *universite costantine*, 2010.
- [13] *Electrotechnique - Théodore Wildi , Gilbert Sybille - 4ème édition -*. 2005.
- [14] ResearchGate. <https://www.researchgate.net/>
- [15] F. Poitiers, T. Bouaouiche, et M. Machmoum, « Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion », *Electric Power Systems Research*, vol. 79, n° 7, p. 1085-1096, juill. 2009.
- [16] « B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ", *Revue J3Ea*, vol. 5, Hors Série 1, EDP Science, 2006. ».

- [17] Y. Tang, L. Xu, « *A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System* » *IEEE transaction on power electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 472-478, July 1995.
- [18] « B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger, F. Minne, “Technologies d’éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension” *Revue REE*, no. 5, pp 65-74, Mai 2005 ».
- [19] « S. El Aimani, B. François, B. Robyns, F. Minne “Modeling and Simulation of Doubly Fed Induction Generators for Variable Speed Wind Turbines integrated in a Distribution Network” 10th European Conference on Power Electronics and Applications: (EPE 2003), Toulouse, France, 4 September 2003 ».
- [20] « Troen I, Petersen EL. European wind atlas. Roskilde: Riso National Laboratory, ISBN 87- 550-1482-8; 1989. »
- [21] Gonzalo Abad , J.Lopez, M. A. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly fed induction machine : modeling and control for wind energy generation*. John Wiley & Sons, 2011.
- [22] « M. Hurajt, “Simulation of a wind energy conversion system utilizing vector controlled doubly fed induction generator,” Thèse Doctorat, 2013. »
- [23] « HADDAR Mabrouk, ”Etude des techniques modernes de commande appliquées sur les convertisseurs de puissance d’ediés aux éoliennes”, UNIVERSITE MOUHAMED TAHRI-Bechar, 2022 ».
- [24] « Y. BEKAKRA << Contribution à l’étude et à la commande robuste d’un aérogénérateur asynchrone a double alimentation. Thèse de doctorat université Mohamed Khider - Biskra, Algérie, octobre 2014 ».
- [25] Ch.Rahmoune « “Cours Modélisation_Chapitre 1” », (<https://ch-rahmoune.univ-boumerdes.dz/>).
- [26] R.Abdessemmed « “Electrotechnique modélisation et simulation des machines électrique” », 2011.
- [27] « A. BOYETTE << Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne >>Thèse de doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy1, décembre 2006. »
- [28] « A. GAILLARD. "Système éolien basé sur une MADA contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service ", Thèse de doctorat, l’Université Henri Poincaré, Nancy-2010 ».
- [29] « HADDAR Mabrouk, ALLAOUA B ’ “The controlling of the DFIG Based Wind Energy Conversion System modeling and simulation “International Journal of Control, Energy and Electrical Engineering (CEEE) Vol.7 pp.34-39.2019 ».
- [30] « M.CHEBRE, MOKHTAR. Z, Y. BENDAHA “Adaptation des Paramètres d’un Contrôleur PI par un FLC Appliqué à un Moteur Asynchrone” 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP 2007 03-04. November 2007. ».

- [31] « M Allam , B Dehiba, M Abid , Y Djeriri ,et R Adjoudj “« Etude comparative entre la commande vectorielle directe et indirecte de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) dédiée à une application éolienne »”,Journal of Advanced Research in Science and Technology,2014 ».
- [32] « M. C. Benhabib “Contribution à l’étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension: modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande”, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-Université, France, 2004. »
- [33] « Y. Nakoula, « Apprentissage des modèles linguistiques flous par jeu de règles pondérées», thèse Doctorat de l’Université de Savoie, 1997 ».
- [34] « A. MOUALDIA, << Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d’énergie éolienne >>, Ecole Nationale polytechnique D’ALGER, 2014. »
- [35] *Abu-Rub. H,K.Alhaddad, M.Malinowski « “Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications” », John Wiley & Sons. (2014).*
- [36] « Pena R et al. “« Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation »”, IEE Proc Electr Power Appl, vol. 143, no. 3, pp. 231-41, 1996 ».

Annexe

Système	Paramètre
MADA	Puissance nominale : 2 MW Vitesse nominale : 1500 <i>tr</i> / min Tension nominale du stator : 690 V_{rms} Courant nominal du stator : 1760 A_{rms} Couple nominal : 12.7 k.Nm , Paire de pole : 2, Tension nominale du rotor : 2070 V_{rms} $R_s = 2.6 m\Omega$, $L_{fs} = 87 \mu H$, $M = 2.5 mH$, $L'_{fr} = 783 \mu H$, $R_r = 2.9 m\Omega$, $L_{fr} = 87 mH$, $L_s = 2.587 mH$, $L_r = 2.587 mH$,
Multiplicateur	N=100
Bus continue	$C_{bus} = 80 mF$, $V = 1150 V$,
RL Filtre	$R_f = 20 \mu\Omega$, $L_f = 40 mH$,
Turbine	Vitesse du vent nominale : 12.5 <i>m</i> / <i>s</i> , Plage de vitesse (min - max) : 9 -18 <i>tr</i> / min , Vitesse relative optimale : 7.2 Coefficient de puissance maximal : 0.44 Rayon de pale : 42 <i>m</i> Densité de l'aire : 1.1225 <i>kg</i> / <i>m</i> ³ $J = 127 kg.m^2$

Paramètres des régulateurs :

Regulateurs Coté machine	<pre> tau_i = (sigma*Lr)/Rr; tau_Q = tau_n; wni = 100*(1/tau_i); kp_id = (2*wni*sigma*Lr)-Rr; kp_iq = kp_id; ki_id = (wni^2)*Lr*sigma; ki_iq = ki_id; kp_Q = 0; ki_Q = 1/tau_Q; </pre>
Regulateurs Coté réseau	<pre> %PI regulators tau_ig = Lg/Rg; wnig = 60*2*pi; kp_idg = (2*wnig*Lg)-Rg; kp_iqg = kp_idg; ki_idg = (wnig^2)*Lg; ki_iqg = ki_idg; kp_v = -1000; ki_v = -300000; </pre>

ملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة شاملة للنمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح المعتمد على المولد ذو التغذية المزدوجة (GADA). يبدأ البحث بنموذج تفصيلي لتوربينات الرياح، يليه تحليل لخوارزميات التحكم في تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT). ثم تقدم المذكرة نموذجاً رياضياً لـ (GADA) في إحداثيات $d-q$. يتم فحص كل من استراتيجيات التحكم في المحول الجانبي للشبكة (CCR) والمحول الجانبي للدوار (CCM) بدقة، مع إطار نظري يعتمد على التحكم الشعاعي. أخيراً، تم إثبات صحة خوارزمية التحكم المقترحة بدقة من خلال عمليات محاكاة نظام توربينات الرياح GADA بقدرة 2 ميجاوات.

كلمات مفتاحية: المولد ذو التغذية المزدوجة؛ توربينات الرياح؛ تتبع نقطة التحكم القصوى؛ المحول الجانبي للشبكة؛ المحول الجانبي للدوار؛ التحكم الشعاعي.

Résumé :

Ce mémoire propose une étude complète de la modélisation et du contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur un générateur à double alimentation (GADA). La recherche commence par un modèle détaillé de l'éolienne, suivi d'une analyse approfondie des algorithmes de contrôle du suivi du point de puissance maximale (MPPT). La mémoire présente ensuite un modèle mathématique du GADA dans les coordonnées $d-q$. Les stratégies de contrôle convertisseur côté réseaux (CCR) et convertisseur côté rotor (CCM) sont examinées en profondeur, avec un cadre théorique basé sur le contrôle vectoriel. Enfin, la validité de l'algorithme de contrôle proposé est rigoureusement démontrée à travers des simulations d'un système éolien GADA de 2 MW.

Mots clés : générateur à double alimentation; l'éolienne; suivi du point de puissance maximale; convertisseur côté réseaux; convertisseur côté rotor; le contrôle vectoriel.

Abstract:

This memory offers a comprehensive study of the modeling and control of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based Wind Energy Conversion System (WECS). The research begins with a detailed model of the wind turbine, followed by an in-depth analysis of maximum power point tracking (MPPT) control algorithms. The memory then presents a mathematical model of the DFIG in the $d-q$ coordinates. Both Grid Side Converter (CCR) and Rotor Side Converter (CCM) control strategies are thoroughly examined, with a theoretical framework based on vector control. Finally, the validity of the proposed control algorithm is rigorously demonstrated through simulations of a 2-MW DFIG wind turbine system.

Key words : Doubly Fed Induction Generator; wind turbine; maximum power point tracking; Grid Side Converter; Rotor Side Converter; vector control.