

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Machines Electriques

Présenté par

**Yaakoub hamidatou, imad eddine saide, ahmed salah eddine
marad**

Thème

**Contrôle de la puissance active et réactive du système
éolien par le régulateur PI appliqué à GADA**

Soutenu le ../06/2022. Devant le jury composé de :

Dr. TOUIL Slimane	Maitre de conférences	Président
Dr. GUEDIRI Abdelkarim	Maitre de conférences	Rapporteur
Dr. BESSOUS Noureddine	Maitre de conférences	Examineur



Dédicaces

La recherche a traversé de nombreux obstacles, mais nous avons essayé de les surmonter avec persévérance, louange à Dieu et de sa part. Pour mes parents, frères, sœurs et amis, ils ont été un tel soutien et un tel soutien pour mener la recherche. Nous ne devons pas oublier nos professeurs, qui ont joué le plus grand rôle en nous soutenant et en nous donnant de précieuses informations.... Je vous donne mon message.. Nous demandons à Dieu Tout-Puissant de prolonger votre vie et de vous accorder une bonne

شكر و عرفان

في هذا اليوم الباسم الجميل، وبعد عناء ومشقة طريق طويل كنتم لنا النور والدليل نهديكم بعضا مما نكنه من حب واحترام وتقدير ولو اننا نقف دائما عاجزين عن التعبير امام ما قدمتموه لنا برحابة صدر كبير، نسأل الله عز وجل أن يجزيكم عنا خير الجزاء وأن يجعل كل ما قدمتموه لنا في ميزان حسناتكم حفظكم الله ورعاكم وادام الله نعمة البصيرة لكم.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

<u>LISTE DES FIGURES</u>	v
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	xi
<u>LISTE DES SYMBOLES</u>	xii
<u>INTRODUCTION GÉNÉRALE</u>	1
CHAPITRE I :	2
<i><u>BASES DES SYSTEMES DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE</u></i>	2
<i><u>I.1 Introduction</u></i>	1
<i><u>I.2 Historique</u></i>	4
<i><u>I.3 Aperçu des systèmes de conversion de l'énergie éolienne</u></i>	5
<i><u>I.3.1 Capacité éolienne installée</u></i>	6
<i><u>I.3.2 Aperçu général de la production d'énergie éolienne</u></i>	6
<i><u>I.3.3 Évolution du SCEE en puissance (mégawatt)</u></i>	8
<i><u>I.3.4 Principales composantes des SCEE connectés au réseau</u></i>	8
<i><u>I.3.4.1 Composants mécaniques</u></i> :	9
<i><u>I.3.4.2 Composants électriques</u></i> :	9
<i><u>I.3.4.3 Composantes de contrôle</u></i> :	9
<i><u>I.4 Critères de la classification des SCEE</u></i>	11
<i><u>I.5 Concepts et topologies des éoliennes</u></i>	12
<i><u>I.5.1.1.1 Type-1 du SCEE</u></i>	13

SOMMAIRE

<u>I.5.1.1.2 Type-2 du SCEE</u>	15
<u>I.5.1.1.3 Type-3 du SCEE</u>	15
<u>I.5.1.1.4 Type-4 du SCEE</u>	17
<u>Conclusion</u>	19
<u>CHAPITRE II :</u>	20
<u>MODELISATION ET COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE</u>	20
<u>II.1 Introduction</u>	33
<u>II.2 Composants du système éolien basé sur une GADA</u>	33
<u>II.3 Modélisation de la turbine éolienne</u>	<u>Error! Bookmark not defined.</u>
<u>II.3.1 Modèle du vent appliqué au système</u>	35
<u>II.3.2 Modèle aérodynamique</u>	36
<u>II.3.3 Modèle de la partie mécanique</u>	<u>Error! Bookmark not defined.</u>
<u>II.4.1.1 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation</u>	<u>Error! Bookmark not defined.</u>
<u>II.4.1.2 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation</u>	<u>Error! Bookmark not defined.</u>
<u>II.4.1.2.1 Contrôle avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI</u>	39
<u>II.4.3 Résultats de simulation</u>	<u>Error! Bookmark not defined.</u>
<u>II.4.3.1 Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse</u>	<u>Error! Bookmark not defined.</u>
<u>II.5 Conclusion</u>	42
<u>CHAPITRE III :</u>	43

SOMMAIRE

<u>Modélisation et commande de la generatrice asynchrone double alimentation (GADA)</u>	43
<u>III.1.Introduction</u>	44
<u>III.2.Fonctionnement et modélisation de la GADA.</u>	44
<u>III.2.1 Modèle de la GADA dans le repère triphasé</u>	44
<u>III.2.1.1.Equations électriques</u>	47
<u>III.2.1.2.Equations magnétiques</u>	49
<u>III.2.1.3.Equation mécanique</u>	50
<u>III.2.2.Modèle de la GADA dans le repère de Park.</u>	50
<u>III.2.3 Résultats de simulation</u>	53
<u>III.3.Modélisation des convertisseurs</u>	56
<u>III.4.Modélisation du Convertisseur Coté Générateur (CCG).</u>	57
<u>III.5.Modélisation du Convertisseur Coté Réseau (CCR).</u>	60
<u>III.8.Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle</u>	61
<u>III.8.1.Principe de la commande vectorielle avec l'orientation du flux magnétique</u>	61
<u>Equations électriques</u>	63
<u>III.8.2.Commande directe basée sur l'orientation du flux statorique</u>	66
<u>III.8.4.Résultats de simulation</u>	67
<u>III.8.6.Test de suivi de consigne pour le contrôle du GADA avec une vitesse du vent variable</u>	67
<u>III.8.7.La commande indirecte avec boucle de puissance</u>	69
<u>III.8.8. Résultats de simulation</u>	70
<u>III.9.Conclusion</u>	75

SOMMAIRE

<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	94
<u>Annexes A</u>	101

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts annuels, 2008-2018.	6
Figure I-2: Capacité de production d'énergie éolienne et ajouts, 10 premiers pays, 2018. ...	7
Figure I-3: Évolution de la taille des Turbines éoliennes (puissance nominale de sortie de la turbine, son diamètre et la hauteur de moyeu)	8
Figure I-4: Configuration de base d'une éolienne connectée au réseau.	9
Figure I-5: Type 1- SCEE basé sur le SCIG avec une plage de vitesse de $\pm 1\%$	14
Figure I-6: Type 2 - SCEE à vitesse semi-variable ($\pm 10\%$) avec WRIG.	15
Figure I-7: Type 3 - SCEE à vitesse semi-variable $\pm 30\%$) avec DFIG.	17
Figure I-8: Type 4 - SCEE à vitesse variable (0-100%) avec SCIG ou PMSG ou WRSG... ..	17
Figure I-9: Système éolien basé une GADA	19
Figure II-1: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.	36
Figure II-2 : Courbes des coefficients de puissance d'une éolienne à pas réglé de 2 MW, pour différents angles β	36
Figure II-3 : Modèle mécanique du système éolien.	Error! Bookmark not defined.
Figure II-4 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.	38
Figure II-5: Schéma bloc du contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.	38
Figure II-6: Schéma bloc du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation de la GADA.....	38
Figure II-7 : Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ et Vitesse spécifique λ	40
Figure II-8 : Vitesse mécanique (Ω_m) et Puissance mécanique (P_m).	41
Figure III-1 : Les enroulements triphasés idéaux (stator et rotor) de la GADA.....	47
Figure III-2 : Circuit électrique équivalent de la GADA	47
Figure III-3 : Tensions d'alimentation du rotor et du stator.	54
Figure III-4 : Courants rotoriques et statoriques triphasés.	54

LISTE DES FIGURES

Figure III-5 : Puissances active et réactive au niveau de la GADA.	55
Figure III-7 : Courants rotoriques et statoriques d'axes d-q.....	56
Figure III-8 : Les convertisseurs de puissance bidirectionnel AC / DC/ AC pour l'alimentation du GADA.	56
Figure III-9: Schéma simplifié du Convertisseur Coté Générateur.	58
Fig. III.10. Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions	58
Figure III-11 : Schéma simplifié du Convertisseur Coté Générateur.	60
Figure III-12: Principe de control vectoriel sans boucle de puissance.....	63
Figure III-13: Schéma bloc du système à réguler.....	66
Figure III-14: Schéma bloc de la commande directe de la GADA basée sur l'orientation du flux statorique.	66
Figure III-15 : Schéma bloc du principe du contrôle des puissances statoriques de la GADA (commande directe).....	67
Figure III-16 : Vitesse du vent et la vitesse mécanique du GADA.....	68
Figure III-17: Puissances réactive statoriques Puissances réactive statoriques réf	69
Figure III-18: Puissances active statoriques et Puissances active statoriques réf	69
Figure III-19: Puissances active statoriques et Puissances active statoriques réf	71
Figure III-20: Puissances réactive statoriques Puissances réactive statoriques réf	71
Fig. III.21. Couple électromagnétique.	71
Figure III-22: Puissances réactive statoriques	72
Figure III-23: Puissances active statoriques	72
Fig. III.24. Les courants directs et quadrature rotorique	72
Fig. III.25. Les courants directs et quadrature statorique	73
Fig. III.26. Courant triphasé statoriques	74

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts du 10 premiers pays 2018..... 6

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens.11

LISTE DES SYMBOLES

Symboles spécifiques à la turbine :

V_v	<i>Vitesse du vent</i>
P_{aer}	<i>Puissance aérodynamique</i>
λ	<i>Ration de Vitesse</i>
$C_p(\lambda, \beta)$	<i>Coefficient de puissance</i>
β	<i>Angle d'orientation des pales</i>
ρ	<i>Masse volumique de l'air</i>
S	<i>Surface circulaire balayée par la turbine</i>
Ω_t	<i>Vitesse de rotation de la turbine</i>
R_t	<i>Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.</i>
C_t	<i>Couple de la turbine.</i>
J	<i>Moment d'inertie total du système de conversion d'énergie éolienne.</i>
J_t	<i>Moment d'inertie de la turbine.</i>
J_m	<i>Moment d'inertie de la GADA.</i>
f_v	<i>Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA.</i>
C_m	<i>Couple mécanique sur l'arbre de la GADA</i>
C_{em}	<i>Couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA</i>
G	<i>Gain du multiplicateur</i>
Ω_m	<i>Vitesse de rotation de la GADA</i>
N_r et N_s	<i>Nombre de spires des bobinages rotorique et statorique</i>
g	<i>Glissement</i>
p	<i>Nombre de paires de pôles</i>
u	<i>Rapport de transformation rotor/stator</i>
w_s et w_r	<i>Pulsations statorique et rotorique de la GADA.</i>
R_s, R_r	<i>Résistance statorique et rotorique</i>

LISTE DES SYMBOLES

$i_{as}(t), i_{bs}(t) \text{ et } i_{cs}(t)$	Courants statoriques des phases a, b et c
$v_{as}(t), v_{bs}(t) \text{ et } v_{cs}(t)$	Tensions statoriques.
$\phi_{as}(t), \phi_{bs}(t) \text{ et } \phi_{cs}(t)$	Flux de stator
$i_{ar}(t), i_{br}(t) \text{ et } i_{cr}(t)$	Courants rotoriques des phases a, b et c
$v_{ar}(t), v_{br}(t) \text{ et } v_{cr}(t)$	Tensions rotoriques.
$\phi_{ar}(t), \phi_{br}(t) \text{ et } \phi_{cr}(t)$	Flux de rotor
L_s, L_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques
M_s, M_r	Inductances propres des phases statoriques et rotoriques
M_{123}	Inductance mutuelles instantanées entre une phase statorique et une phase rotorique.
$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq},$	Tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques.
$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq},$	Courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}, \Phi_{rd}, \Phi_{rq},$	Flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.
I_{CCG}, i_{CCR}	Courants issus des deux convertisseurs
V_{dc}	Tension du bus continu
f_{em}	Forces électromotrices

ABREVIATIONS

1. EN FRANÇAIS

SCEE	Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne.
GADA	Génératrice Asynchrone Double Alimentation.
CCR	Convertisseur Côté Réseau.
CCG	Convertisseur Côté Génératrice.
TE	Turbine Eolienne.
PI	Proportionnel- Intégral.
CMG	Commande par Mode Glissant.
GW	Gigawatts.
PE	Parcs Éoliens.
TEVF	Turbines Eoliennes à Vitesse Fixe.

LISTE DES SYMBOLES

TEVV	<i>Turbines Eoliennes à Vitesse Variable.</i>
μC	<i>Microcontrôleur.</i>
GS	<i>Générateur synchrone (GS).</i>
CC	<i>Courant continu.</i>
CA	<i>Courant alternatif.</i>

2. EN ANGLAIS

WRIG	<i>Générateur à induction à rotor bobiné (WRIG).</i>
PMSG	<i>Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG).</i>
WRSG	<i>Générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG).</i>
SCIG	<i>Générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG).</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing.</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array.</i>
PWM	<i>Pulse width modulation.</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor.</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking.</i>
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator.</i>
ADALINE	<i>ADaptive LINear Element.</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion.</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité [IDJ 10].

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

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées d'une génératrice asynchrones à double alimentation (GADA). Cette dernière permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT (maximum power point tracking) [HAS 12].

L'objectif principal de notre travail consiste à l'étude de la commande d'une GADA qui peut être introduite dans un système éolien. On a choisi deux types de commande, l'une classique (commande vectorielle), l'autre c'est la commande directe de couple (DTC).

La structure de notre mémoire est donnée comme suit :

Dans le **premier chapitre** nous présentons l'état de l'art de l'énergie éolienne. Nous donnons un aperçu sur les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, Ensuite, les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation seront étudiées.

Le **second chapitre** est dédié à l'étude des éléments essentielle de la chaîne éolienne. Elle est constituée de la turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne (voilure)et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible sont développés dans ce chapitre et ensuite la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Le **troisième chapitre** sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation de puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe (vitesse mécanique constante) et variable (avec turbine). Nous présentons le stator de la GADA et alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé MLI, l'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Dans le seconde lieu nous présentons le système complet constitué de : la turbine et la génératrice asynchrone double alimentation et convertisseur. On se met dans le cas le plus pratique ou l'alimentation de l'onduleur connectée au niveau du rotor est fournie par un convertisseur triphasé à MLI fonctionnant en redresseur. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux. Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink seront présentés.

- l'objet de la commande directe du couple de la GADA, il traite en premier lieu des rappels de notions de base sur la théorie de la commande directe de couple. Puis il présente la stratégie de commande par DTC appliquée à la génératrice asynchrone à double alimentation. L'objectif de cette commande est de contrôler le couple électromagnétique et le flux rotorique de la GADA. Les performances de la méthode seront justifiées par la simulation.

**CHAPITRE I :
BASES DES SYSTEMES DE
L'ENERGIE EOLIENNE**

I.1 Introduction

Dans le temps présent et futur, l'électricité est l'énergie la plus importante et le plus exploitée quotidiennement par l'être humain, et ce besoin en énergie électrique augmente d'année en année. Cette nécessité implique de trouver des ressources inépuisables et écologiques.

Parmi ces ressources renouvelable, le vent a été utilisé depuis des siècles pour moulinier les grains, avancer les bateaux, pomper de l'eau, et actuellement il est utilisé pour produire de l'électricité à base des éoliennes [1-3].

Dans ce chapitre nous allons parler sur l'énergie éolienne et leur évolution dans le temps, ses avantages et inconvénients, ses composantes, le principe de fonctionnement des éoliennes, suivi d'un rappel des différentes configurations possibles des systèmes éoliens et la chaîne de conversion à base des différentes génératrices.

I.1.1 Composantes d'une éolienne :

L'éolienne se compose de 3 parties principales comme indiqué sur la figure I.1.

- L'hélice.
- La nacelle.
- Le mat.

I.2.4.1 L'hélice (les pales) :

Elles sont au nombre de deux ou trois pales, qui permettent de capter la force du vent et donc transférer l'énergie mécanique au rotor.

I.2.4.2 La nacelle :

Dans laquelle la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est faite à base d'une génératrice, on trouve à l'intérieur [1-3, 6-9] :

- L'arbre (primaire/secondaire).
- Multiplicateur.
- Frein à disque qui stop le rotor si la vitesse du vent supérieure à 100 km/h.
- Système de contrôle.
- Anémomètre.

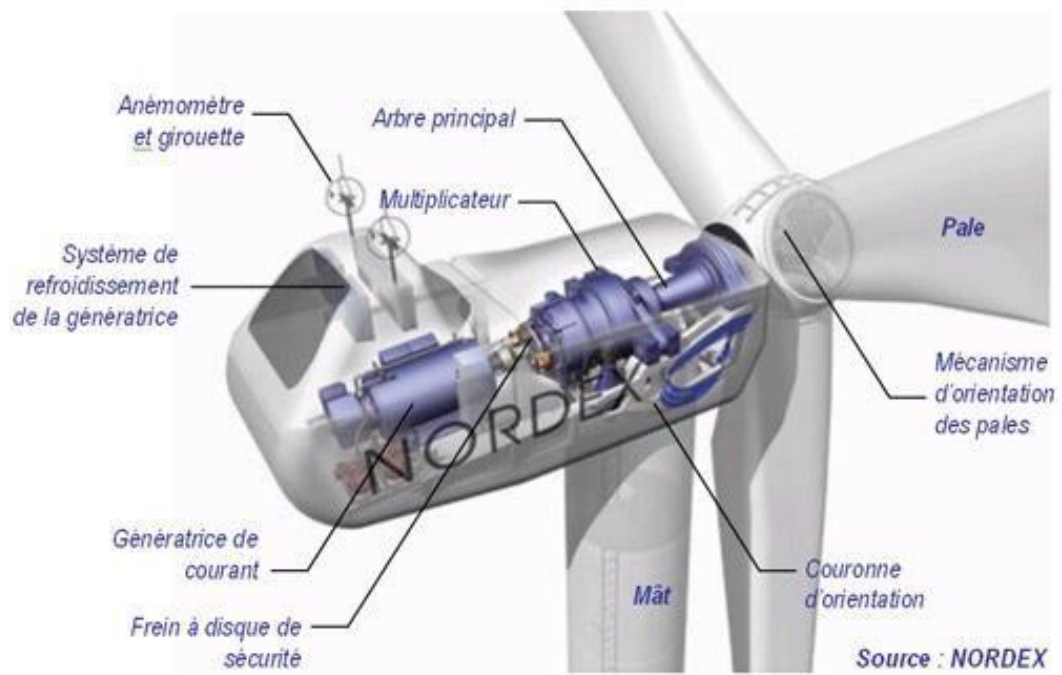


Figure I.1 : Composantes d'éolienne à axe horizontale [9].

II.2.1 Turbine :

La puissance totale du vent que traverse l'éolienne à chaque instant, peut être modélisée par l'expression suivante :

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

Avec : R est le rayon de la pale ; V est la vitesse du vent supposée uniforme sur les pales.

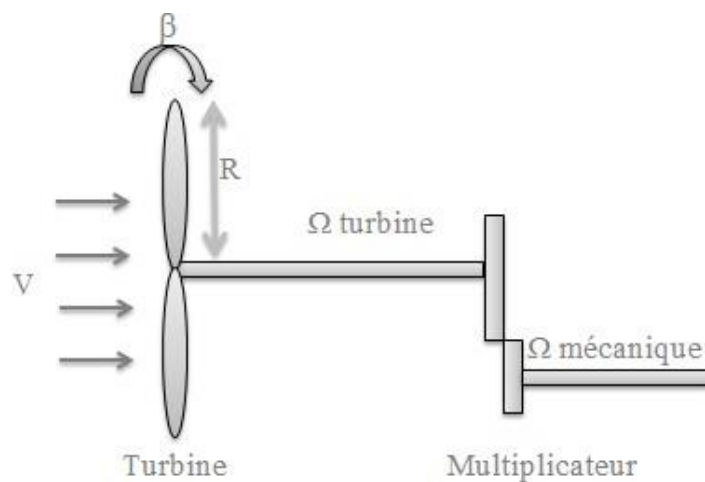


Figure II.2: la partie mécanique de l'éolienne.

Chapitre II Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une GADA

A partir de l'expression de la puissance du vent on peut définir la puissance captée par la turbine en utilisant le facteur de puissance (rendement de la turbine) C_p :

$$P_T = C_p \cdot P_V \quad (II.2)$$

$$P_T = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (II.3)$$

Avec : P_T est la puissance de la turbine.

* Définition de l'énergie éolienne

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

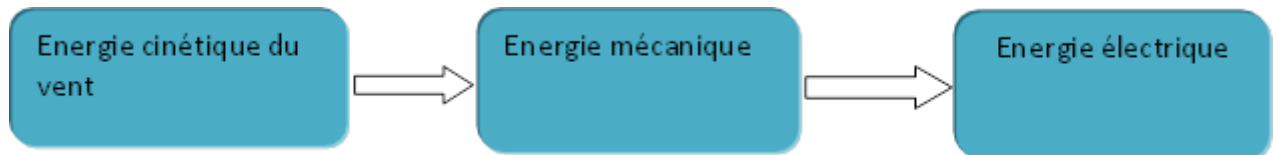


Fig.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [6]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [57].

I.2 Historique

L'énergie éolienne est exploitée par l'humanité depuis des millénaires pour transporter les navires à travers les océans, pomper l'eau et moudre le grain. La conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique a commencé dans les années 1880 avec une Turbine Eolienne (TE) équipée d'un générateur de courant continu (GCC) de 12 kilowatts (kW).

Pour produire de l'électricité à partir du système de conversion d'énergie éolienne de manière plus efficace et plus fiable, de nombreuses améliorations ont été apportées à la conception des appareils mécaniques et électriques de ce système.

L'expertise en matière de TE a atteint un niveau de maturité adéquat dans les années 1980, ce qui a conduit à la mise en service des premiers TE de 50 kW à l'échelle des services publics. Au cours des 40 dernières années, la taille des TE a progressivement augmenté et atteint actuellement un niveau massif de 15 à 20 mégawatts (MW). En raison de l'intégration rapide de l'énergie éolienne dans le réseau électrique, de nombreuses préoccupations sont apparues quant à la stabilité et à la sécurité du fonctionnement des systèmes électriques existants. Les exigences du code de réseau ont été mises à jour et appliquées dans de nombreux pays en ce qui concerne la

Chapitre II Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une GADA

connexion au réseau des grandes installations de production d'énergie éolienne et des Parcs Éoliens (PE).

Les convertisseurs d'électroniques de puissance sont utilisés dans les SCEEs depuis le début de l'exploitation de cette énergie surtout avec la connexion au réseau cette technologie a considérablement évolué au fil des ans [58], [61].

Diverses combinaisons d'éoliennes et de convertisseurs de puissance ont également été développées dans les SCEEs pour obtenir des opérations à vitesse fixe, à vitesse semi-variable et à vitesse entièrement variable. La technologie des Turbines Eoliennes à Vitesse Fixe (TEVf), qui utilise un convertisseur de puissance pour la fonction de démarrage est considérée comme obsolète.

Les Turbines Eoliennes à Vitesse Variable (TEVV) traitent la puissance de sortie électrique d'un générateur par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance et offrent une efficacité de conversion de l'énergie éolienne, une qualité d'énergie et une compatibilité avec les codes de réseau améliorés. Pour répondre à diverses exigences techniques, opérationnelles et de code de réseau, plusieurs configurations de convertisseurs de générateur ont été développées pour les SCEEs.

En plus de l'équipement de conversion de puissance, le développement de systèmes de contrôle est important pour le fonctionnement sûr et efficace. Le système de contrôle électrique est utilisé pour commander les éoliennes et les convertisseurs de puissance de manière à ce que l'énergie maximale soit extraite du vent et alimente le réseau électrique avec une qualité d'énergie élevée.

Les systèmes de contrôle électriques sont généralement mis en œuvre par des plateformes de contrôle numérique tel que le microcontrôleur (μC), le processeur de signal numérique (DSP) ou le réseau de portes programmables (FPGA).

I.3 Aperçu des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Nous allons présenter brièvement dans cette section, la capacité éolienne installée, l'aperçu général de la production d'énergie éolienne, l'évolution du SCEE en puissance nominale des turbines, les principaux composants des SCEEs connectés au réseau.

I.3.1 Capacité éolienne installée

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable qui connaît la croissance la plus rapide et continue à prospérer chaque année dans de nombreux pays [4].

La figure I.1 présente les capacités éoliennes cumulées et annuelles installées dans le monde.

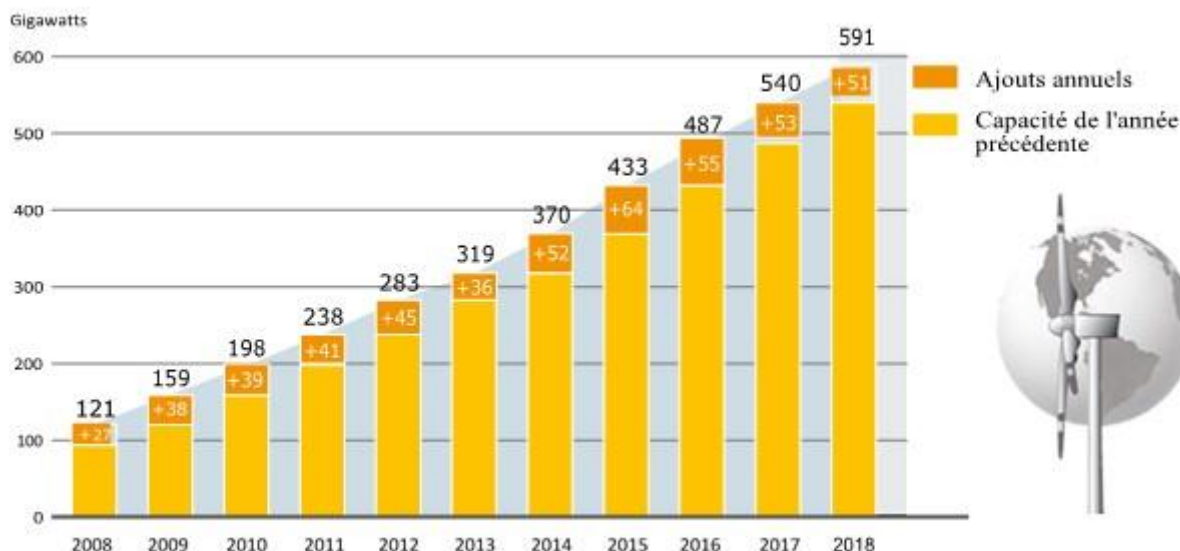


Figure I-1: Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts annuels, 2008-2018.

Le marché mondial de l'énergie éolienne est resté assez stable en 2018, avec une capacité installée d'environ 51 GW dans le monde (dont près de 47 GW à terre et 4,5 GW en mer), soit une baisse d'environ 4 % par rapport à 2017. Les installations terrestres ont été à l'origine de la totalité du déclin du marché. Il s'agissait de la cinquième année consécutive où les ajouts annuels dépassaient 50 GW, mais aussi de la troisième année de déclin après le pic de 2015, où la Chine a installé à elle seule plus de 30 GW avant les changements de politique. Les additions en 2018 ont fait augmenter la capacité cumulée de 9 %, à 591 GW, dont environ 568,4 GW sur terre et le reste en mer [4].

I.3.2 Aperçu général de la production d'énergie éolienne

La figure ci-dessous indique les dix premiers pays en termes de capacité éolienne installée cumulative et annuelle dans le monde [4].

L'Asie a été le plus grand marché régional, représentant près de 52 % (contre 48 %) de la capacité ajoutée, avec un total de plus de 262 GW à la fin de l'année 2019. L'Europe (près de 22 %), l'Amérique du Nord (près de 16 %) et l'Amérique latine et les Caraïbes (plus de 7 %) ont

Chapitre II Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une GADA

représenté la majeure partie du reste des installations de 2018. La Chine a conservé sa position de tête pour les nouvelles capacités (à la fois sur terre et en mer) et a été suivie de loin par les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde et le Brésil, le Royaume-Uni étant proche derrière. Les autres pays qui figurent dans le top 10 des ajouts de capacité sont la France, Mexique, Suède et Canada. Pour la capacité cumulée, les 10 premiers pays sont restés inchangés par rapport à 2017.

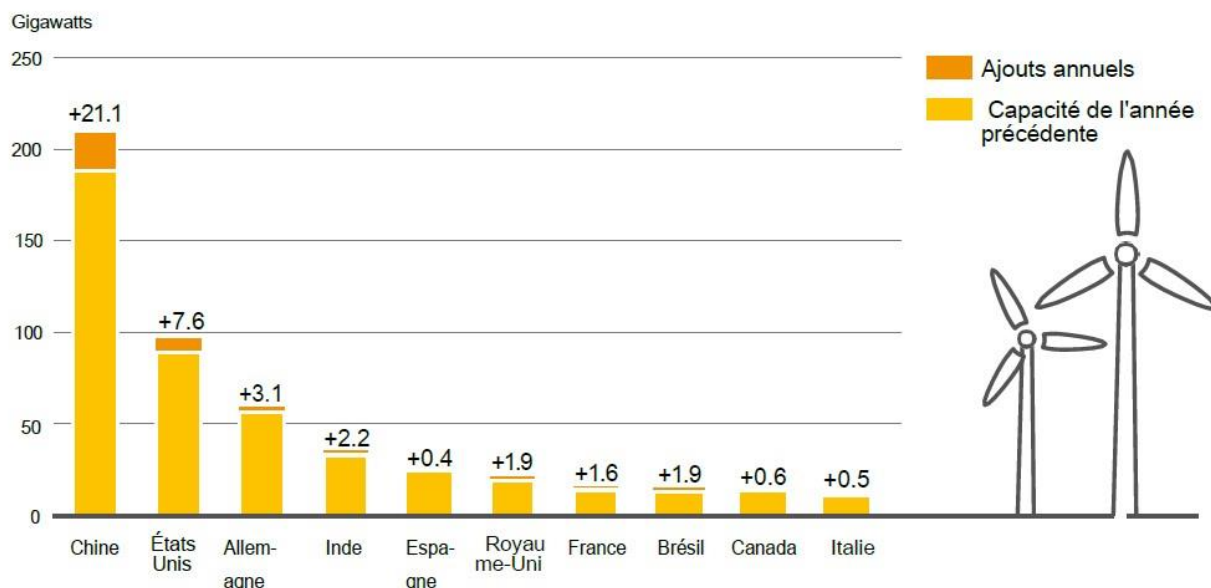


Figure I-2: Capacité de production d'énergie éolienne et ajouts, 10 premiers pays, 2018 [4].

Tableau I-1 : Capacité mondiale d'énergie éolienne et ajouts du 10 premiers pays 2018 [4].

Pays	Total fin 2017	Ajouté en 2018	Total fin 2018
Principaux pays par ajouts	GW	GW	GW
<i>Chine</i>	188.4	21.1	210
<i>États-Unis</i>	89	7.6	96.5
<i>Allemagne</i>	56.2	3.1	59.3
<i>Inde</i>	32.9	2.2	35.1
<i>Brésil</i>	12.8	1.9	14.7
<i>Royaume-Uni</i>	19.1	1.9	21
<i>France</i>	13.8	1.6	15.3
<i>Mexique</i>	4	0.9	5
<i>Suède</i>	6.7	0.7	7.4
<i>Canada</i>	12.2	0.6	12.8
Principaux pays par capacité totale	GW	GW	GW
<i>Chine</i>	188.4	21.1	210
<i>États-Unis</i>	89	7.6	96.5
<i>Allemagne</i>	56.2	3.1	59.3

<i>Inde</i>	32.9	2.2	35.1
<i>Espagne</i>	23.1	0.4	23.5
<i>Royaume-Uni</i>	19.1	1.9	21
<i>France</i>	13.8	1.6	15.3
<i>Brésil</i>	12.8	1.9	14.7
<i>Canada</i>	12.2	0.6	12.8
<i>Italie</i>	9.5	0.5	10

I.3.3 Évolution du SCEE en puissance (mégawatt)

La puissance d'une éolienne est proportionnelle au carré du diamètre du rotor et au cube de la vitesse du vent. Les grandes turbines peuvent capter une puissance éolienne plus élevée avec des coûts d'installation et de maintenance plus faibles par rapport au groupe des petites turbines. De ce fait, la taille des éoliennes commerciales a augmenté de façon exponentielle au cours des 30 dernières années, comme le montre la figure 1.3. La taille des turbines est passée de 50 kW en 1980 à 15-20 MW en 2020 [6]–[8].

On prévoit que des turbines de 15 à 20 MW seront développées dans un avenir proche avec des diamètres de rotor dépassant 150 m, soit environ deux fois la longueur d'un Boeing 747. Les éoliennes en mer font également l'objet d'une plus grande attention aujourd'hui, car la production d'électricité peut être augmentée à l'aide de vents plus forts et réguliers.

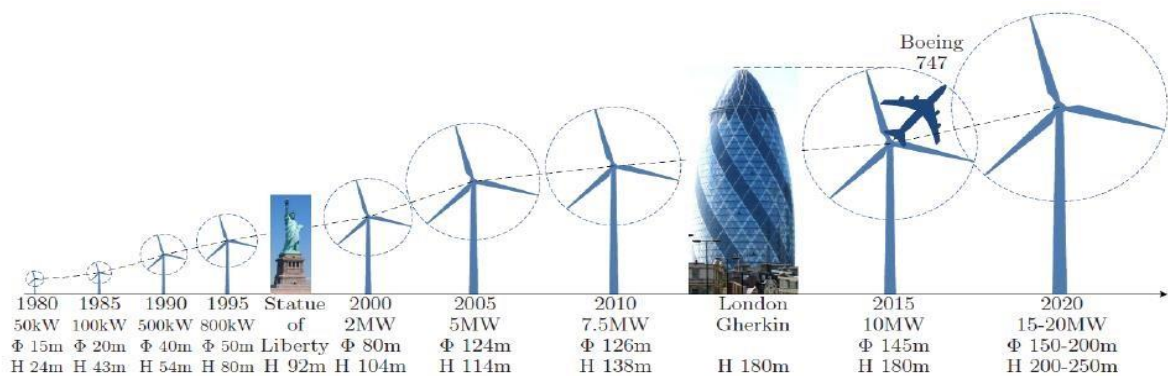


Figure I-3: Évolution de la taille des Turbines éoliennes (puissance nominale de sortie de la turbine, son diamètre et la hauteur de moyeu) [2].

I.3.4 Principales composantes des SCEE connectés au réseau

La figure ci-dessous illustre les divers composants mécaniques et électriques utilisés pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, dans un système de conversion d'énergie éolienne, d'une manière contrôlable, fiable et efficace.

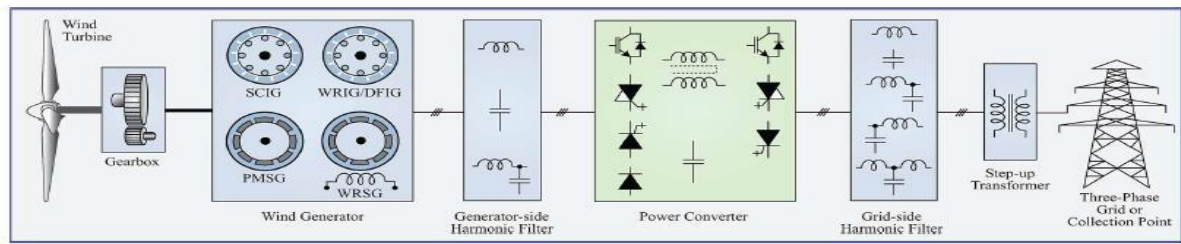


Figure I-4: Configuration de base d'une éolienne connectée au réseau.

Les principaux composants d'un SCEE peuvent être classés en gros comme des systèmes mécaniques, électriques et de contrôle.

I.3.4.1 Composants mécaniques :

Les composants mécaniques comprennent la tour, la nacelle, les pales de rotor, le moyeu de rotor, le multiplicateur, les entraînements de pas, les entraînements de la nacelle, les capteurs de vitesse du vent et les freins mécaniques [9].

I.3.4.2 Composants électriques :

Les composants électriques comprennent un générateur électrique, un éventuel convertisseur électronique de puissance ainsi que des filtres harmoniques côté générateur et côté réseau, un transformateur élévateur et un réseau triphasé [6].

I.3.4.3 Composantes de contrôle :

Les composants liés à la commande sont utilisés pour le contrôle mécanique et électrique du SCEE [10]–[12]. Les parties les plus visibles des grandes éoliennes sont la tour, la nacelle et les pales de rotor, et le reste des composants sont logés à l'intérieur de l'éolienne. L'énergie cinétique du vent est d'abord convertie en énergie mécanique à l'aide de pales de rotor. La tour, la nacelle et les moyeux du rotor fournissent un support mécanique aux pales du rotor. Le rendement de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique dépend de nombreux facteurs tels que la forme des pales de rotor, l'angle des pales, la vitesse du vent, la densité de l'air. La vitesse et la direction du vent sont mesurées à l'aide de capteurs, et un mouvement de la nacelle est utilisé pour déplacer les pales du rotor avec la nacelle vers le vent afin d'extraire le maximum d'énergie possible. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale, les entraînements en pas sont utilisés pour modifier l'angle des pales de telle sorte que la puissance électrique produite soit

Chapitre II Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une GADA

limitée à la valeur nominale. Les éoliennes en grande puissance tournent généralement à très basse vitesse (généralement 6-20 tr/min) et avec un couple élevé [6], [8].

Un générateur électrique est utilisé pour convertir l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. De nombreux générateurs éoliens différents, tels que le générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG), le générateur à induction à rotor bobiné (WRIG), le générateur à induction à double alimentation (DFIG), le générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) et le générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG) ont été développés au cours des 30 dernières années. Les principales caractéristiques et les inconvénients de chacun de ces générateurs sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens [11].

Générateur à induction à cage d'écureuil (SCIG)	Avantage : Construction simple et robuste Coût initial et de maintenances réduites Facilement disponible pour les applications MW Inconvénients : Limité à l'exploitation à grande vitesse uniquement Consomme la puissance réactive du réseau Nécessite un démarreur progressif pour limiter le courant d'appel
Générateur à induction à rotor bobiné (WRIG) Générateur à induction double alimentation (DFIG)	Avantage : La puissance du rotor permet une vitesse variable Capacité de couple de démarrage élevé Contrôle souple de la puissance réactive Inconvénients : Le coût initial et de maintenance est élevé Faible facteur de puissance (FP) à faible charge Les bagues de glissement ont besoin de soins réguliers
Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG)	Avantage : Densité de puissance élevée et fiabilité Pas besoin d'excitation et de boîte de vitesse Pertes de rotor réduites et rendement élevé Inconvénients : Coût élevé du matériel PM Démagnétisation possible des particules Les générateurs à faible vitesse sont lourds
Générateur synchrone à rotor bobiné (WRSG)	Avantage : Contrôle indépendant des P et Q Il est possible d'obtenir un couple élevé Supprime la nécessité d'une boîte de vitesses Inconvénients : Coût élevé du capital et de l'entretien
	Nécessite un circuit d'excitation supplémentaire Il faut accorder une attention particulière aux collecteurs tournants

I.4 Critères de la classification des SCEEs

Dans l'industrie actuelle de l'énergie éolienne, les principales technologies du SCEE sont classées en fonction de divers facteurs [10]. Les facteurs de classification les plus importants sont basés sur les éléments suivants :

Chapitre II Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une GADA

1. puissance électrique de sortie nominale de la turbine (faible, moyenne et forte puissance),
2. schéma de régulation aérodynamique de la puissance dans des conditions de vitesse de vent élevée (contrôle du décrochage et du tangage),
3. alignement de l'arbre de la turbine par rapport au sol (axe vertical et horizontal),
4. type d'application pour alimenter la puissance électrique de sortie de la turbine (autonome et connectée au réseau),
5. la vitesse de fonctionnement du générateur éolien par rapport aux différentes vitesses du vent

(vitesse fixe et variable),

6. le lieu d'érection des SCEE (sur terre et en mer),
7. le type d'accouplement mécanique entre la turbine et l'arbre du générateur (avec ou sans multiplicateur), et
8. les vitesses du vent (faibles, moyennes et élevées) affectant les SCEE.

I.5 Concepts et topologies des éoliennes

Le développement de la technologie des éoliennes est constant depuis 35 ans [5], [12], [13].

Selon les types de générateurs, l'électronique de puissance, la contrôlabilité de la vitesse et la manière dont la puissance aérodynamique est limitée, les conceptions d'éoliennes peuvent généralement être classées en plusieurs concepts [5], [13]. Dans ces concepts d'éoliennes, l'électronique de puissance joue un rôle très différent et couvre une gamme de puissances variées. Jusqu'à présent, la configuration du générateur à induction doublement alimenté (GADA) équipé d'un convertisseur de puissance partiel domine le marché, mais dans un avenir très proche, la configuration avec générateur synchrone (GS) et convertisseur de puissance complet devrait prendre le relais pour devenir la solution dominante [5], [13]. Dans ce qui suit, ces deux états de l'art des concepts d'éoliennes vont être introduits.

Les principaux composants électriques du SCEE sont le générateur et le convertisseur électronique de puissance. Comme le montre les figures (I.5 - I.8), en utilisant différentes conceptions et combinaisons de ces deux composants, il est possible d'obtenir une grande variété de configurations du SCEE telles que [8], [12]–[14] :

1. Type-1 : SCEE basé sur le SCIG avec une plage de vitesse de $\pm 1\%$.
2. Type-2 : SCEE à vitesse semi-variable ($\pm 10\%$) avec WRIG.

3. Type-3 : SCEE à vitesse semi-variable $\pm 30\%$) avec DFIG.
4. Type-4 : SCEE à vitesse variable (0-100%) avec SCIG ou PMSG ou WRSG.

I.5.1.1.1 Type-1 du SCEE

La figure I-5 illustre un SCEE à vitesse fixe basé sur un générateur à induction à cage d'écureuil SCIG sans interface de convertisseur de puissance (turbine du type 1), où le générateur est connecté au réseau par un démarreur progressif et un transformateur élévateur [8], [15]. La vitesse du générateur varie dans une fourchette de 1 % à différentes vitesses de vent, et cette configuration est donc appelée SCEE à vitesse fixe. Un multiplicateur de vitesses est normalement nécessaire pour faire correspondre la différence de vitesse entre la turbine et le générateur. Après la procédure de démarrage, le démarreur progressif est contourné par un interrupteur, et le système fonctionne essentiellement sans convertisseur de puissance. Le SCIG tire sa puissance réactive du réseau et pour compenser cela, des batteries de condensateurs triphasés sont généralement utilisées [16].

Cette configuration se caractérise par sa simplicité, son faible coût initial et son fonctionnement fiable. Les principaux inconvénients sont les suivants :

1. Un rendement de conversion de l'énergie éolienne plus faible,
2. Des changements de vitesse du vent sont répercutés sur le réseau, et
3. Des défauts du réseau provoquant de fortes contraintes sur les composants mécaniques de l'éolienne [17].

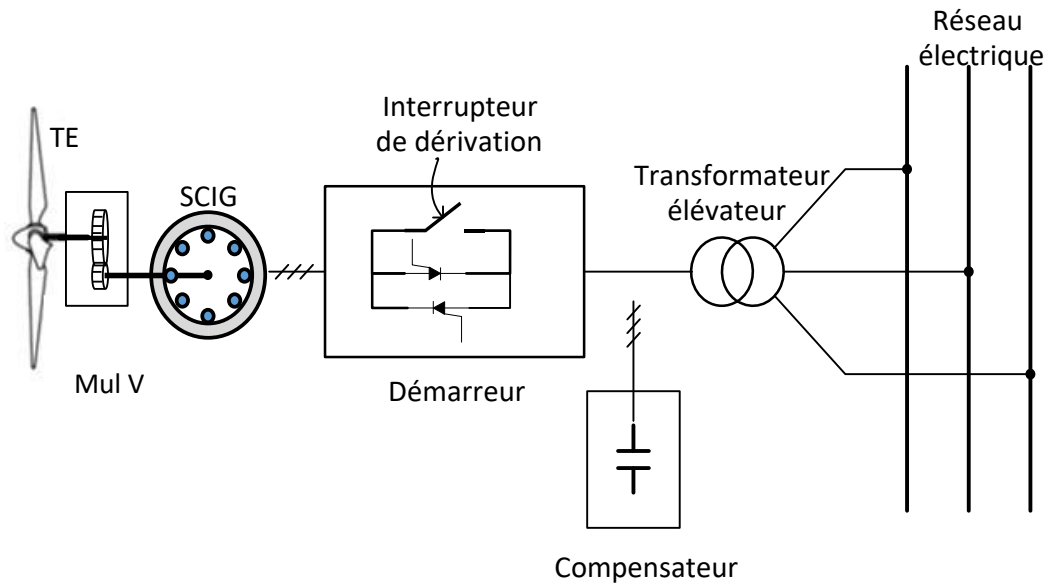


Figure I-5: Type 1- SCIE basé sur le SCIG avec une plage de vitesse de $\pm 1\%$.

I.5.1.1.2 Type-2 du SCEE

Le fonctionnement à vitesse variable de l'éolienne augmente l'efficacité de la conversion énergétique et réduit les contraintes mécaniques causées par les rafales de vent, réduit l'usure de la boîte de vitesses et des roulements, diminue les besoins de maintenance et augmente le cycle de vie. La figure I.6 (turbine de type 2) montre le SCEE à vitesse semi-variable utilisant le WRIG et un convertisseur de puissance partiellement nominal (10 %).

La modification de la résistance du rotor affecte la caractéristique couple/vitesse du générateur, permettant un fonctionnement à vitesse variable de la turbine [18].

La résistance du rotor est normalement réglable par un convertisseur de puissance composé d'un redresseur à diode et d'un hacheur [19], [20]. La plage de réglage de la vitesse est généralement limitée à environ $\pm 10\%$ de sa vitesse nominale. Avec un fonctionnement à vitesse variable, le système peut capter plus de puissance du vent, mais il y a aussi des pertes d'énergie dans la résistance du rotor. Cette configuration nécessite également une boîte de vitesses, un démarreur progressif et une compensation de la puissance réactive.

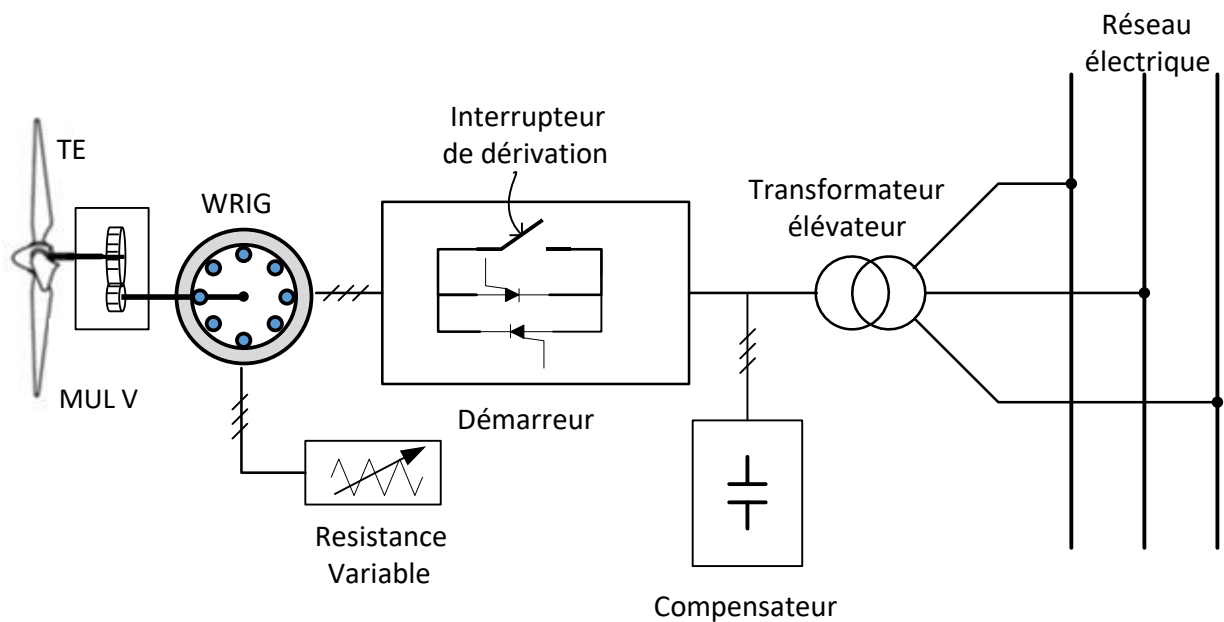


Figure I-6: Type 2 - SCEE à vitesse semi-variable ($\pm 10\%$) avec WRIG.

I.5.1.1.3 Type-3 du SCEE

La figure I.7 présente un autre type du SCEE à vitesse semi-variable utilisant la GADA (turbine de type 3) [21]. Comme son nom l'indique, la puissance du générateur est fournie au réseau par les enroulements du stator et du rotor [22], [23].

Chapitre II Modélisation de la chaîne de conversion à base d'une GADA

Un convertisseur de puissance nominale partielle (30 %) est utilisé dans le circuit du rotor pour traiter la puissance de glissement, qui représente environ 30 % de la puissance nominale du générateur. Comme pour les turbines de type 1 et 2, cette configuration utilise également la boîte de vitesses, mais il n'est pas nécessaire d'avoir un démarreur progressif et une compensation de la puissance réactive [24], [25].

L'utilisation des convertisseurs permet également un flux de puissance bidirectionnel dans le circuit du rotor et augmente la plage de vitesse du générateur. Ce système se caractérise par un meilleur rendement global de conversion de puissance, une plage de vitesse étendue +30 %, des performances dynamiques améliorées et une robustesse aux perturbations du réseau électrique par rapport aux turbines de type 1 et 2 [26], [27].

Ces caractéristiques ont fait du SCEE basé sur une GADA, l'une des technologies dominantes de l'industrie éolienne actuelle avec une part de marché d'environ 50 % [7]. Ce concept d'éolienne est la solution la plus adoptée de nos jours et elle a été largement utilisée depuis les années 2000. Comme le montre la figure I-7, un convertisseur électronique de puissance est adopté en conjonction avec le générateur à induction double alimentation (GADA). Les enroulements du stator de la GADA sont directement connectés au réseau électrique, tandis que les enroulements du rotor sont connectés au réseau électrique par le convertisseur avec normalement 30 % de la capacité de la turbine éolienne [28], [29].

Dans ce concept, la fréquence et le courant dans le rotor peuvent être régulés de manière flexible et ainsi la plage de vitesse variable peut être étendue à un niveau satisfaisant. La capacité réduite du convertisseur rend ce concept attrayant du point de vue des coûts. Toutefois, ses principaux inconvénients sont l'utilisation de bagues collectrices et la contrôlabilité insuffisante de la puissance en cas de panne du réseau ; ces inconvénients peuvent comprendre la fiabilité et peut être difficile à satisfaire complètement les futures exigences en matière de réseau, comme le prétendent les [30], [31].

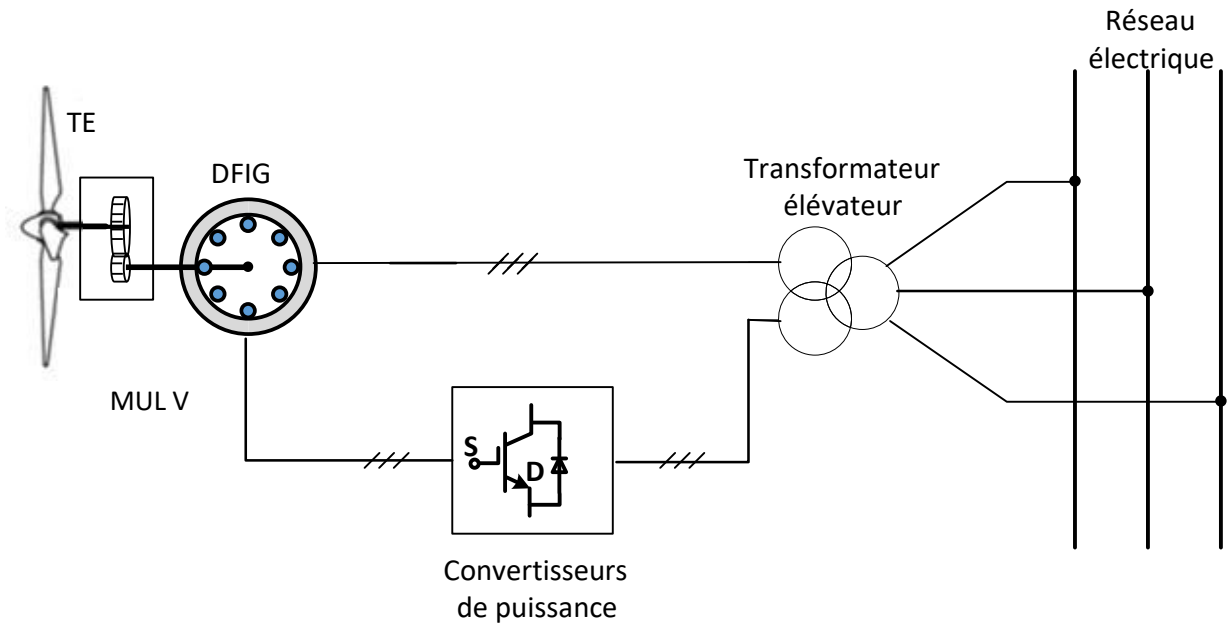


Figure I-7: Type 3 - SCEE à vitesse semi-variable $\pm 30\%$) avec DFIG.

I.5.1.1.4 Type-4 du SCEE

Afin d'obtenir un fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse du vent, des turbines de type 4 ont été développées au cours des années 1990. La configuration du SCEE de type 4 avec un générateur éolien et un convertisseur de puissance à grande Puissance, comme le montre la figure (I.8) [12]. Les PMSG, WRSG et SCIG ont tous trouvé des applications dans ce type de configuration avec une puissance nominale pouvant atteindre plusieurs mégawatts [32], [33]. Grâce à l'utilisation du convertisseur de puissance, le générateur est entièrement découplé du réseau et peut fonctionner à pleine vitesse [32], [34], [35]. Cela permet également au système d'effectuer une compensation de la puissance réactive et une connexion au réseau en douceur [36].

Cependant, les composants électroniques de puissance plus sollicités et plus coûteux ainsi que les pertes de puissance plus élevées dans le convertisseur sont les principaux inconvénients de ce concept. La nécessité d'une boîte de vitesses peut être éliminée en utilisant des nombres de pôle élevés PMSG/WRSG.

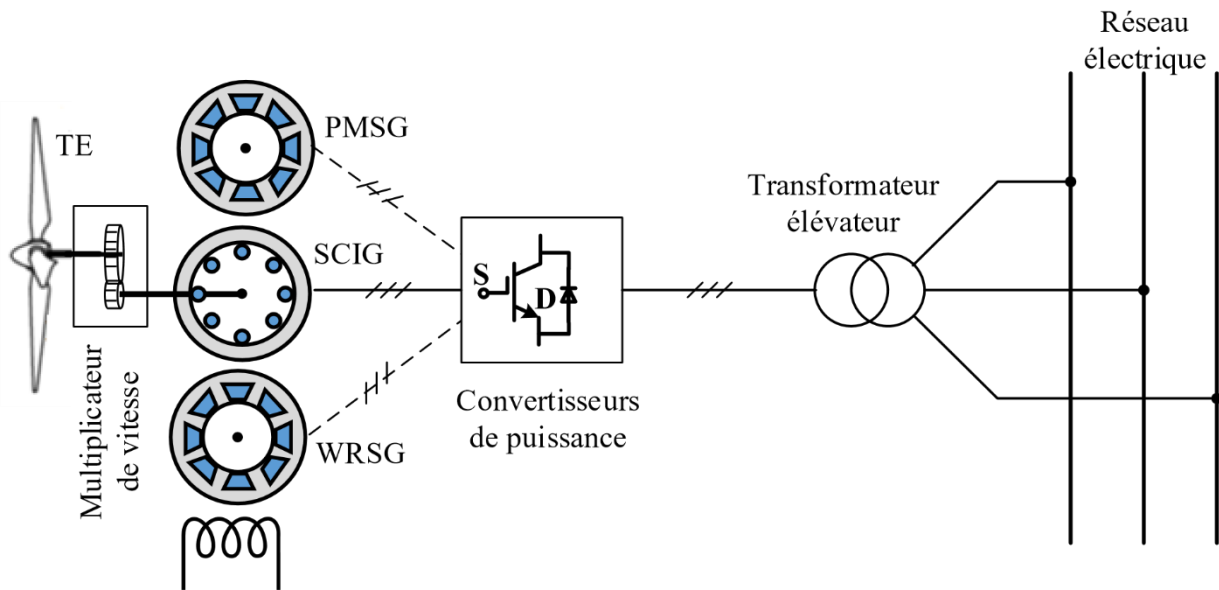


Figure I-8: Type 4 - SCEE à vitesse variable (0-100%) avec SCIG ou PMSG ou WRSG.

La figure I-9 représente la chaîne de conversion éolienne sur laquelle nos travaux de thèse seront basés. Donc, nous avons choisi d'étudier un système éolien à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné de 2 MW [37], plus communément appelé génératrice asynchrone à double alimentation. Le stator est directement connecté au réseau alternatif, tandis que le rotor est alimenté depuis les deux convertisseurs électroniques de puissance par l'intermédiaire de bagues collectrices pour permettre à la GADA de fonctionner selon l'évolution de la vitesse du vent. En effet, le concept de base consiste à interposer deux convertisseurs de fréquence entre la génératrice asynchrone à fréquence variable de son rotor et le réseau à fréquence fixe. Le courant continu disponible à la sortie du convertisseur de puissance côté réseau est filtré et convertie en courant alternatif à l'aide du convertisseur côté génératrice.

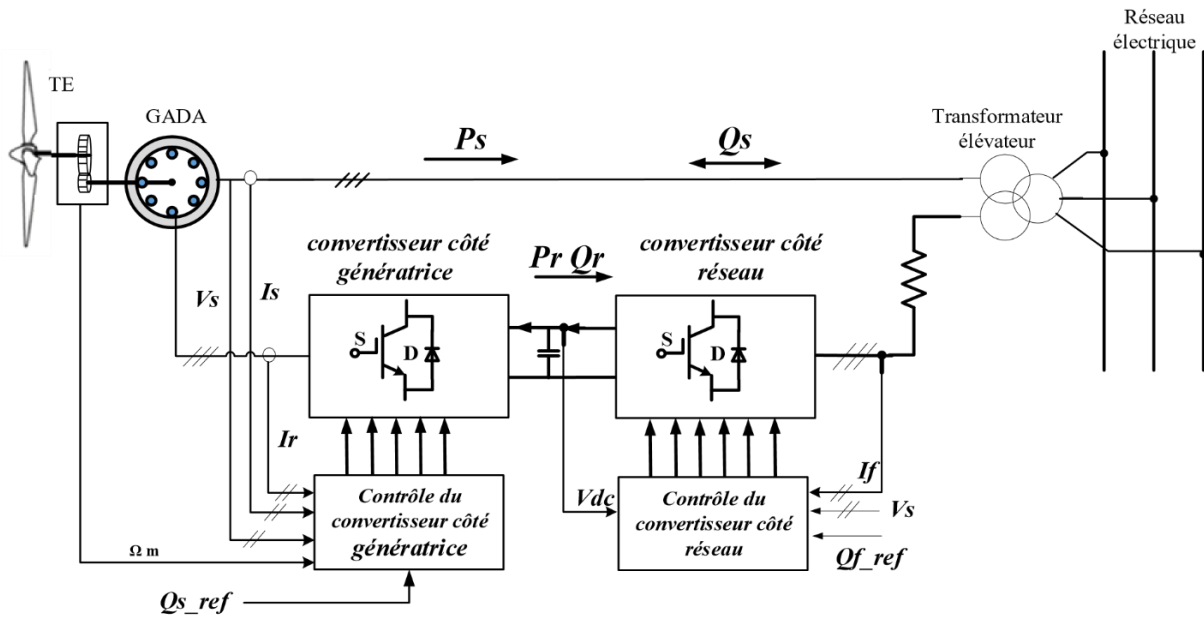


Figure I-9: Système éolien basé une GADA

Conclusion

L'énergie éolienne joue un rôle important dans l'approvisionnement énergétique futur dans de nombreuses régions du monde. Au cours des 12 dernières années, la technologie des éoliennes a atteint un niveau très fiable et sophistiqué. Le marché mondial en pleine croissance va entraîner d'autres améliorations, telles que des turbines éoliennes plus grandes ou de nouvelles applications de systèmes. Ces améliorations entraîneront de nouvelles réductions de coûts et, à moyen terme, l'énergie éolienne sera en mesure de concurrencer la technologie classique de production d'électricité à partir de combustibles fossiles.

Nous avons donné dans ce chapitre, un aperçu des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les capacités installées en puissance dans le monde, l'évolution du SCEE. Les principes fondamentaux des systèmes d'énergie éolienne ont été abordés également.

Afin d'entamer l'étude du système éolien choisi, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de la turbine éolienne et l'application de différentes commandes pour différents régimes de fonctionnement de l'éolienne.

CHAPITRE II :

MODELISATION ET COMMANDE DE

LA TURBINE EOLIENNE

II.1 Introduction

Parmi les différentes technologies de production éolienne disponibles, les éoliennes à vitesse variable et à calage variable c.-à-d. à des pales orientables utilisant des génératrices asynchrone double alimentation sont les plus populaires dans le secteur d'énergie éolienne, en particulier pour les générateurs éoliens de grandes puissances [31], [38].

L'objectif de ce deuxième chapitre sera consacré à l'étude de modélisation et de la commande de la turbine éolienne. Dans un premier temps, nous allons présenter le modèle du vent qui sera appliqué à la turbine, le modèle aérodynamique, mécanique de la turbine. Ensuite, les différentes commandes appliquées afin d'extraire le maximum de puissance électrique pendant les faibles vitesses et la commande pour limiter la puissance pendant les fortes vitesses du vent seront examinées également. Enfin, des résultats de simulation seront présentés afin de valider les commandes étudiées.

II.1 Modélisation de la partie électrique :

C'est la partie de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique à l'aide d'une GADA et un convertisseur back to back.

II.2 Composants du système éolien basé sur une GADA

Le système de conversion d'énergie éolienne basé sur une GADA se compose essentiellement d'une génératrice, d'une turbine à calage variable avec système de transmission (Multiplicateur de vitesse), d'un Convertisseur Coté Réseau, d'un Convertisseur Coté Génératrice, d'un condensateur de bus continu, d'un transformateur de couplage et d'un système de contrôle et de protection comme indiqué à la figure I.9 [38], [39].

La GADA est une génératrice à induction à rotor bobiné dont les bornes de son stator sont connectées directement au réseau électrique et les bornes de son rotor sont connectées au même réseau par l'intermédiaire des deux convertisseurs statiques triphasés à IGBT ou à MOSFET à fréquence variable. Ces convertisseurs ne doivent traiter qu'une fraction (25 - 30 %) de la puissance totale pour assurer le contrôle complet du générateur. Grâce à la bidirectionnalité de ces convertisseurs la GADA peut fonctionner en mode hypo ou hyper synchrone [39], donc elle fonctionne sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent (Commande MPPT) et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées (pitch Control).

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation des machines électriques par des équations électriques dédiées pour l'étude de la commande est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices classiques, [1-3, 7-9]. Ces hypothèses sont :

- La machine a une structure symétrique au stator et au rotor.
- Pertes fer et effet de peau négligés (seuls les enroulements du stator et du rotor sont parcourus par des courants).
- La saturation des tôles ferromagnétiques et l'effet de la température sont négligés.
- Les inductions magnétiques sont supposées sinusoïdales.
- Effet d'encoches négligé (entrefer constant).

II.3.1.1 Commande MLI sinus :

La modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : *Pulse Width Modulation*, soit *PWM*), est une technique utilisée pour commander les onduleurs de tension. La MLI sinus est la plus classique et la plus connue des techniques MLI. Son schéma de base est donné par la figure II.13.

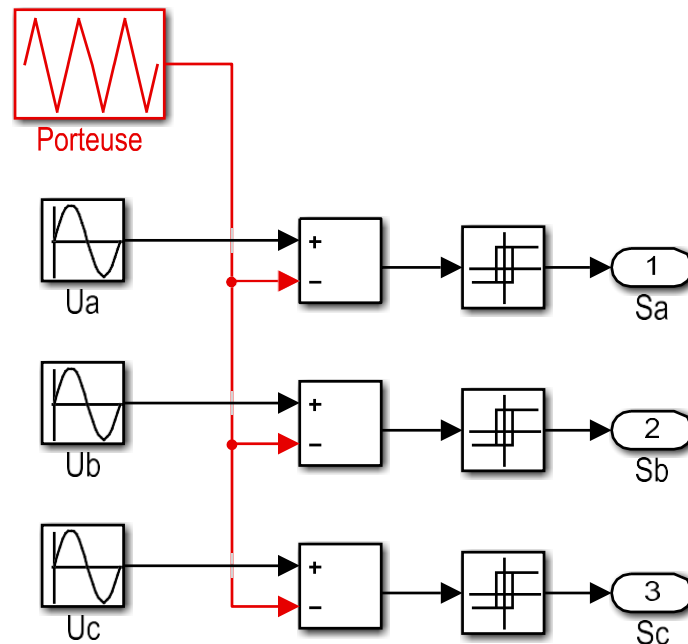


Figure II.12 : schéma de la commande MLI sinus réalisé avec SMULINK

II.3.2 Structure de la MADA :

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. Son rotor comporte un enroulement triphasé de la même manière que les enroulements du stator, mais connecté toujours en étoile. Ces enroulements sont reliés à un système de contacts balais-bagues permettant d'avoir accès aux bobines du rotor [17, 18].

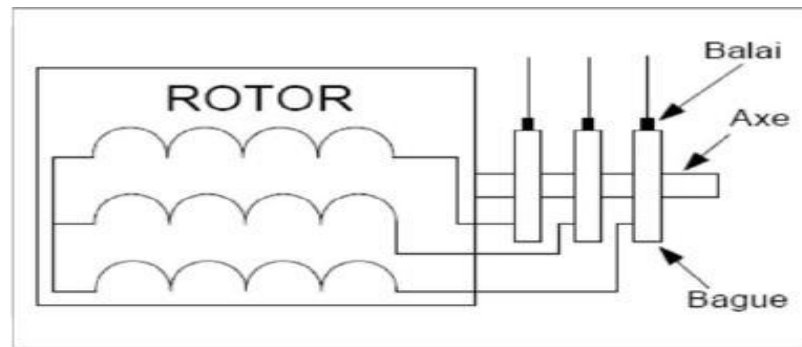


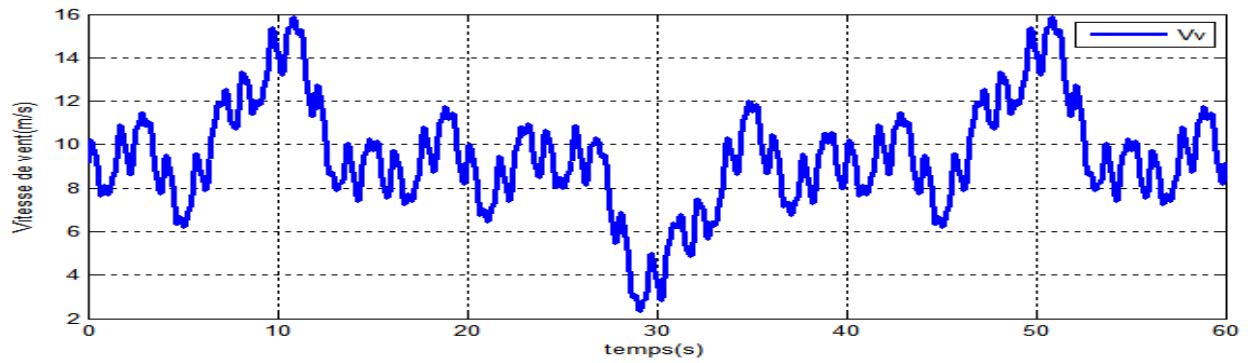
Figure II.4 : Principe du rotor bobiné [17].

II.3.1 Modèle du vent appliqué au système.

Afin que la chaîne éolienne fonctionne et produit des puissances utilisables, elle avait besoin d'une source primaire et fondamentale c'est l'énergie cinétique du vent. Le vent joue un rôle primordial pour l'étude du système de conversion d'énergie éolienne car la puissance éolienne est en fonction de sa vitesse.

Dans cette étude, afin que notre GADA fonctionne en hypo et hyper synchrone et qu'on puisse aussi valider le contrôle d'orientation des pales (pitch control) nous avons choisi un profil de la vitesse du vent représenté par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [40], [41] :

$$V_v(t) = 9.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (\text{II.1})$$



Avec : $\omega = \pi/20$

Figure II-1: Simulation du profil de la vitesse du vent appliqué à la turbine.

II.3.2 Modèle aérodynamique

La puissance aérodynamique d'une éolienne P_{aer} , en régime permanent selon la théorie de Betz peut être déterminée par [42]:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (II.2)$$

Où :

- ρ : Masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m³ à la pression atmosphérique et à 15°C).
- S : Surface circulaire balayée par la turbine.
- V_v : Vitesse du vent.
- $C_p(\lambda, \beta)$: Coefficient de puissance qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Le ratio de vitesse λ définit comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V_v} \quad (II.3)$$

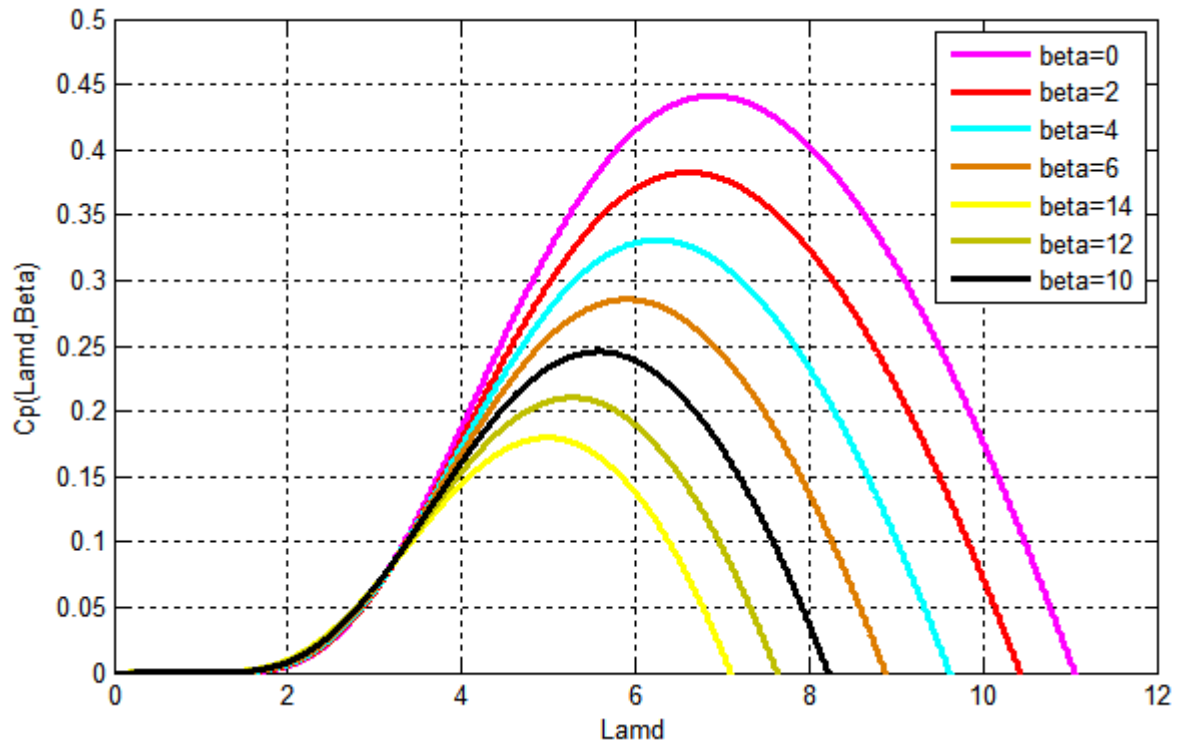
Avec :

- Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine ;
- R_t : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Généralement, le coefficient de puissance est fonction du rapport de vitesse de pointe et de l'angle de pas des pales. Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons une expression pour une éolienne de 2 MW, qui est donnée dans les travaux de recherche de [43]–[48]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73(151 + 0.002\beta^{2.14} - 13.2)e^{-18.4/\lambda_i} \quad (\text{II. 4})$$

Avec :



$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 5})$$

La figure II-2 montre la relation entre C_p , β et λ .

Figure II-2 : Courbes des coefficients de puissance d'une éolienne à pas régulé de 2 MW, pour différents angles β .

À partir de la vitesse de rotation de la turbine, nous pouvons définir le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine par l'équation suivante [44]:

A partir des équations précédentes le schéma bloc correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne est représenté par la figure suivante :

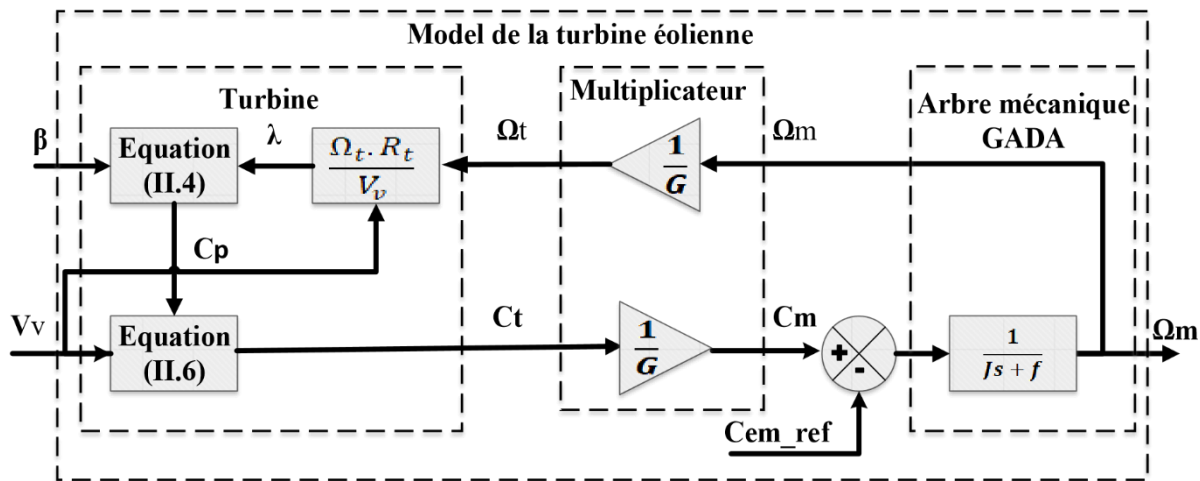


Figure II-4 : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

Grâce au contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation, le couple électromagnétique de référence est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la GADA. Selon les équations précédentes, Le schéma bloc présente le principe du contrôle MPPT du système éolien sans asservissement da la vitesse de rotation est illustrée par la figure suivante [49], [50].

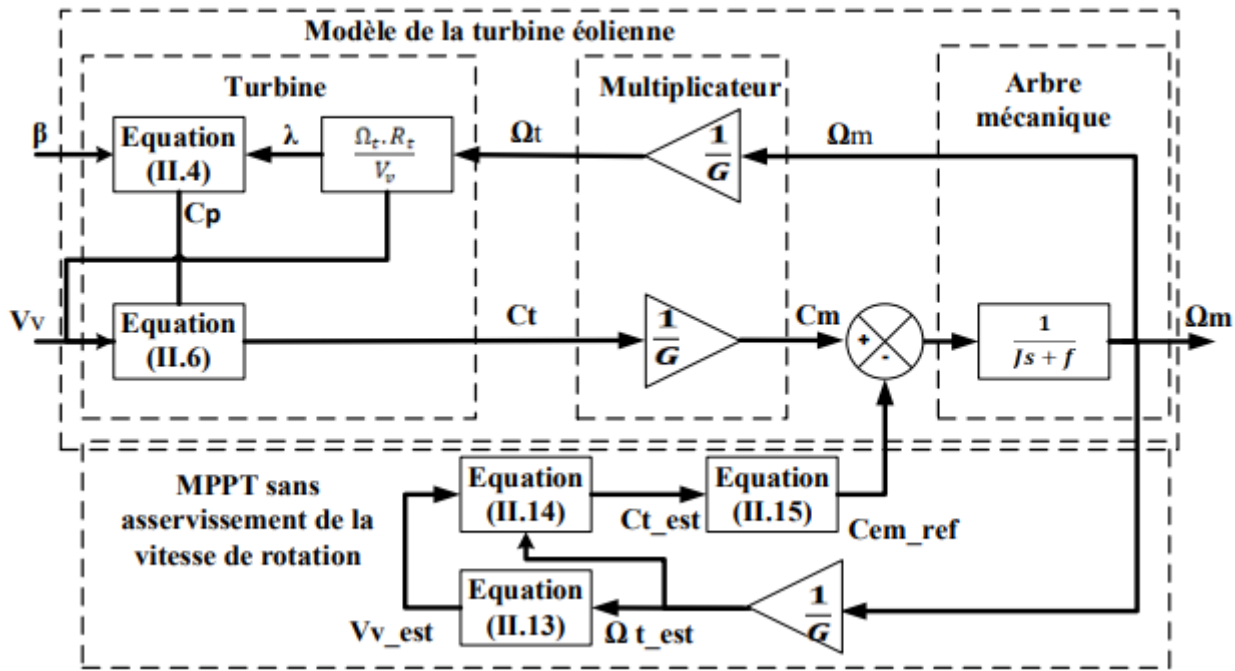


Figure II-5:

Schéma bloc du contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.1.2.1 Contrôle avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

Dans l'industrie, les algorithmes de contrôle de processus les plus couramment utilisés sont sans aucun doute le contrôleur PI, en raison de sa simplicité en termes de structure, qui peut être facilement compris et mis en œuvre de manière pratique. Ce type de régulateur est une combinaison d'action proportionnelle et intégrale. Elle a pour effet d'améliorer simultanément les états stable et transitoire [50], [51]. Ce contrôleur PI calcule une valeur "d'erreur" comme étant la différence entre une variable de processus mesurée et un point de consigne souhaité.

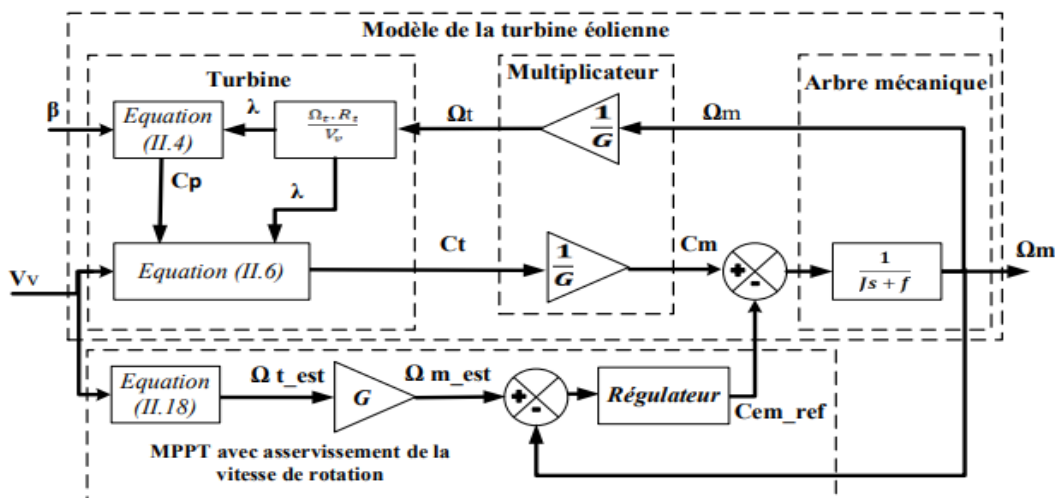
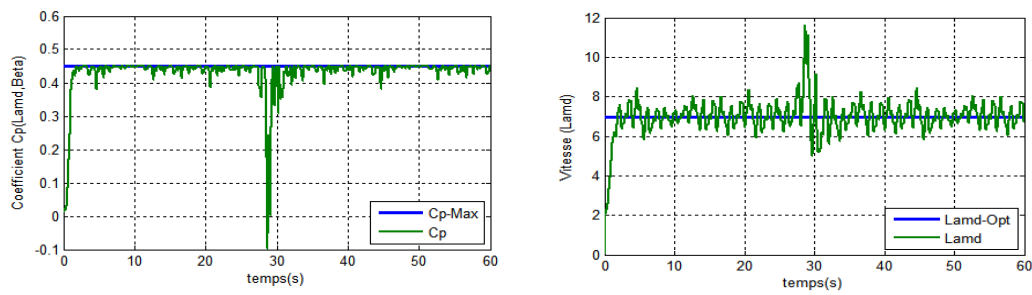
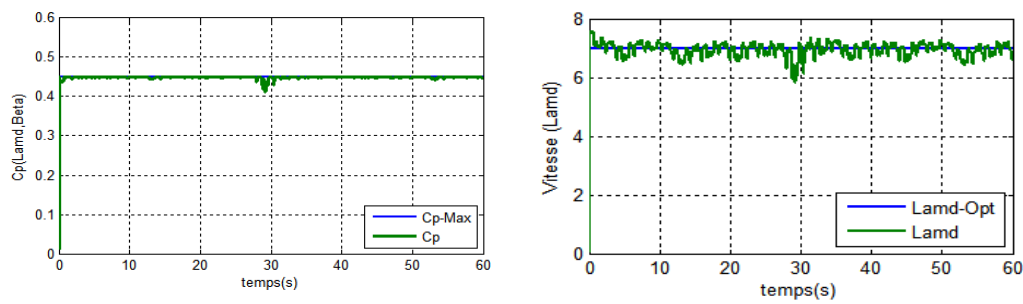


Figure II-6: Schéma bloc du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation de la GADA

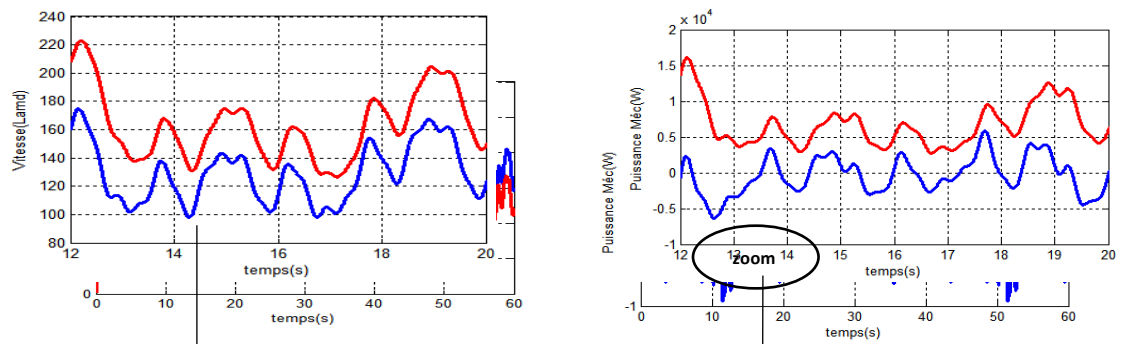


(a) Commande MPPT sans asservissement de vitesse.

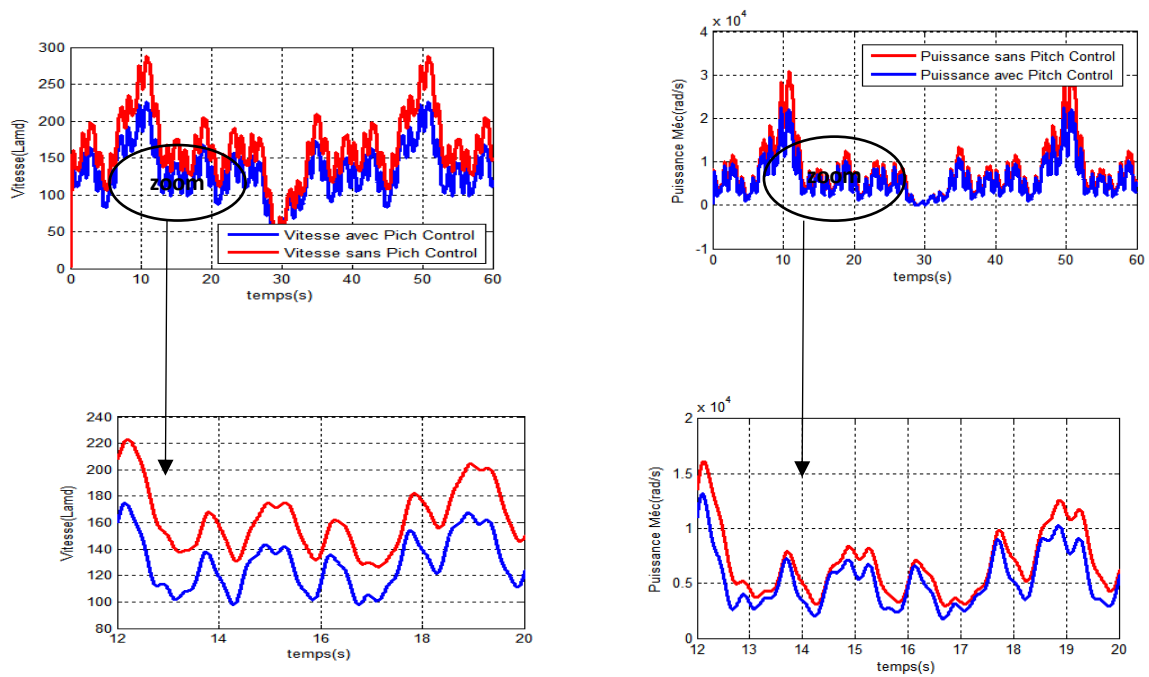


(b) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

Figure II-7 : Coefficient de puissance C_p (λ , β) et Vitesse spécifique λ .



a) Commande MPPT sans asservissement de vitesse.



(b) Commande avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

Figure II-8 : Vitesse mécanique (Ω_m) et Puissance mécanique (P_m).

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique simplifié de la turbine éolienne. Ensuite, nous avons traité la question de la commande MPPT d'un système éolien fonctionnant à vitesse variable, en utilisant une méthode de contrôle MPPT, c'est-à-dire la méthode directe et la méthode indirecte. Cette dernière est basée sur régulateur PI .

Par ailleurs, notre travail consiste à développer et étudier la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en utilisant la génératrice asynchrone à double alimentation. La modélisation et la commande vectorielle de cette dernière sera étudiée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III :

Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

III.1. Introduction

La GADA joue un rôle important dans les SCEEs et largement utilisée dans la production d'énergie électrique, en raison de sa possibilité de fonctionner dans une large plage de vitesse c'est-à-dire à vitesse variable, du faible coût du convertisseur, de la perte de puissance réduite et des capacités de puissances active et réactive à quatre quadrants [67].

Le contrôle de la GADA lors de la génération d'énergie dans un SCEE est nécessaire et inévitable. Il maintient les grandeurs du générateur, telles que le couple et les puissances active et réactive, ainsi que les grandeurs liées au convertisseur côté réseau, telles que la puissance réactive et la tension du bus continu proches de leurs valeurs optimales pour une génération d'énergie efficace.

Ce chapitre a pour objectif de présenter la modélisation de la génératrice, des convertisseurs de puissance du système éolien à vitesse variable et l'application des lois de commande permettant un fonctionnement optimal du système éolien.

Dans un premier temps, nous présenterons le modèle de la GADA et le valider avec des résultats de simulation. Ensuite nous présenterons également les modèles des deux convertisseurs de puissance. Dans un deuxième temps, le contrôle des convertisseurs de puissances du GADA seront présentés. Au début, le contrôle du convertisseur côté réseau (CCR) sera expliqué. Il maintient une tension de bus continue constante pour alimenter le convertisseur côté génératrice (CCG) et peut également fournir une assistance en puissance réactive au réseau. Dans la dernière partie, les commandes vectorielles (directe et indirecte) du CCG seront introduites. Toutes ces commandes sont validées par des résultats de simulation pour deux points de fonctionnement en modes hypo et hyper synchrone et avec une vitesse du vent variable également.

III.2.Fonctionnement et modélisation de la GADA.

III.2.1 Modèle de la GADA dans le repère triphasé.

La GADA est constituée d'un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Le stator est équipé des enroulements triphasés isolés constituant une conception de pôles souhaités et est connecté au réseau par un transformateur triphasé à partir du réseau à une amplitude et une fréquence constante, créant ainsi le champ magnétique du stator [50].

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Comme le stator, le rotor est également alimenté par des tensions triphasées qui prennent une amplitude et une fréquence variables en régime permanent pour atteindre différentes conditions de fonctionnement de la machine (vitesse, couple, etc.). Ceci est réalisé en utilisant deux convertisseurs triphasés, un convertisseur coté réseau (CCR) électrique et un convertisseur coté génératrice (CCG), comme représenté dans la figure II.1. Ces convertisseurs sont associés à la stratégie de commande appropriée, sont chargés d'imposer des tensions requises au rotor pour contrôler le point de fonctionnement global du GADA et effectuer l'échange des puissances à travers le rotor jusqu'au réseau.

Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (fems) dans les enroulements rotoriques.

Le rapport entre les fems créées au rotor et au stator est défini par [43], [52]:

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r w_r}{N_s w_s} = \frac{N_r w_s - p\Omega_m}{N_s w_s} = u \frac{w_s - p\Omega_m}{w_s}$$

Avec :

- N_r et N_s : respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.
- p : le nombre de paires de pôles de la GADA.
- u : le rapport de transformation rotor/stator équivalent au rapport des nombres de spires rotoriques et statoriques.
- w_s et w_r : respectivement les pulsations statorique et rotorique de la GADA.

Ainsi, l'équation qui relie w_s (fréquence des tensions et des courants du stator), w_r (fréquence des tensions et des courants du rotor) et w_e (vitesse électrique du rotor) est la suivante :

$$w_s = w_r + w_e$$

La relation entre la vitesse mécanique de l'arbre Ω_m et la vitesse électrique dépend des paires de pôles de la machine :

$$w_e = p\Omega_m$$

Les unités de ces deux équations sont données en *rad/s*. Le glissement de la machine est défini comme suit :

$$g = \frac{W_s - W_e}{W_s} = \frac{W_r}{W_s}$$

L'équation (III.1) devient alors :

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

$$\frac{E_r}{E_s} = ug$$

Avec :

$$u = \frac{N_r}{N_s}$$

Les courants au stator et au rotor sont alors liés comme dans un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{1}{u}$$

La modélisation de la GADA s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui sont :

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

La structure générale de la GADA simplifiée et idéalisée peut être décrite comme trois enroulements dans le stator et trois enroulements dans le rotor, comme illustré à la figure ci-dessous. L'angle θ_m représente l'angle entre l'axe de la phase rotorique de référence Ra et l'axe fixe de la phase statorique de référence SA.

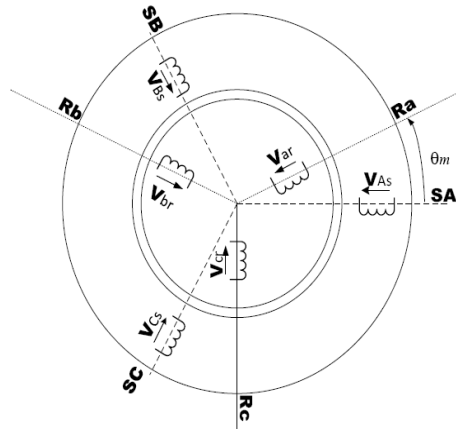


Figure III-1 : Les enroulements triphasés idéaux (stator et rotor) de la GADA

Ces enroulements sont une représentation idéale de la génératrice réelle, ce qui aide à dériver un circuit électrique équivalent, comme le montre la figure III-1.

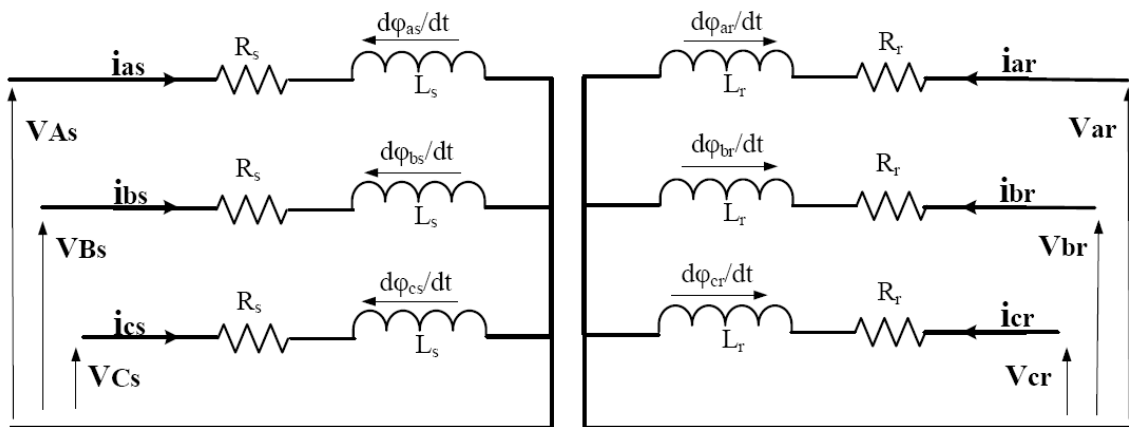


Figure III-2 : Circuit électrique équivalent de la GADA

III.2.1.1. Equations électriques

Dans ce modèle idéalisé, les tensions instantanées du stator, le courant et les flux de la génératrice peuvent être décrites par le système d'équations électriques suivant :

$$v_{as}(t) = R_s i_{as}(t) + \frac{d\phi_{as}(t)}{dt}$$

$$v_{bs}(t) = R_s i_{bs}(t) + \frac{d\phi_{bs}(t)}{dt}$$

$$v_{cs}(t) = R_s i_{cs}(t) + \frac{d\phi_{cs}(t)}{dt}$$

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Où :

- R_s est la résistance du stator.
- $i_{as}(t)$, $i_{bs}(t)$ et $i_{cs}(t)$ sont les courants statoriques des phases a, b et c.
- $v_{as}(t)$, $v_{bs}(t)$ et $v_{cs}(t)$ sont les tensions statoriques appliquées.
- $\varphi_{as}(t)$, $\varphi_{bs}(t)$ et $\varphi_{cs}(t)$ sont les flux de stator.

Les amplitudes électriques côté stator, en régime permanent, ont une fréquence angulaire sinusoïdale constante ω_s la fréquence angulaire imposée par le réseau électrique.

De même, les équations électriques du rotor sont décrites par :

$$\begin{aligned} v_{ar}(t) &= R_r i_{ar}(t) + \frac{d\varphi_{ar}(t)}{dt} \\ v_{br}(t) &= R_r i_{br}(t) + \frac{d\varphi_{br}(t)}{dt} \\ v_{cr}(t) &= R_r i_{cr}(t) + \frac{d\varphi_{cr}(t)}{dt} \end{aligned} \quad \text{Où :}$$

- R_r est la résistance du rotor.
- $i_{ar}(t)$, $i_{br}(t)$ et $i_{cr}(t)$ sont les courants rotoriques des phases a, b et c.
- $v_{ar}(t)$, $v_{br}(t)$ et $v_{cr}(t)$ sont les tensions rotoriques appliquées.
- $\varphi_{ar}(t)$, $\varphi_{br}(t)$ et $\varphi_{cr}(t)$ sont les flux de rotor.

En régime permanent, les amplitudes du rotor ont une fréquence angulaire constante ω_r .

Dans la plupart des applications, les enroulements du stator sont directement connectés au réseau électrique supposé stable donc ω_s reste constante. Cette fréquence est également appelée fréquence synchrone. Cependant, ω_r dépend évidemment de la vitesse électrique de l'arbre ω_m , ce qui conduit à trois modes de fonctionnement de la machine en fonction de la vitesse :

- ❖ $\omega_m < \omega_s \Rightarrow \omega_r > 0 \Rightarrow g > 0$ hypo synchrone
- ❖ $\omega_m > \omega_s \Rightarrow \omega_r < 0 \Rightarrow g < 0$ hyper synchrone
- ❖ $\omega_m = \omega_s \Rightarrow \omega_r = 0 \Rightarrow g = 0$ synchrone

On peut écrire les équations électriques sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \\ v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Ou de manière plus raccourcie

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}]$$

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}]$$

III.2.1.2. Equations magnétiques

Les équations magnétiques représentant les flux statoriques et rotoriques sont représentés par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \\ \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_1 & M_2 & M_3 \\ M_s & L_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & L_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & L_r & M_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & L_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Ou d'autre manière :

$$[\varphi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}]$$

Avec:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = [M_0] = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\cos(\theta)\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\cos(\theta) \end{bmatrix}$$

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Avec :

- L_s et L_r : sont respectivement les inductances propres des phases statoriques et rotoriques ;
- M_s et M_r : sont les inductances mutuelles entre deux phases stator-stator et rotor-rotor.
- $M_{1,2,3}$: Inductance mutuelles instantanées entre une phase statorique et une phaserotorique ;
- $[L_s]$ et $[L_r]$: Matrices des inductances cycliques statorique et rotorique.
- $[R_s]$ et $[R_r]$: Matrices des résistances propres statorique et rotorique.
- $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$: Matrices des inductances mutuelles du couplage entre stator et rotor ;
- M_{max} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phaserotorique.
- θ : L'écart angulaire entre une phase statorique et une phase rotorique.

III.2.1.3. Equation mécanique

L'étude de la GADA fait introduire des variations non seulement des paramètres électriques mais aussi des paramètres mécaniques.

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

$$C_{em} = p[i_{sabc}]^t \frac{d}{d\theta} [[M_{sr}][i_{rabc}]]$$

L'équation mécanique est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - C_f$$

On peut alors noter que la tension, le courant et la matrice d'inductance mutuelle sont dérivés dans le cadre de référence stationnaire (abc) et dépendent du temps. La modélisation et l'analyse d'un tel système étant difficiles à gérer, les paramètres de la variante temporelle peuvent être rendus invariants en les transformant en un cadre de référence rotatif approprié.

III.2.2. Modèle de la GADA dans le repère de Park.

Il a été mentionné que les paramètres de la machine doivent être transformés en un repère de référence rotatif approprié.

Pour résoudre ce problème de non linéarité de ce système, on fait des changements de variable qui réduisent la complexité de ce dernier. Pour notre GADA, ce changement consiste à transformer les six enroulements relatifs aux trois phases statoriques et aux trois phases rotoriques à des

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

enroulements orthogonaux d-q tournant à une vitesse ω_s .

Cet objectif peut être atteint en définissant le cadre de référence d-q, qui tournera à la vitesse angulaire synchrone du système. Cette transformation est caractérisée par une matrice de rotation dite : matrice de Park telle que :

$$[x_{dqo}] = [p(\theta)][x_{abc}]$$

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

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur parmi les vecteurs tensions, courants, et flux statoriques et rotoriques.

En supposant que le système est équilibré, donc la composante homopolaire nulle, les équations dynamiques d'un GADA triphasé peuvent être écrites dans un cadre de référence à quadrature directe (d-q) en rotation synchrone comme [42], [53] :

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_{obs} \varphi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_{obs} \varphi_{sd}$$

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_{obs} - \omega_m) \varphi_{rq}$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_{obs} - \omega_m) \varphi_{rd}$$

Où :

- $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$ sont respectivement les tensions directes et en quadratures statoriques et rotoriques ;
- $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}, I_{rq}$ sont respectivement les courants directs et en quadratures statoriques et rotoriques ;
- $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ sont respectivement les flux directs et en quadratures statoriques et rotoriques.

Le flux total qui traverse chaque bobine du stator peut être décomposé en flux propre de la même bobine et des flux mutuels provenant des autres bobines.

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

$$\varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd}$$

$$\varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq}$$

$$\varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd}$$

$$\varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq}$$

Avec :

- L_s, L_r : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la GADA,
- L_m : l'inductance mutuelle.

L'expression du couple électromagnétique est donnée comme suit :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd})$$

existe différentes possibilités pour le choix de l'orientation de repère d'axe diphasé qui dépend de la vitesse de rotation du référentiel choisi. Il existe trois repères biphasés de références :

- Le repère fixe au stator,
- Le repère fixe au rotor,
- Le repère fixe au champ tournant.

Si on choisit le repère d - q lié au champs tournant, le système devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \varphi_{rd} \end{cases}$$

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases}$$

Il est également possible d'obtenir une représentation du modèle d - q dans les équations de l'espace d'état. En réorganisant les équations (III-23) et (III-25) et en prenant les flux comme des grandeurs d'état, le modèle de GADA est donné par l'expression suivante :

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & \omega_s & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & 0 & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_r \\ 0 & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & -\omega_r & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

En développant cette dernière expression dans les composants d-q, on obtient :

$$\frac{df}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 + \omega_s \sigma L_s L_r & R_r L_m & \omega_m L_s L_r \\ -\omega_m L_m^2 - \omega_s \sigma L_s L_r & -R_s L_r & -\omega_m L_s L_r & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_m L_s L_m & -R_s L_r & -\omega_m L_m^2 + \omega_s \sigma L_s L_r \\ \omega_m L_s L_m & R_s L_m & \omega_m L_m^2 - \omega_s \sigma L_s L_r & -R_s L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

III.2.3 Résultats de simulation

Afin de voir et valider le comportement de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA de puissance 2 MW, cette dernière a été simulée sous Matlab/Simulink. Les paramètres de la génératrice sont indiqués dans le tableau 2 en annexe B [46], Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park dans le référentiel liée au champ tournant. La machine est alimentée directement par deux sources de tensions triphasé parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau 50 Hz et une valeur efficace de 690V (Fig. III-3), et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de $25 \cdot \sqrt{2}$ V et une fréquence égale à la fréquence rotorique. Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse en hypo synchrone fixe 1450 tr/min puis à une vitesse de synchronisme 1500 tr/min, ensuite à une autre vitesse fixe 1550 tr/min en hyper synchrone comme illustre la figure III-8. On constate que l'amplitude des tensions rotoriques reste constante mais leur fréquence change avec le changement de la vitesse mécanique.

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

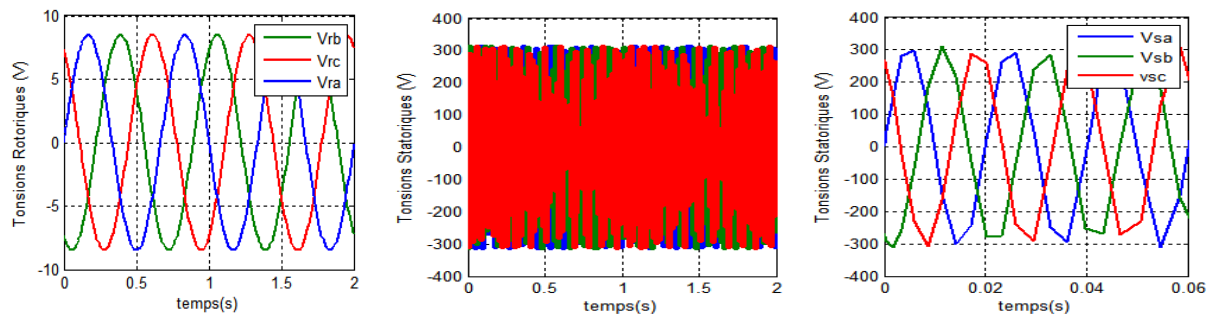


Figure III-3 : Tensions d'alimentation du rotor et du stator.

Au démarrage, toutes les grandeurs de la génératrice sont caractérisées par un régime transitoire oscillant avec des valeurs élevées. On peut constater (Fig. III-3) que l'amplitude des courants statoriques varie avec le changement de la vitesse d'entraînement et leur fréquence reste la même imposée par le réseau électrique. En ce qui concerne les courants rotoriques, leur amplitude varie avec la variation de la puissance active statorique et pour leur fréquence la même remarque que pour la tension du rotor.

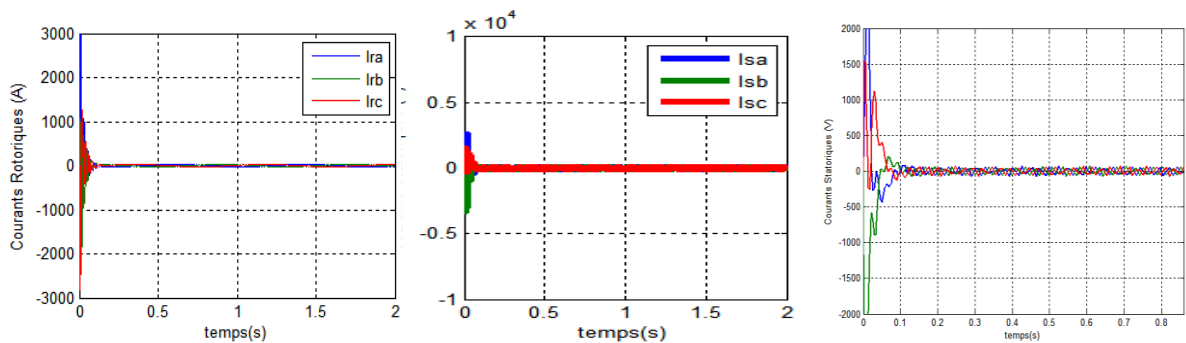


Figure III-4 : Courants rotoriques et statorique triphasés.

La figure III-5 illustre les puissances au niveau du rotor et du stator de la GADA, la puissance active statorique générée est proportionnelle à la vitesse du rotor avec une légère augmentation de la consommation de la puissance réactive lors de l'augmentation de la vitesse mécanique du rotor afin de faire la magnétisation de la génératrice. Afin également que cette dernière puisse générer une puissance active de son stator, elle doit consommer une puissance active par son rotor.

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

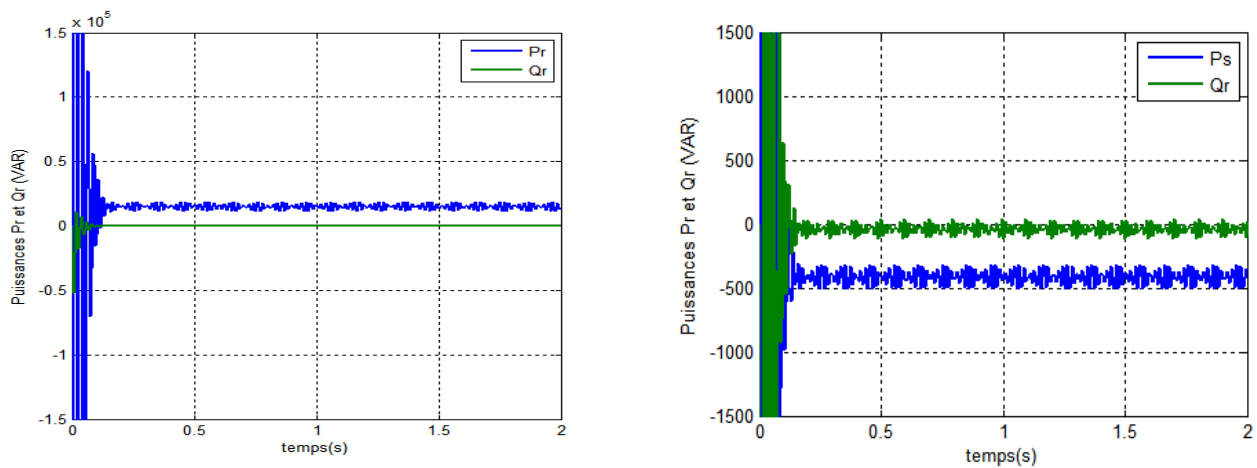


Figure III-5 : Puissances active et réactive au niveau de la GADA.

La figure III-5 illustre les flux engendrés par la GADA, on peut constater que la variation des puissances active et réactive rotoriques engendrée par une variation des flux rotoriques, la puissance active dépende du flux d'axe d alors que la puissance réactive dépende de l'autre flux. La même remarque pour les flux statoriques.

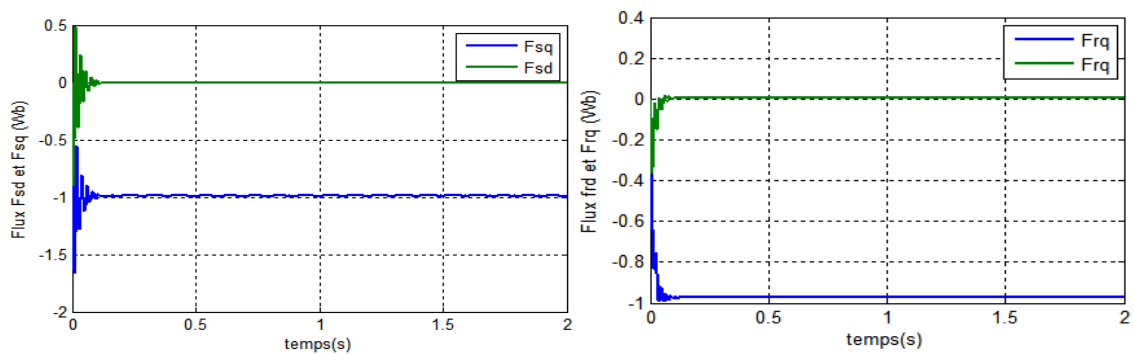


Figure III-6 : Composantes du flux rotorique et statorique de la GADA (d-q).

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Les courants rotoriques et statoriques selon les deux axes d et q sont illustrés dans la figure ci-dessous. Ils ont la même forme que les puissances réactive et active respectivement.

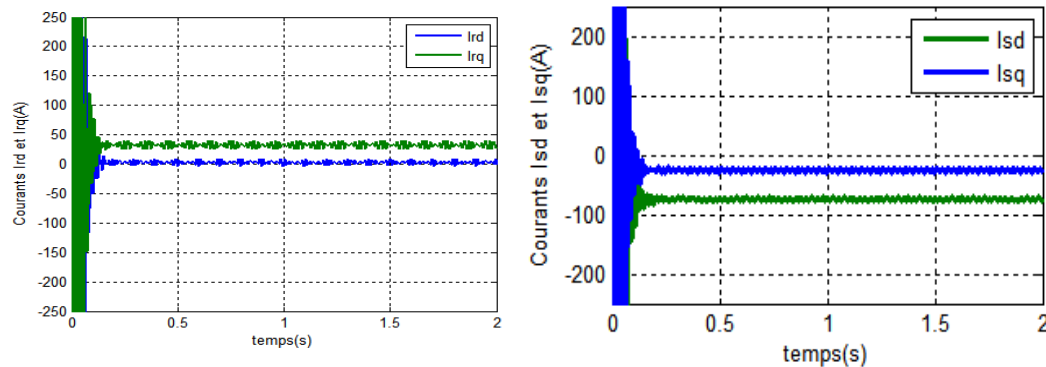


Figure III-7 : Courants rotoriques et statoriques d'axes d-q.

A travers les résultats de simulation illustrés par les figures précédentes, nous constatons que toutes les grandeurs de la machine au démarrage présentent un régime transitoire oscillant avec des valeurs élevées. Nous remarquons aussi que l'orientation des flux statoriques étudiés auparavant sont bien illustrés par la simulation.

III.3.Modélisation des convertisseurs

Les convertisseurs de puissance sont largement utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. La figure III-9 montre le schéma simplifié des deux convertisseurs de source de tension triphasé à deux niveaux. Chaque convertisseur est composé de six commutateurs, S1 à S6, avec une diode de roue libre antiparallèle pour chaque commutateur. Les commutateurs peuvent être des dispositifs IGBT, selon la puissance et la tension nominale du convertisseur. Le convertisseur a été largement utilisé dans l'industrie pour de nombreuses applications différentes [54].

Lorsque le convertisseur transforme une tension continue fixe en une tension alternative triphasée d'amplitude et de fréquence variables pour une charge alternative, il est souvent appelé onduleur. Lorsque le convertisseur transforme une tension alternative de réseau électrique d'amplitude et de fréquence fixes en une tension à courant continu réglable, il est normalement connu comme un redresseur. Qu'il s'agisse d'un onduleur ou d'un redresseur, le flux de puissance dans le circuit du convertisseur est bidirectionnel : le courant peut passer de son côté courant continu (CC) vers le côté courant alternatif (CA), et vice versa.

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Le fonctionnement à vitesse variable de la GADA est atteint avec deux convertisseurs statiques (coté GADA et coté réseau) qui sont interconnectés par l'intermédiaire d'un bus continu pour autoriser ainsi un transfert de puissance entre deux sources à fréquences différentes (Fig. III-7). Les deux courants modulés (i_{CCG} , i_{CCR}) sont respectivement issus du convertisseur coté GADA et du celui coté réseau.

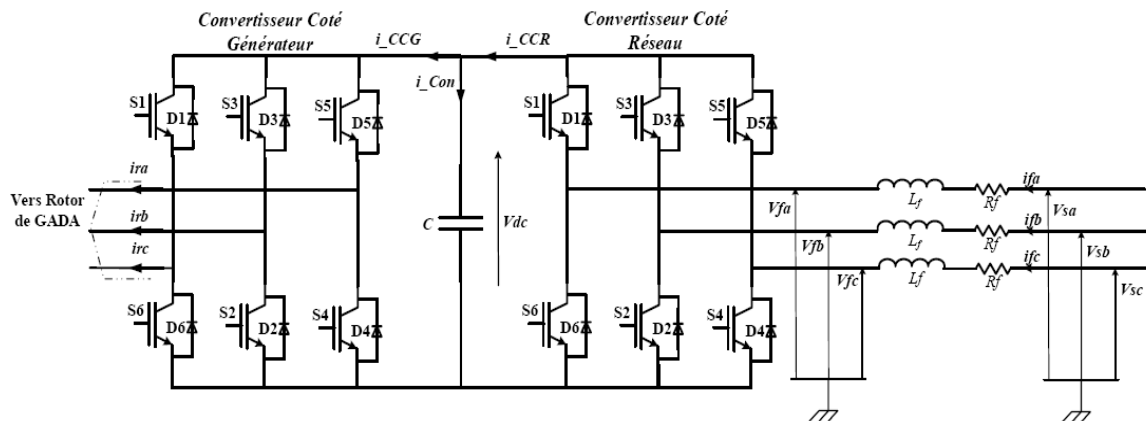


Figure III-8 : Les convertisseurs de puissance bidirectionnel AC / DC/ AC pour l'alimentation du GADA

III.4. Modélisation du Convertisseur Coté Générateur (CCG).

Les onduleurs de tension, associés aux SCEE, sont de nos jours très largement utilisés. En premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation de convertisseurs statiques de plus en plus performants. En second lieu, l'évolution des techniques numériques, notamment l'utilisation sans cesse grandissante du processeur de signaux (DSP, "Digital Signal Processing ") et des systèmes à base d'architecture reconfigurable (FPGA, "Field Programmable Gate Array "), permet désormais d'exécuter en temps réel des algorithmes complexes de contrôle des convertisseurs.

On considère le schéma de principe du convertisseur coté génératrice représenté par la figure III-10. On distingue, d'une part les tensions de branches V_a , V_b , V_c mesurées par rapport à la borne (-) de la tension V_{dc} et d'autre part, les tensions de phases V_{an} , V_{bn} , V_{cn} mesurées par rapport à un neutre flottant n .

On suppose que :

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

- Les phases de la GADA sont symétriques et équilibrées.
- Le couplage des bobines rotoriques de la GADA est de type étoile.

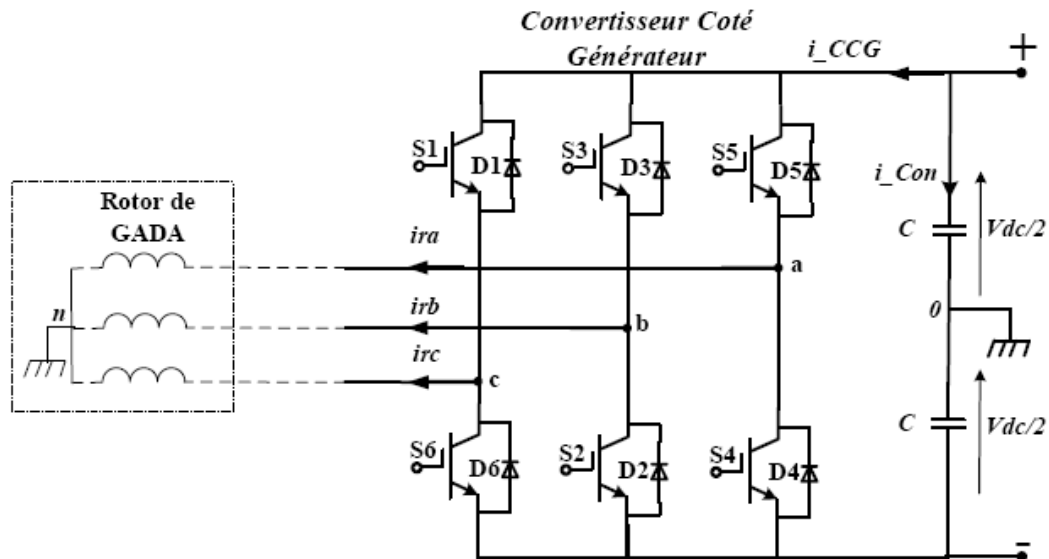


Figure III-9: Schéma simplifié du Convertisseur Coté Générateur.

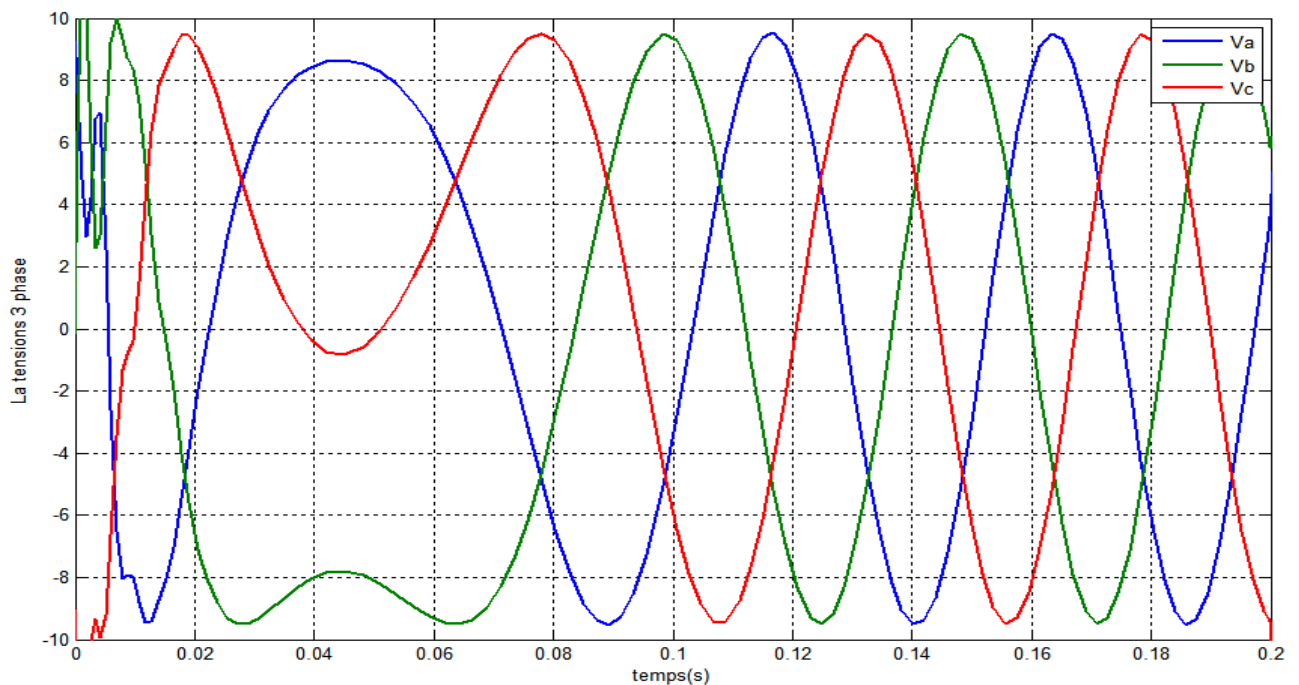


Fig. III.10. Principe de la commande MLI et enveloppes de tensions

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

La Figure (III.10) représente le principe de la commande MLI et quelques enveloppes des tensions. Sur cette figure, V_h est la tension homopolaire qui peut s'exprimer par :

$$V_h = V_{No} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0})$$

Les tensions de branches V_{k0} (avec $k = a, b$ et c) peuvent être imposées par une commande appropriée des commutateurs électroniques. On peut alors déterminer les tensions V_{k0} à la sortie de l'onduleur.

On a :

$$\begin{cases} V_a = V_{a0} + V_{0n} \\ V_b = V_{b0} + V_{0n} \\ V_c = V_{c0} + V_{0n} \end{cases}$$

Le rotor de la GADA est considéré comme une charge triphasée symétrique, on a :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

D'après les deux équations (II.29) et (II.30) on obtient :

$$V_{0n} = -\frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) = 0$$

A l'aide des relations (III.29) et (III.31) on obtient :

$$\begin{cases} V_a = +\frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_b = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_c = -\frac{1}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases}$$

Selon la conduction des interrupteurs électroniques dans une branche de l'onduleur, les tensions de branches V_{k0} peuvent être égales soit à $V_{dc}/2$ ou à 0 :

$$V_{k0} = \frac{V_{dc}}{2} S_i, i = (1, 2, 3)$$

Avec : $i = 1, 2, 3$

On obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

III.5. Modélisation du Convertisseur Côté Réseau (CCR).

La puissance nominale du CCR est principalement déterminée par la puissance de glissement maximale, car elle fonctionne généralement avec un facteur de puissance égal à un (unitaire) pour minimiser les pertes dans le convertisseur [55].

L'objectif principal du contrôleur côté réseau est de maintenir une tension de liaison CC constante, indépendamment de la valeur et de la direction du flux de puissance du rotor [55].

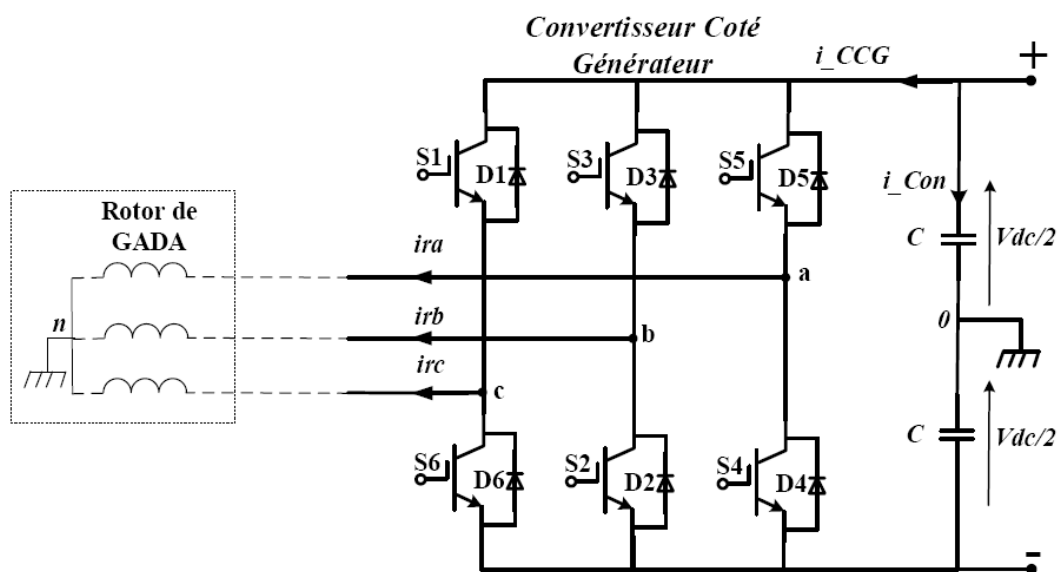


Figure III-11 : Schéma simplifié du Convertisseur Côté Générateur.

La quantité d'énergie stockée dans le condensateur C peut s'écrire comme suit :

$$E_c = \int P dt = \frac{1}{2} C V_{dc}^2$$

Où :

- P : est la puissance nette dans le condensateur,
- C : est la valeur du condensateur de liaison en courant continu et
- V_{dc} : est la tension du condensateur.

III.8. Commande du convertisseur coté GADA par la commande vectorielle

Une génératrice à induction à double alimentation (GADA) est l'une des génératrices les plus utilisées dans les éoliennes en raison de son fonctionnement à vitesse variable, de son contrôle.

indépendant des puissances, de sa participation à l'amélioration de la qualité de l'énergie [56], de sa plus petite capacité de conversion et de la faisabilité du couplage au réseau électrique [46].

La GADA est capable de contrôler ses sorties de puissance active et réactive selon les besoins des opérateurs de système. Afin de produire une meilleure qualité d'énergie électrique par le système de conversion d'énergie éolien (SCEE) à base d'une GADA, un système de contrôle adéquat doit être appliqué pour gérer ses puissances produites. Pour atteindre cet objectif, le contrôle du GADA est obtenu par le contrôle du convertisseur coté générateur (CCG).

L'objectif du contrôle du CCG est de permettre à la GADA de générer de manière indépendamment les puissances produites active et réactive qui seront injectées au réseau électrique. Cela facilite une grande flexibilité au système éolien qui permet à la turbine de capter un maximum d'énergie du vent et de fournir simultanément une puissance réactive au réseau électrique si nécessaire.

Dans cette partie nous nous intéressons à la commande du CCG par la commande vectorielle, qui sera réalisée par trois méthodes : la commande directe, la commande indirecte sans boucle de puissance et la commande indirecte avec boucle de puissance.

III.8.1. Principe de la commande vectorielle avec l'orientation du flux magnétique

Rappelons l'équation du couple électromagnétique de la génératrice :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_s} (I_{rd} \varphi_{sq} - I_{rq} \varphi_{sd})$$

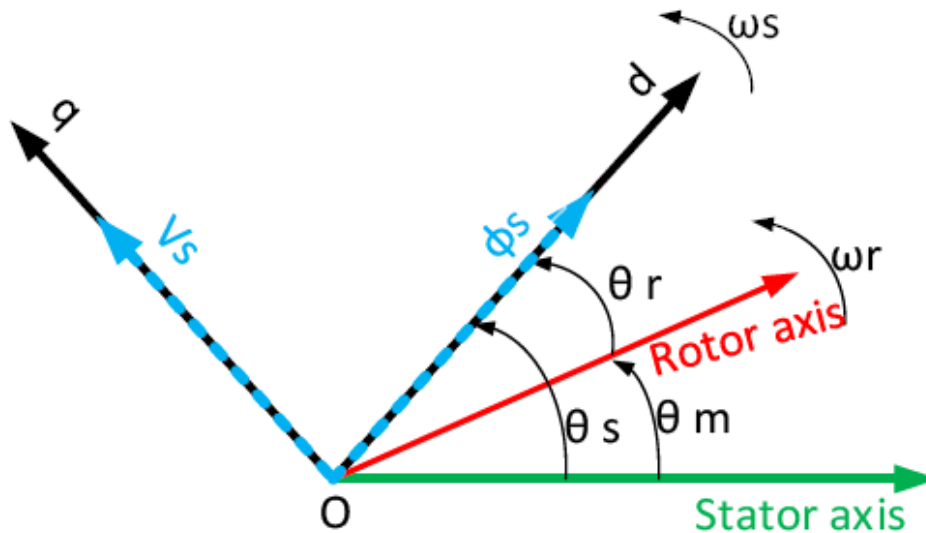
Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, mais on s'aperçoit que si on élimine le premier produit ($I_{rd} \varphi_{sq}$), le couple ressemblerait fort à celui d'une machine à courant continu, où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux, le courant d'excitation, et celle liée au couple, le courant d'induit.

Afin d'arriver à commander la GADA d'une manière similaire à la commande d'une machine à courant continu à excitation indépendante, la GADA est commandée dans un cadre de référence $d-q$ tournant à la vitesse de synchronisme, l'axe d étant orienté le long de la position du vecteur

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

spatial de flux du stator comme indiqué dans la figure III.10 et d'avoir : $\varphi_{sd} = \varphi_s$ et $\varphi_{sq} = 0$. Le couple devient :

$$C_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \varphi_{sd}$$



$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases}$$

Equations magnétiques

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases}$$

Sous l'orientation du flux statorique suivant l'axe d (Fig. III-12), la relation entre les courants et le flux peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \varphi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases}$$

En utilisant le système d'équations ci-dessus (Eq. III.40), les relations entre les courants rotoriques et les courants statoriques seront :

$$\begin{cases} I_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases}$$

En régime permanent, le flux du stator est proportionnel à la tension du réseau et si on néglige la résistance statorique (pour les grande machines), les tensions statoriques seront :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases}$$

Ainsi, lors de l'orientation de l'axe direct avec le flux du stator, la tension s'aligne sur l'axe en quadrature, les puissances active et réactive s'écrivent :

$$P_s = V_s I_{sq}$$

$$Q_s = V_s I_{sd}$$

Combinant ces dernières équations avec les équations (III.43), on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \left(\frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} I_{rd} \right) \end{cases}$$

Les puissances active et réactive du stator peuvent être contrôlées indépendamment au moyen de la quadrature et du courant direct du rotor respectivement [45].

$$\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Donc les puissances statoriques deviennent :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{3}{2} \frac{V_s L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases}$$

Les expressions des puissances active et réactive montrent clairement que sous l'orientation du flux statorique selon l'axe d, les puissances active et réactive sont découplées et peuvent être contrôlées via les courants du rotor. Grâce au courant I_{rd} , nous pouvons contrôler la puissance réactive tandis que la puissance active peut être contrôlée via le courant d'axe q (I_{rq}).

En utilisant les équations précédentes, les expressions des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir une commande adéquate, peuvent être écrites sous la forme suivante :

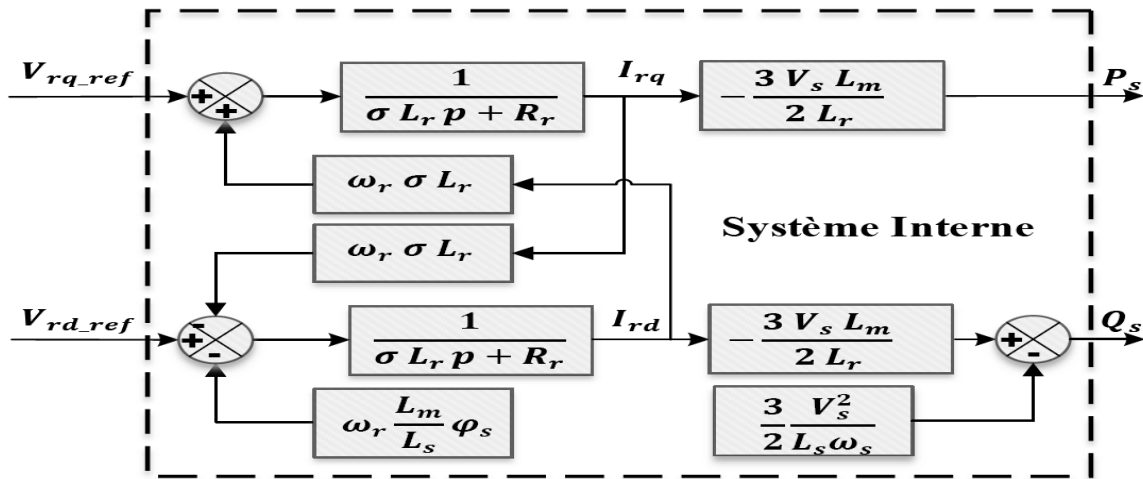
$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + L_r \sigma \frac{dI_{rd}}{dt} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\phi_s}{dt} - \omega_r L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + L_r \sigma \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_r L_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases}$$

Avec $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$: est le coefficient de fuite de la GADA.

Avec l'application de la transformation de Laplace au système d'équations (III.47) et en supposant que la tension du réseau est stable ($\frac{d\phi_s}{dt} = 0$), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = (R_r + L_r \sigma p) I_{rd} - \omega_r L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = (R_r + L_r \sigma p) I_{rq} + \omega_r L_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases}$$

Avec le système d'équations (III.46) et (III.48), on peut établir un schéma bloc du système électrique à réguler donné par la figure ci-dessous.



CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Figure III-13: Schéma bloc du système à réguler.

Nous allons utiliser deux commandes afin de réguler ce dernier système. La commande directe et la commande indirecte. Les deux commandes sont basées sur l'orientation du flux statorique.

III.8.2. Commande directe basée sur l'orientation du flux statorique

Cette commande est basée sur la régulation directe et indépendante des puissances active et réactive produites par la GADA, avec l'utilisation d'une boucle de régulation pour la puissance active et l'autre pour la puissance réactive. Avec cette méthode on obtient un découplage total entre les axes de régulation, dont le principe est illustré à la figure III-14.

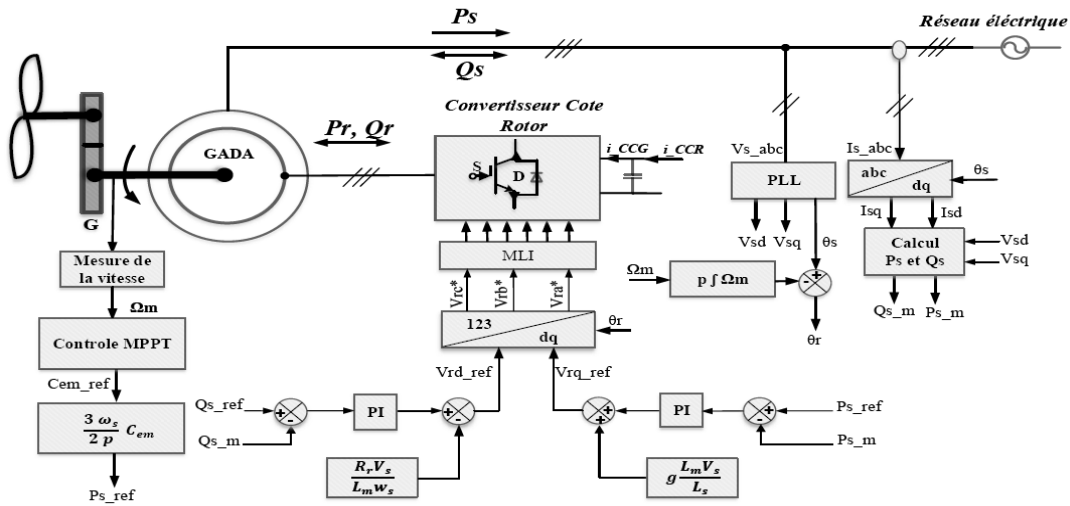


Figure III-14: Schéma bloc de la commande directe de la GADA basée sur l'orientation du flux statorique.

Afin de construire cette commande, on met en évidence la relation entre les puissances produites et les tensions rotoriques de référence, c.-à-d. d'une part la puissance active et la tension V_{rq} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{rd} . Pour simplifier la commande de la GADA, la tension du réseau est supposée stable ($\frac{d\phi_s}{dt} = 0$). Et en régime permanent, les dérivées des courants

rotoriques biphasés sont nulles, ce qui nous donne d'après l'équation :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - \omega_r L_r \sigma I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \omega_r L_r \sigma I_{rd} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \phi_s \end{cases}$$

$\omega_r L_r \sigma$: Représente le terme de couplage entre les axes.

En utilisant le système d'équations (III.66), les courants biphasés rotoriques peuvent être calculés à partir des puissances statoriques comme suit :

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

$$\begin{cases} I_{rq} = -\frac{2}{3} \frac{L_s}{V_s L_m} P_s \\ I_{rd} = \frac{V_s}{L_m \omega_s} - \frac{2}{3} \frac{L_s}{V_s L_m} Q_s \end{cases}$$

Si on néglige les termes de couplage qui apparaissent dans le système d'équations (III.71), à cause du faible glissement, et on remplace les courants biphasés rotoriques par leurs expressions, on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = \frac{V_s R_r}{L_m \omega_s} - \frac{2}{3} \frac{L_s R_r}{L_m} Q_s \\ V_{rq} = -\frac{2}{3} \frac{L_s R_r}{V_s L_m} P_s + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases}$$

Avec le système d'équations, on peut établir un schéma bloc des boucles de régulation des courants rotoriques d'axes dq , qui est présenté à la figure III-15. Les régulateurs utilisés sont des correcteurs de type PI.

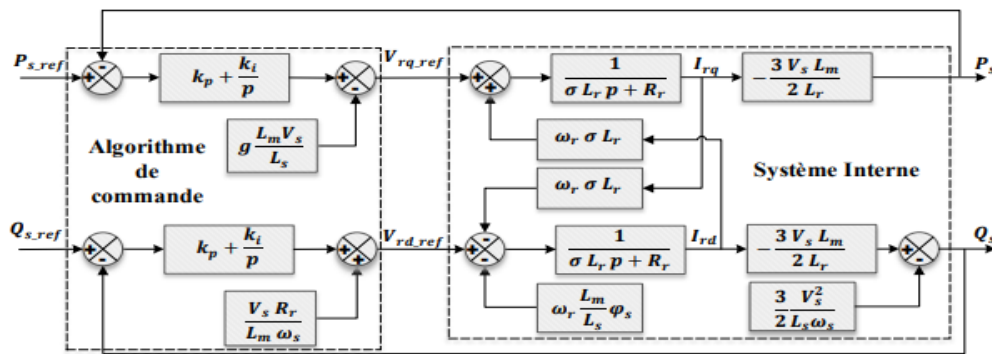


Figure III-15 : Schéma bloc du principe du contrôle des puissances statoriques de la GADA (commande directe).

III.8.4. Résultats de simulation

Pour la validation de commande proposée, nous avons réalisé plusieurs tests sur les points de fonctionnement de la GADA.

- Les essais de suivi de consignes avec deux points de fonctionnement : l'un en mode hypo synchrone et l'autre en mode hyper synchrone.
- Les essais de suivi de consignes avec une vitesse du vent variable.
- Les essais avec les variations paramétriques pour tester la robustesse de la commande.

III.8.6. Test de suivi de consigne pour le contrôle du GADA avec une vitesse du vent variable

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

Dans cet essai, afin de bénéficier de l'avantage de fonctionnement à vitesse variable de la GADA et d'analyser son comportement, le système éolien est piloté par un profil du vent variable, en utilisant le profil du vent mentionné dans figure III.02 avec un temps de simulation raccourci, qui est proche de la réalité. En plus, en utilisant la stratégie de commande MPPT pour l'ensemble de la chaîne éolienne.

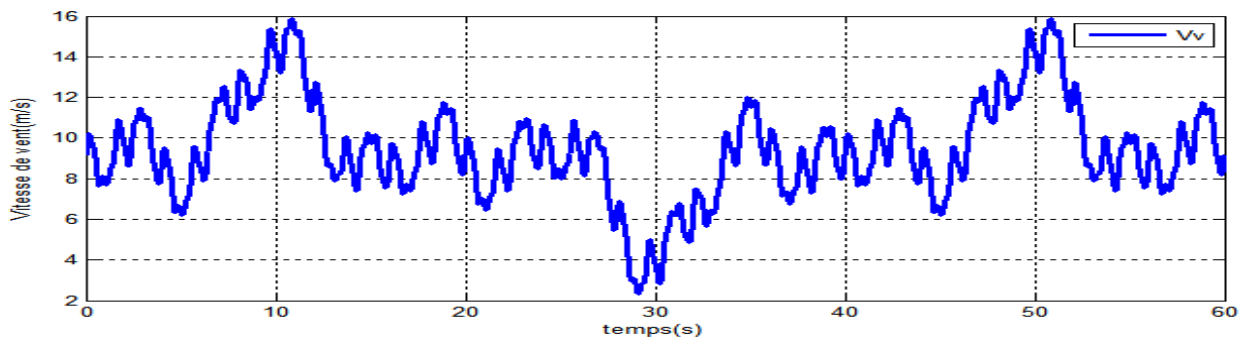


Figure III-16 : Vitesse du vent et la vitesse mécanique du GADA.

En même temps le système est soumis à un échelon de puissance réactive nulle $Q_s = 0$, afin avoir un facteur de puissance unitaire coté réseau électrique. Les résultats de simulation obtenus sont présentés dans les figures suivantes.

Les figures III.(17-18) et III.(24-25) illustrent respectivement les formes d'ondes des puissances active et réactive statoriques et les courants au niveau du rotor, en utilisant la stratégie de commande MPPT pour l'ensemble de la chaîne éolienne.

D'après les résultats obtenus, la puissance active débitée par le stator possède la même allure que la puissance mécanique de la turbine (sa référence) qui varie suivant la variation du vent grâce à la stratégie de commande MPPT pour permettre à l'éolienne de fonctionner dans les conditions optimales.

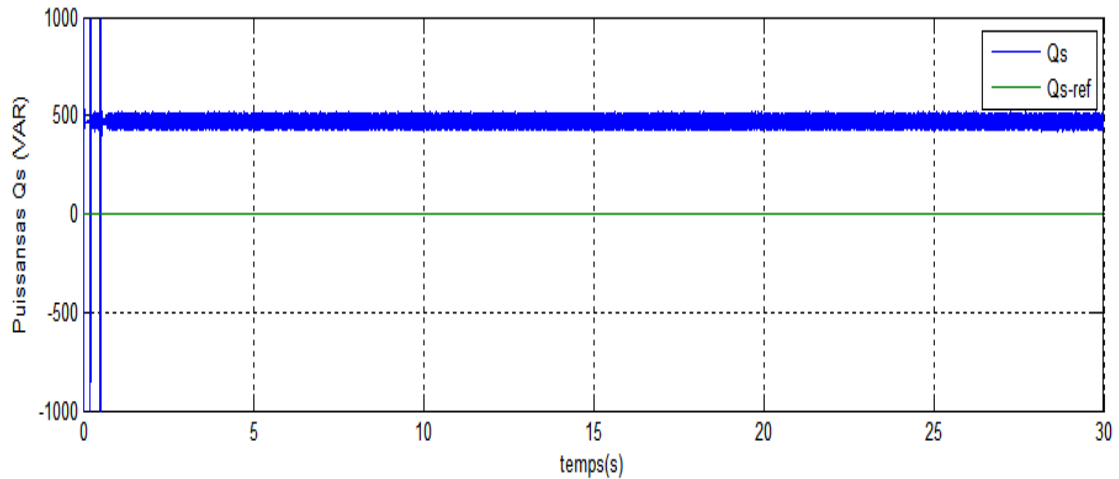


Figure III-17: Puissances réactive statoriques Puissances réactive statoriques réf

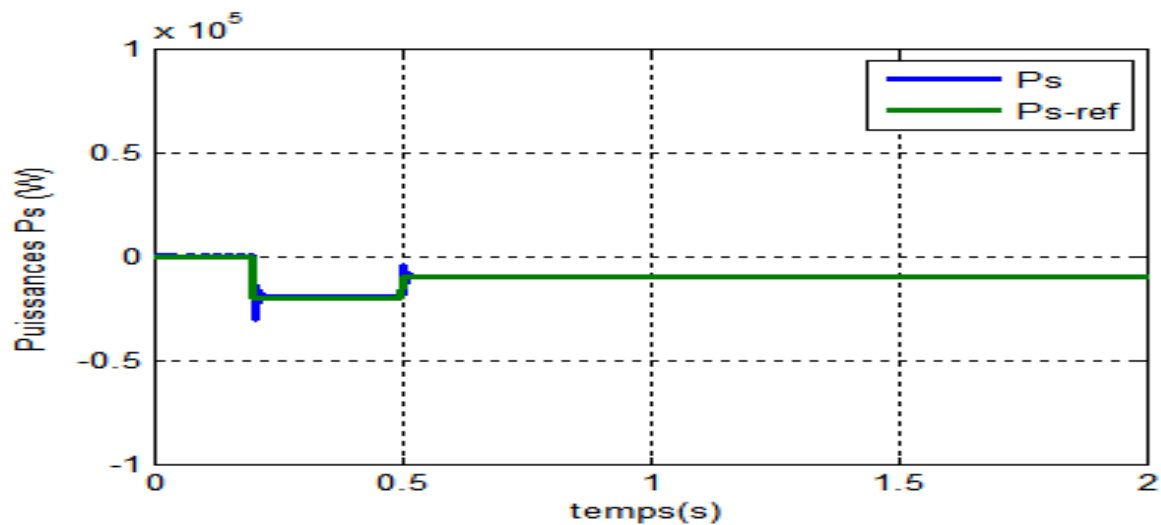


Figure III-18: Puissances active statoriques et Puissances active statoriques réf

Les courants statoriques varient suivant la variation du vent aussi car ce sont l'image de la puissance active. Nous remarquons que la puissance active ne suit pas exactement la variation de sa référence, il y a un décalage entre les deux puissances. Même remarque pour le courant.

III.8.7. La commande indirecte avec boucle de puissance

Dans la commande précédente, les relations ne sont pas complètement exactes car nous avons négligé la résistance des enroulements statoriques et en raison d'imprécisions dans les valeurs des paramètres. Les puissances statoriques réelles ne seront pas exactement les valeurs

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

souhaitées. Pour corriger cette erreur, dans le but d'améliorer la commande précédente, deux boucles de puissance externes sont généralement ajoutées. La première boucle régulerait la puissance active, tandis que la deuxième boucle régulerait la puissance réactive comme montré dans la figure suivante :

Avec ces boucles des puissances externes, un contrôle précis des puissances statoriques est obtenu indépendamment de l'inexactitude des paramètres de la machine ou du petit défaut d'alignement du plan de référence.

III.8.8. Résultats de simulation

III.8. Résultats de simulations :

Les résultats de simulation de notre système éolien (Turbine + GADA) contrôlé par des régulateur PI. De ce fait, nous réitérerons la commande indirecte pour la suite de nos travaux.

Les résultats présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la GADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur ou encore celle du flux et du couple.

Le démarrage est à vide puis on applique une puissance active de référence :

- ❖ $t=0$ s ($P_{\text{réf}} = 0$ W);
- ❖ Entre $t=0.2$ s et $t=0.6$ s échelon négative ($P_{\text{réf}} = -0.20 \cdot 10^5$ W);
- ❖ Entre $t=0.6$ s et $t=1$ s ($P_{\text{réf}} = -0.125 \cdot 10^5$ W);

La puissance réactive :

- ❖ Entre $t=0$ s et $t=1$ s ($Q_{\text{réf}} = 0$ var);

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la GADA.

Le figure III.21 montrent que le couple électromagnétique de la machine asynchrone double alimentation.

Le figure III.24, III.25 montrent que les performances de poursuite des courants rotoriques et statoriques sont satisfaisantes ; cependant on remarque un dépassement au régime transitoire (au démarrage et au changement de consigne), ce qui signifie que le régulateur PI ne maîtrise pas le régime transitoire.

La figure III. 22, III.23 montre que la puissance active du côté du stator est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur d'énergie fournie par la DFAM. La puissance

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA)

réactive est toujours nulle, c'est une condition de fonctionnement de la DFAM pour avoir un facteur de puissance unitaire.

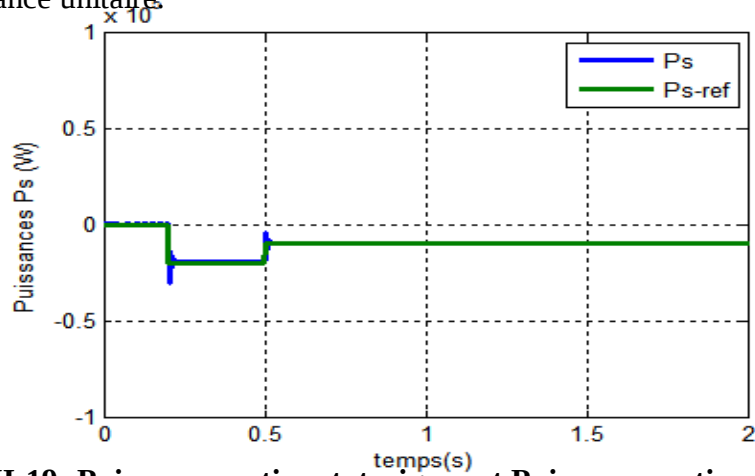


Figure III-19: Puissances active statoriques et Puissances active statoriques réf .

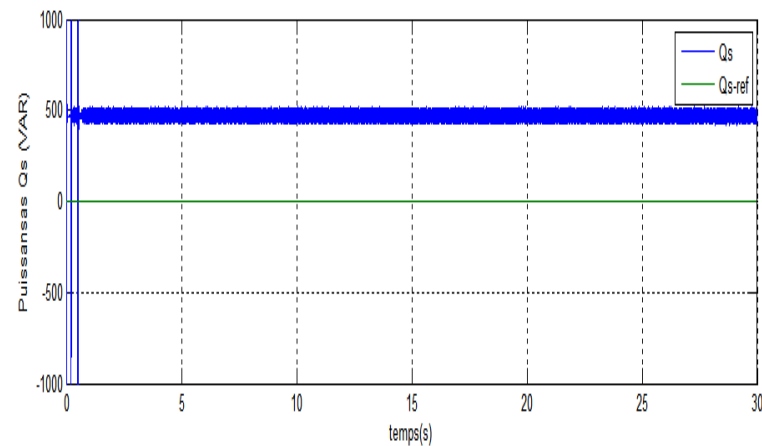


Figure III-20: Puissances réactive statoriques Puissances réactive statoriques réf .

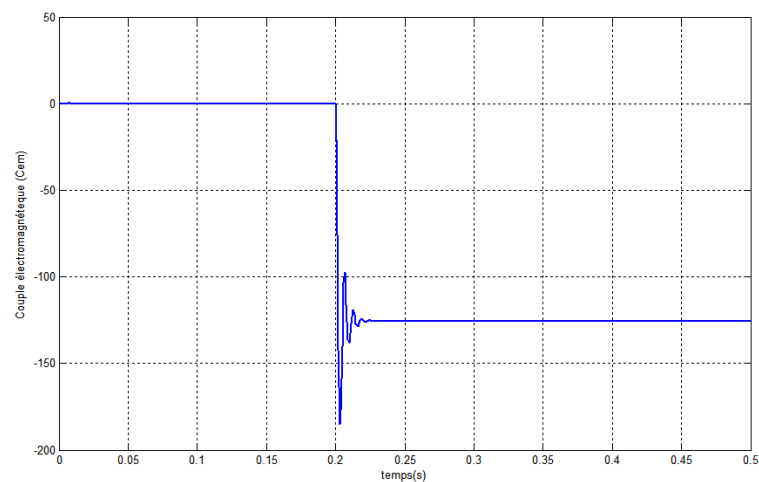


Fig. III.21. Couple électromagnétique.

CHAPITRE III : Modélisation et commande de la generatrice asynchrone double alimentation (GADA)

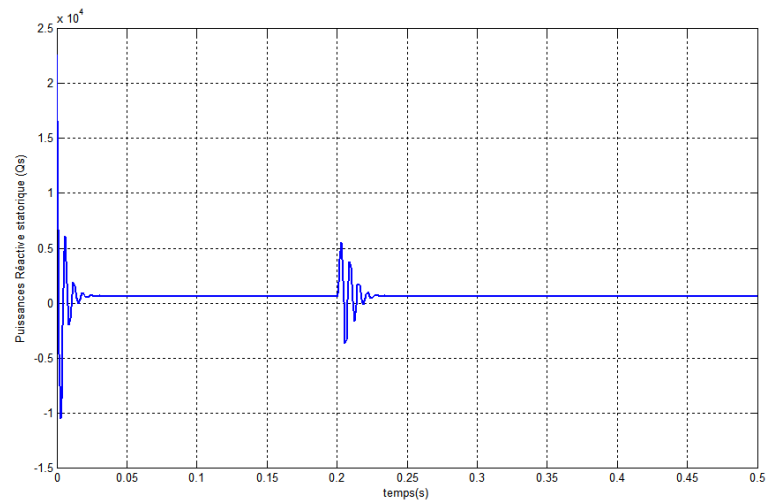


Figure III-22: Puissances réactive statoriques

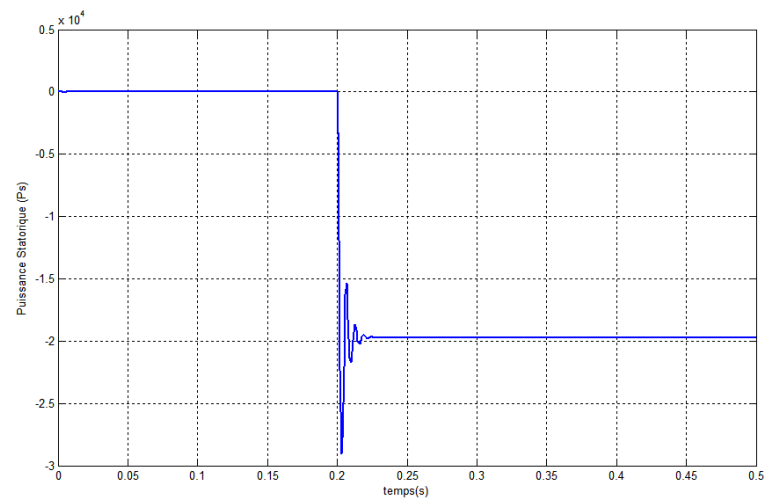


Figure III-23: Puissances active statoriques

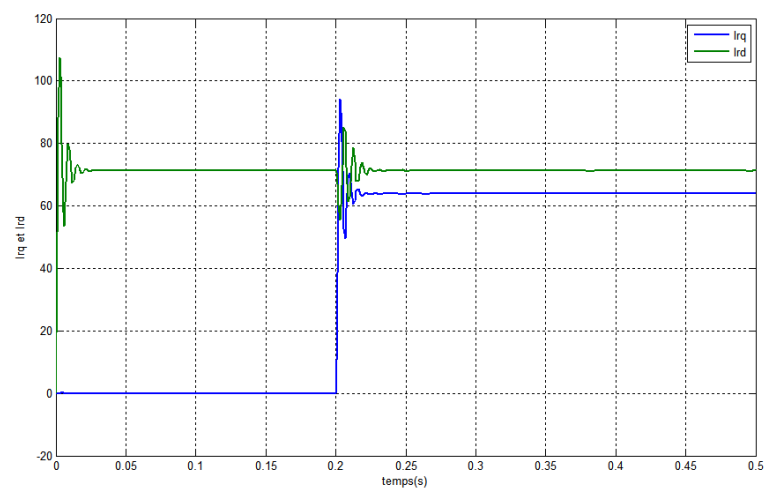


Fig. III.24. Les courants directs et quadrature rotorique

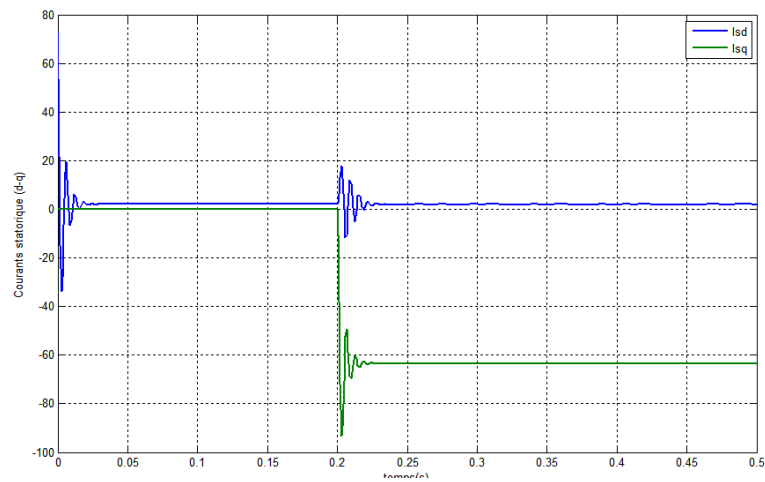


Fig. III.25. Les courants directs et quadrature statorique

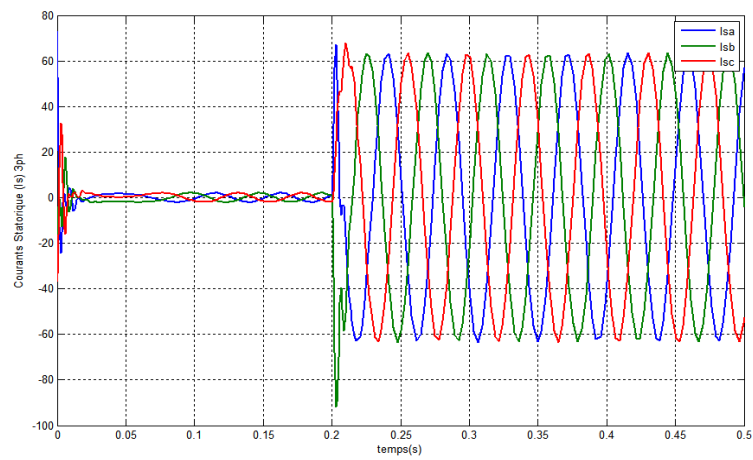


Fig. III.26. Courant triphasé statoriques

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la modélisation de la génératrice dans le repère de Park lié au champ tournant statorique, ensuite, la modélisation des deux convertisseurs qui alimentent le rotor de la GADA.

Dans la suite de ce chapitre, une méthode de commande du CCR a été examinée et détaillée, afin de maintenir une tension continue constante à sa sortie.

En fin, méthodes ont été développées, pour la commande vectorielle en puissance de la GADA : la commande directe et la commande indirecte. Cette étude nous a permis de conclure que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante.

En revanche, la méthode indirecte associée à des boucles de puissances, a permis d'avoir un système performant et robuste. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique.

Toutes ces études sont validées par simulation. Il faut signaler que les régulateurs PI utilisés dans ces commandes dépendent des paramètres de la génératrice, donc les performances de la commande vectorielle dépendent de la précision des paramètres de la GADA. Cependant, il existe des commandes modernes qui s'adaptent mieux avec ces exigences et qui sont moins sensibles et robustes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrone double alimentation qui peut être utilisée dans la production de l'énergie éolienne. Nous avons choisis deux stratégies de commande.

Le **premier chapitre** nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Ensuite on a présenté les différentes associations machine-convertisseur statique, utilisées pour la conversion éolienne

Dans le **deuxième chapitre**, on a établi le modèle mathématique des éléments principaux constituant la chaîne de conversion électromécanique dans l'éolienne. nous sommes intéressés à l'étude de la partie mécanique de l'éolienne et à sa commande. Nous avons développé une technique de maximisation de la puissance extraite. Les résultats de simulation d'un algorithme ont montré l'efficacité du contrôle pour la poursuite du point de fonctionnement optimal. Ensuite, les aspects théoriques, les différentes applications et la modélisation de la machine électrique double alimentation sont été décrites.

La génératrice asynchrone été destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans le **troisième chapitre** est en puissance active et réactive statoriques. Dans cette partie, on a présenté l'étude théorique de la commande vectorielle, ou on a exprimée les grandeurs statoriques de la GADA en fonction des grandeurs rotoriques ayant pour but le pilotage de la GADA par le rotor. Le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée. On a proposé ensuite l'asservissement d'un redresseur MLI à deux niveaux comme dispositif pour générer la source de tension pour l'alimentation de l'onduleur à deux niveaux. La première série de simulations

CONCLUSION GÉNÉRALE

est effectuée sans onduleur, La deuxième série de simulations est effectuée avec onduleur, La troisième est effectuée avec convertisseur.

Dans **le dernier chapitre**, la technique de la commande directe du couple (DTC) d'une GADA a été élaborée. Les résultats de simulation de la GADA nous ont permis de juger la qualité de la commande qui est caractérisée par l'absence de dépassement par rapport au consigne et par des faibles oscillations transitoires et des courts temps de réponse. En outre, la fréquence de commutation est variable et difficile à maîtriser du fait de l'utilisation des contrôleurs à hystérésis. Ce point constitue l'un des inconvénients majeurs de la DTC.

On peut donc conclure que la technique de commande DTC utilisée pour la commande de la GADA a conduit à des bonnes performances, ce qui nous encourage d'essayer d'introduire le concept de cette commande dans la chaîne de conversions éolienne et c'est dans le but d'améliorer les performances de commande de système éolien.

REFERENCE

- [1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*, vol. 2. Wiley Online Library, 2001.
- [2] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, and M. Narimani, "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 5, pp. 740–788, 2015.
- [3] G. W. E. Council, "Global Wind Statistics Report," *Brussels, Belgium, Technical Report*, vol. 4, 2018.
- [4] H. E. Murdock *et al.*, "Renewables 2019 global status report," 2019.
- [5] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, 2013.
- [6] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power conversion and control of wind energy systems*, vol. 76. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] M. Liserre, R. Cardenas, M. Molinas, and J. Rodriguez, "Overview of multi-MW wind turbines and wind parks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1081–1095, 2011.
- [8] F. Blaabjerg and Z. Chen, "Power electronics for modern wind turbines," *Synthesis Lectures on Power Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–68, 2005.
- [9] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [10] L. Y. Pao and K. E. Johnson, "Control of wind turbines," *IEEE Control systems magazine*, vol. 31, no. 2, pp. 44–62, 2011.
- [11] V. Yaramasu and B. Wu, *Model predictive control of wind energy conversion systems*. John Wiley & Sons, 2016.
- [12] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004.
- [13] F. Blaabjerg, M. Liserre, and K. Ma, "Power electronics converters for wind turbine systems," *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 48, no. 2, pp. 708–719, 2011.
- [14] X. Yang, D. Patterson, and J. Hudgins, "Permanent magnet generator design and control for large wind turbines," in *2012 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, 2012, pp. 1–5.
- [15] D. P. Kadam and B. E. Kushare, "Overview of different wind generator systems and their comparisons," *International journal of engineering science & advanced technology*, vol. 2, no. 4, pp. 1076–1081, 2012.
- [16] J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, and R. Domke, "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164, 2005.
- [17] S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, "Mechanical stresses in fixed-speed wind turbines due to network disturbances," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 4, pp. 361–367, 2001.
- [18] M. R. Khadraoui and M. Elleuch, "Comparison between optislip and fixed speed wind energy conversion systems," in *2008 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2008, pp. 1–6.
- [19] D. J. Burnham, S. Santoso, and E. Muljadi, "Variable rotor-resistance control of wind turbine generators," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1–6.
- [20] P. Jatinkumar, S. P. Gupta, and S. P. Singh, "Comparison of control techniques for rotor current control of line-excited slip-ring IG for WECS," in *2010 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, 2010, pp. 669–674.
- [21] S. Metatla, S. Mekhtoub, R. Ibtouen, and A. Nesba, "Dynamic behavior of doubly fed induction generator during network voltage dips," in *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2014, pp. 1–6.

- [22] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine," *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 143, no. 5, pp. 380–387, 1996.
- [23] S. Arnaltes, J. L. Rodriguez-Amenedo, and M. E. Montilla-DJesus, "Control of variable speed wind turbines with doubly fed asynchronous generators for stand-alone applications," *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 26, 2018.
- [23] R. R. Wandile, S. V. Karemore, and G. S. Rakesh, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation," *International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation And Control Engineering*, vol. 3, no. 5, 2015.
- [25] L. Xu and P. Cartwright, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 750–758, 2006.
- [26] J. Ekanayake and N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," *IEEE Transactions on Energy conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 800–802, 2004.
- [27] P. S. Flannery and G. Venkataramanan, "A fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1126–1135, 2008.
- [28] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine," *IEEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 143, no. 5, pp. 380–387, 1996.
- [29] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines," *IEEE Industry applications magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 26–33, 2002.
- [30] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source converter topologies for industrial medium-voltage drives," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, 2007.
- [31] S. Kouro et al., "Recent advances and industrial applications of multilevel converters", *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, 2010.
- [32] V. Agarwal, R. K. Aggarwal, P. Patidar, and C. Patki, "A novel scheme for rapid tracking of maximum power point in wind energy generation systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 1, pp. 228–236, 2009.
- [33] J. Wang, D. Xu, B. Wu, and Z. Luo, "A low-cost rectifier topology for variable-speed highpower PMSG wind turbines," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 26, no. 8, pp. 2192–2200, 2011.
- [34] M. E. Haque, M. Negnevitsky, and K. M. Muttaqi, "A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator," in 2008 IEEE industry applications society annual meeting, 2008, pp. 1–8.
- [35] K. Tan and S. Islam, "Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 392–399, 2004.
- [36] K.-H. Kim, Y.-C. Jeung, D.-C. Lee, and H.-G. Kim, "LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 2376–2384, 2011.
- Bibliographie
- 144
- [37] R. Lohde, S. Jensen, A. Knop, and F. W. Fuchs, "Analysis of three phase grid failure and Doubly Fed Induction Generator ride-through using crowbars," in 2007 European conference on power electronics and applications, 2007, pp. 1–8.
- [38] S. Engelhardt, I. Erlich, C. Feltes, J. Kretschmann, and F. Shewarega, "Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators," *IEEE Transactions*

on Energy Conversion, vol. 26, no. 1, pp. 364–372, 2010.

[39]R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, “Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation,” IEE Proceedings-Electric power applications, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, 1996.

[40]Y. DJERIRI, “Commande directe du couple et des puissances d’une MADA associée à un système éolien par les techniques de l’intelligence artificielle,” PhD Thesis, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel- Abbès, 2015.

[41]A. Mirecki, “Étude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” PhD Thesis, Université de Toulouse, 2005.

[42]L. Peng, “Reconfiguration du dispositif de commande d’une éolienne en cas de creux de tension,” PhD Thesis, Ecole centrale de Lille, 2010.

[43]H. A. Pulgar-Painemal and P. W. Sauer, “Doubly-fed induction machine in wind power generation,” in Electrical Manufacturing and Coil Winding Exposition, 2009, vol. 4.

[44]I. YAICHI, “Contribution à l’amélioration de la qualité d’énergie électrique d’un système éolien basé sur la MADA.,” PhD Thesis, Université de Sidi Bel Abbès-Djillali Liabes, 2019

[45]R. Riyadh and R. Abdessemed, “Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone doublealimentée,” PhD thesis , University of Batna, Faculty of Technology, 2016..

[46]G. Abad, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation, vol. 85. John Wiley & Sons , 2011.

[47]D. Ramuz, “Machine généralisée alimentée par deux convertisseurs: contribution à l’étude et à la commande avec et sans capteur,” PhD Thesis, Besançon, 2000.

[48]S. El Aïmani, “Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,” PhD Thesis, Ecole Centrale de Lille, 2004.

[49]Y. DJERIRI and A. MEROUFEL, “Commande directe du couple et des puissances d’une MADA associée à un système éolien par les techniques de l’intelligence artificielle,” PhD Thesis, 2015.

[50]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,” Université de Lille, 2011.

[51]T. Ghennam and E.-M. Berkouk, “Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems,” Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 4, pp. 444–455, 2010.

[52]E. Tremblay, A. Chandra, and P. J. Lagacé, “Grid-side converter control of DFIG wind turbines to enhance power quality of distribution network,” in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp. 6-pp.

[53]A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” PhD Thesis, Université Henri PoincaréNancy 1, 2006 .

ANNEXES

ANNEXES

Annexes A

1. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Paramètres	Valeurs	Unités
<i>Puissance nominale (P_n)</i>	2	MW
<i>Nombre de Pales (R_t)</i>	3	-
<i>Vitesse du vent minimale (V_{vm})</i>	7.5	m/s
<i>Vitesse du vent nominale (V_{vn})</i>	12.5	m/s
<i>Masse volumique de l'air (ρ)</i>	1.1225	kg/m ³
<i>Ratio de vitesse optimale (λ_{opt})</i>	7.2	-
<i>Coefficient de puissance maximal (C_{pmax})</i>	0.44	-
<i>Gain du multiplicateur (G)</i>	80	-
<i>Inertie de la turbine (J_t)</i>	800	Kg.m ²

2. Paramètres de la GADA.

Paramètres	Valeurs	Unités
<i>Puissance active statorique nominale (P_n)</i>	2	MW
<i>Couple nominal</i>	12732	N.m
<i>Tension nominale statorique (V_{sn})</i>	690	V
<i>Courant nominale du stator (I_{sn})</i>	1760	A
<i>Vitesse de rotation nominale (Ω_{nom})</i>	1500	tr/min
<i>Nombre de pair de pole (p)</i>	2	-
<i>Plage de vitesse</i>	±30	%
<i>Inertie de la turbine (J_g)</i>	800	Kg.m ²
<i>Resistance du stator (R_s)</i>	2.6	mΩ
<i>Resistance du rotor (R_r)</i>	2.9	mΩ
<i>Inductance du stator (L_s)</i>	2.587	mH
<i>Inductance du rotor (L_m)</i>	2.587	mH
<i>Inductance mutuelle (L_m)</i>	2.5	mH

Résumé

Résumé :

Dans ces travaux de thèse, l'objectif général est d'enrichir la base de connaissances nécessaire pour une contribution à l'étude et à la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une génératrice asynchrone double alimentation (GADA). Après avoir modélisé la chaîne de conversion d'énergie éolienne complète, nous avons proposé la conception du modèle d'un système éolien avec asservissement de vitesse, en utilisant méthode de contrôle MPPT : la méthode directe et la méthode indirecte basée sur un régulateur, de type PI Contrôle de la puissance active et réactive par système éolien. Finalement nous avons montré qu'un système éolien basé sur une GADA pour producteur de l'énergie électrique.

Les résultats obtenus en simulation ou sur un simulateur en temps réel (Matlab).

Mots clés :

Energie renouvelable, Turbine Eolienne, GADA, MPPT, Commande vectorielle.

المخلص

الهدف العام في هذا البحث هو إثراء قاعدة المعرفة اللازمة للمساهمة في الدراسة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس مولد غير متزامن ثنائي الطاقة (GADA) بعد نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح الكاملة، اقترحنا تصميم نموذج لنظام طاقة الرياح مع التحكم في السرعة، باستخدام طريقتين للتحكم في: MPPT الطريقة المباشرة والطريقة غير المباشرة القائمة على منظم، من النوع PI . ، للتحكم في الاستطاعة الفعالة والغير فعالة في نظام الرياح. أخيراً، أظهرنا أن نظام طاقة الرياح القائم على GADA يمكن أن يشارك بفعالية في إنتاج الطاقة الكهربائية .

النتائج التي تم الحصول عليها في المحاكاة أو على جهاز محاكاة الوقت الحقيقي (ماتلاب)،

كلمات مفتاحية:

الطاقة المتجددة، توربينات الرياح، GADA، MPPT، التحكم الشعاعي.