

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



Université 20 Août 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département du génie électrique



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat LMD

Spécialité : Electrotechnique

THEME

**CONTRIBUTION A L'APPLICATION DES COMMANDES
ET DIAGNOSTIC AVANCEES AUX SYSTEMES DE
CONVERSION EOLIENNE**

Par : **LEULMI Rayane**

Devant le Jury composé de :

Pr. BOUDEBBOUZ Omar	Président	Université 20 août 1955-Skikda
Pr. MEDOUED Ammar	Rapporteur	Université 20 août 1955 - Skikda
Pr. LEKHCHINE Salima	Co-Rapporteuse	Université 20 août 1955 - Skikda
Pr. LEBEROUD Abdessalem	Examineur	Ecole Nationale Polytechnique de Constantine
Pr. SOUFI Youcef	Examineur	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi - Tébessa

N° d'ordre : **D012125037D**

Année universitaire : 2024/2025

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Liste des symboles	
Introduction générale	1

CHAPITRE 1	Généralités sur l'énergie éolienne	
1.1.	Introduction	4
1.2.	Énergie éolienne	4
1.2.1.	Définition de l'énergie éolienne	4
1.2.2.	Propriétés du vent	5
1.3.	Capacité éolienne installée	5
1.3.1.	Situation de l'énergie éolienne dans le monde	5
1.3.2.	Gisement éolien en Algérie	6
1.4.	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
1.4.1	Avantages	8
1.4.2	Inconvénients	8
1.5.	Applications des systèmes éoliens	9
1.5.1.	Systèmes hybrides	9
1.5.2.	Systèmes isolés	9
1.5.3.	Systèmes reliés au réseau	9
1.6.	Classification des éoliennes	10
1.6.1.	Selon la disposition géométrique de l'axe de rotation	10
1.6.1.1.	Éolienne à axe vertical	10
1.6.1.2.	Éolienne à axe horizontal	11
1.6.2.	Selon le régime de fonctionnement	12
1.6.2.1.	Systèmes éoliens isolés	12
1.6.2.2.	Systèmes éoliens connectés au réseau	12
1.6.3.	Selon la localisation	12
1.6.3.1.	Éoliennes terrestres « Onshore »	12
1.6.3.2.	Éoliennes en pleine mer « Offshore »	12
1.6.3.3.	Éoliennes volantes « Farshore »	13
1.6.4.	Selon la taille de l'éolienne	13
1.6.5.	Selon leur puissance nominale	13
1.6.6.	Selon le mode de régulation de la vitesse du rotor	13
1.6.6.1.	Eoliennes à vitesse fixe	14
1.6.6.2.	Eolienne à vitesse variable	14
1.6.7.	Selon le secteur d'utilisation	15
1.7.	Génératrices électriques	16
1.7.1.	Génératrices synchrones	16
1.7.1.1.	Génératrice synchrone à rotor bobiné	16
1.7.1.2.	Génératrice synchrone à aimant permanent	17
1.7.2.	Génératrices asynchrones	17
1.7.2.1.	Génératrice asynchrone à cage d'écureuil	17

	1.7.2.2.	Génératrice asynchrone à double stator	18
	1.7.2.3.	Génératrice asynchrone à double alimentation « Brushless »	19
	1.7.2.4.	Génératrice asynchrone à double alimentation	19
1.8.		Technologie de la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne	21
	1.8.1.	Composants majeurs de système éolien	21
	1.8.2.	Principe de conversion de l'énergie éolienne	23
1.9.		Etat de l'art sur le diagnostic et les défauts du système éolien	24
	1.9.1.	Terminologie dédiée au diagnostic	24
	1.9.2.	Défauts des composants critiques des éoliennes	26
1.10.		Conclusion	28

CHAPITRE 2 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur la GADA

2.1.		Introduction	29
2.2.		Chaîne éolienne étudiée	29
2.3.		Structure de la machine (MADA) et configuration électrique	30
	2.3.1	Description de la MADA	30
	2.3.2.	Modes de fonctionnement de la MADA	30
	2.3.2.1.	Mode moteur	31
	2.3.2.2.	Mode générateur	32
2.4.		Modélisation d'un système éolien	33
	2.4.1.	Hypothèses simplificatrices	33
	2.4.2.	Modèle du vent appliqué au système	33
	2.4.3.	Modélisation de la partie mécanique	34
	2.4.3.1.	L'énergie éolienne	34
	2.4.3.2.	Puissance du vent	35
	2.4.3.3.	Coefficient de puissance	35
	2.4.3.4.	Coefficient de couple	36
	2.4.3.5.	Modèle du multiplicateur de vitesse	37
	2.4.3.6.	Modèle de l'arbre mécanique	37
	2.4.4.	Modélisation de la partie électrique	39
	2.4.4.1.	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation	39
	2.4.4.2.	Modèle de la GADA	39
	2.4.4.3.	Modèle de la MADA dans le repère de Park	41
	2.4.4.4.	Choix de repère de référence	44
	2.4.4.5.	Modélisation de la source d'alimentation	47
2.5.		Résultats de simulation et discussion	55
	2.5.1.	Résultats de simulation de la turbine	55
	2.5.2.	Résultats de simulation de la GADA	57
	2.5.3.	Interprétations des résultats	60
2.6.		Conclusion	61

CHAPITRE 3 : Commande de la partie mécanique

3.1.	Introduction	62
3.2.	Aspect général de la commande d'une chaîne de production éolienne	62
3.3.	Stratégie de la commande de la turbine éolienne	63
3.3.1.	Extraction du maximum de la puissance du vent	63
3.3.2.	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	64
3.3.2.1.	Système à décrochage aérodynamique "stall"	64
3.3.2.2.	Régulation du system a calage « Pitch control »	64
3.4.	Optimisation de la conversion énergétique d'une éolienne à vitesse variable	65
3.4.1.	Principe de la MPPT	66
3.4.2.	Stratégies de commande MPPT	66
3.4.2.1.	MPPT par contrôle du rapport de vitesse de pointe (RVP)	67
3.4.2.2.	MPPT par contrôle de couple optimal (CCO)	68
3.4.2.3.	MPPT par contrôle de logique floue (FLC)	69
3.5.	Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.	70
3.6.	Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation	72
3.6.1.	Asservissement de la vitesse	74
3.6.1.1.	Régulateur proportionnel intégral (PI)	74
3.6.1.2.	Régulateur par mode glissant	76
3.6.1.3.	Régulateur par méthode de Backstepping	82
3.6.1.4.	Régulateur par logique floue (RLF)	87
3.7.	Résultats de simulation	93
3.7.1.	Résultats obtenus sans la structure de MPPT sans asservissement de vitesse	93
3.7.2.	Résultats obtenus avec la structure de MPPT avec asservissement de vitesse	94
3.7.3.	Interprétation des résultats	98
3.8.	Conclusion	99

CHAPITRE 4 : Stratégies de Commande d'un Système Connecté au Réseau

4.1.	Introduction	100
4.2.	Système de conversion de l'énergie éolienne	100
4.3	Contrôle des performances du GADA	101
4.4	Contrôle des performances du GADA en régime permanent par deux stratégies de magnétisation	101

4.5	Contrôle des performances de la GADA par l'utilisation de modèles Matlab/Simulink	106
4.6	Résultats et Discussion	108
4.6.1.	Résultats de simulation de l'éolienne	108
4.6.2.	Résultats de la comparaison des deux stratégies de magnétisation pour le contrôle en régime permanent de la GADA.	109
4.6.3.	Résultats de simulation des performances de la GADA utilisant Matlab/Simulink.	112
4.6.4.	Comparaison du contrôle et discussion	115
4.7.	Stratégie de contrôle de la GADA	116
4.8.	Commande vectorielle à flux orienté de la GADA	117
4.8.1.	Principe de la commande vectorielle avec l'orientation du flux magnétique	117
4.8.2.	Commande vectorielle directe basée sur l'orientation du flux statorique (CVD)	119
4.8.3.	Commande vectorielle indirecte basée sur l'orientation du flux statorique (CVI).	120
4.8.3.1.	Commande indirecte sans boucle de puissance	120
4.8.3.2.	Commande indirecte avec boucle de puissance	122
4.9.	Synthèse du régulateur PI	123
4.10.	Résultats et discussion obtenus en utilisant un régulateur PI	124
4.11.	Application de la commande par mode glissant à la GADA pour le contrôle de la puissance active et réactive	125
4.11.1.	Contrôle de la puissance active	126
4.11.2.	Contrôle de la puissance réactive	128
4.11.3.	Surface de régulation du courant rotorique quadrature	129
4.11.4.	Surface de régulation du courant rotorique directe	130
4.12	Résultats et discussion du obtenus en utilisant un régulateur CMG	131
4.13	Application de la commande backstepping à la GADA pour le contrôle de la puissance active et réactive	132
4.14	Résultats et discussion obtenus en utilisant un régulateur backstepping	136
4.15	Conclusion	138

CHAPITRE 5 : Stratégie de contrôle et protection du système éolien contre les creux de tensions

5.1.	Introduction	139
5.2.	Exigences du réseau	139
5.2.1.	Qualité de l'énergie électrique	139
5.2.1.1.	Qualité de la tension	140
5.2.1.2.	Qualité du courant	140

5.2.2.	Perturbations électriques	140
5.2.2.1.	Creux de tension	141
5.2.2.2.	Coupures brèves	141
5.2.2.3.	Classification des creux de tension	141
5.2.3.	Connexion potentielle au réseau pour les éoliennes	142
5.2.4.	Exigences des codes réseau pour le système GADA	143
5.3.	GADA lors d'un creux de tension équilibrée et déséquilibrée	143
5.3.1.	Défaut Symétrique : creux de tension triphasé symétriques (équilibrés)	144
5.3.2.	Défaut asymétrique : creux de tension triphasé asymétriques (d'équilibrés)	144
5.3.2.1.	Classification des creux de tension asymétriques basée sur la transformation par vecteur spatial	145
5.4.	Méthodes d'extraction des deux séquences positive et négative	145
5.4.1.	Méthode d'extraction basée sur la matrice de Fortescue	145
5.5.	Exigences des codes réseau (LVRT et HVRT)	148
5.5.1.	Maintien en cas de surtension HVRT (<i>High Voltage Ride-Through</i>)	148
5.5.2.	Maintien en cas de creux de tension LVRT (<i>Low Voltage Ride-Through</i>)	148
5.5.2.1.	Techniques d'amélioration de LVRT	148
5.6.	Techniques LVRT basées sur la protection	149
5.6.1.	Crowbar	150
5.6.1.1.	Technique du Crowbar CC : protection des convertisseurs GADA lors des défauts	150
5.6.1.2.	Technique du Crowbar Série Stator : protection interne des enroulements du stator	151
5.6.1.3.	Technique du Crowbar à Terminal Extérieur : protection de la GADA contre les courants de défaut	151
5.6.1.4.	Technique conventionnelle du Crowbar Rotor : conversion de la GADA en SFIG lors des défauts	151
5.6.1.5.	Choix de la résistance du crowbar	152
5.7.	Contrôle des SCEE basés sur la GADA pour les chutes de tension	154
5.7.1.	Contrôle d'une éolienne à vitesse variable	154
5.7.2.	Structure de contrôle pour la commutation de la protection crowbar	155
5.7.3.	Structure de contrôle côté machine	156
5.7.4.	Structure de contrôle côté réseau	157
5.8.	Résultats de simulation et discussion	158
5.8.1.	État du système durant l'état sein	159
5.8.2.	Creux de tension symétrique sans protection crowbar	162

5.8.3.	Creux de tension asymétrique type C sans protection par crowbar	167
5.8.4.	Creux de tension asymétrique type C avec protection par crowbar	171
5.9.	Conclusion	176
Conclusion Générale		177
Références		
Annexes		

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que la persévérance et le courage pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours de thèse de doctorat.

*Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de thèse, Monsieur **MEDOUED Ammar**, Professeur à l'Université du 20 août 1955 - Skikda, pour m'avoir encadré et soutenu durant la réalisation de ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame **LEKHCHINE Salima**, Professeur à l'Université du 20 août 1955 - Skikda pour tous ses efforts et sa collaboration pour l'achèvement de ce travail de son début à sa fin. Je la remercie aussi amplement, pour les encouragements, la force et la volonté qu'elle m'a donné pour réaliser ce travail. Je suis très touché par son soutien, son aide précieuse, les conseils et les connaissances dont elle a su me faire profiter. Il m'est difficile d'exprimer en quelques mots toute l'admiration que je lui porte.*

*Je souhaite remercier tout particulièrement, le Professeur **BOUKADOUM Ahcene** président du comité de formation doctoral et directeur du Laboratoire **LES** de Skikda, pour son accompagnement précieux et sa facilitation administrative tout au long de mon parcours de doctorat.*

*Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail : Monsieur **BOUDEBBOUZ Omar** Professeur à l'Université de Skikda, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse. Monsieur **SOUFI Youcef** Professeur à l'Université de Tébessa, Monsieur **LEBAROUD Abdessalam** Professeur à l'Ecole National Polytechnique de Constantine, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.*

Je tiens à adresser aussi mes remerciements les plus vifs, les plus sincères et chaleureux, à mes parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux nous ne pouvons traverser ces longues années d'études et de travail.

Enfin, je souhaite remercier tous ce qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Ce travail est dédié à mes chers parents dont le soutien inébranlable et sans fin m'a permis de le réaliser. Je suis arrivé ici grâce à leur amour et à leur soutien infatigable. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à mon cher frère, mes chères sœurs et aussi à mon mari pour leur soutien tout au long du trajet, aux moments de certitudes comme aux moments de doutes.

Je dédie ce travail à toute la famille Leulmi, à tous mes amis et à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant tout le parcours de mes études .

LEULMI Rayane

المخلص

تركز هذه الأطروحة على تحسين إنتاج الطاقة الريحية، لا سيما من خلال الأنظمة المعتمدة على الآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة. ويتمثل الهدف الرئيسي في تطوير نهج متكامل يجمع بين النمذجة الرياضية، واستراتيجيات التحكم المتقدمة، وتقنيات تشخيص الأعطال في أنظمة طاقة الرياح، بما يضمن إنتاج طاقة موثوقاً وعالي الجودة ومتوافقاً مع متطلبات الشبكة الكهربائية. يركز المحور الأول من هذا البحث على تحسين أنظمة إنتاج الطاقة الريحية من خلال اختيار بنية فعالة وملائمة. ويتضمن ذلك دراسة اقتران الآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة بتوربين رياح، بما يسمح بتحقيق أقصى استخلاص ممكن لقدرة الرياح تحت ظروف تشغيل مختلفة. كما تم تحليل دور محولات القدرة الساكنة المتصلة بالشبكة في تحسين التحكم في تدفق القدرة الفعالة وغير الفعالة، وتعزيز جودة الطاقة الكهربائية المنتجة. أما المحور الثاني فيركز على تطوير استراتيجيات التحكم والحماية وتشخيص الأعطال في أنظمة طاقة الرياح، بهدف ضمان استقرار مزارع الرياح خاصة أثناء اضطرابات الشبكة، مثل انخفاضات الجهد قصيرة المدة. ويسعى هذا الجزء إلى تمكين توربينات الرياح من البقاء متصلة بالشبكة دون انفصال، من خلال دمج أجهزة حماية ملائمة مثل مقاومة الكروبار، إضافة إلى تحسين خوارزميات التحكم لضمان الاستجابة السريعة والفعالة أثناء الحالات الطارئة. وفي إطار تكميلي، أُجريت تحليلات أداء ومحاكاة عددية وذلك لتقييم سلوك الأنظمة المدروسة تحت ظروف تشغيل واقعية، خاصة أثناء الاضطرابات المتوازنة وغير المتوازنة للشبكة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية :

الطاقة المتجددة، طاقة الرياح، التوربين، انخفاض الجهد، تشخيص الأعطال، التحكم، المحاكاة

Abstract

This thesis focuses on optimizing wind energy production, particularly through systems based on the Doubly-Fed Induction Generator. The main objective is to develop an integrated approach that combines advanced modeling, control strategies, and fault diagnosis techniques for wind energy conversion systems to ensure reliable, efficient, and high-quality power generation compliant with grid requirements. The first part of this research addresses the optimization of wind energy production systems through the selection of an efficient and robust architecture. It involves the study of a doubly-fed induction machine coupled with a wind turbine, enabling maximum wind power extraction under varying wind speed conditions. Particular attention is given to the role of grid-connected static power converters in enhancing active and reactive power control, improving dynamic performance, and ensuring better power quality of the generated energy. The second part focuses on the development of advanced control and protection strategies, as well as fault diagnosis methods for wind energy systems. These strategies aim to maintain wind farm stability, especially during grid disturbances such as voltage dips. The objective is to enable wind turbines to remain connected to the grid (Fault Ride-Through capability) by integrating suitable protection devices, including the crowbar resistor, while ensuring rapid and stable system response. In addition, comprehensive performance analyses and numerical simulations were carried out using MATLAB/Simulink to evaluate the behavior of the proposed systems under realistic operating conditions, particularly during balanced and unbalanced grid disturbances.

Keywords: Renewable energy, wind power, turbine, DFIG, voltage dips, fault diagnosis, control, simulation.

Résumé

Cette thèse porte sur l'optimisation de la production d'énergie éolienne, en particulier à travers des systèmes basés sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation. L'objectif principal est de proposer une approche intégrée combinant la modélisation avancée, la commande et le diagnostic des défauts des systèmes de conversion éolienne, afin d'assurer une production d'énergie fiable, performante et conforme aux exigences du réseau électrique. Le premier axe de recherche concerne l'optimisation des systèmes de production éolienne par le choix d'une architecture efficace et robuste. Il s'agit notamment de l'étude de la MADA couplée à une turbine éolienne, permettant d'optimiser l'extraction de la puissance du vent dans différentes conditions de fonctionnement. Une attention particulière est accordée aux convertisseurs statiques connectés au réseau, dont le rôle est d'améliorer le contrôle des puissances active et réactive, d'optimiser les performances dynamiques et de garantir une meilleure qualité de l'énergie injectée au réseau. Le second axe est consacré au développement de stratégies avancées de commande, de protection et de diagnostic des défauts. Ces stratégies visent à assurer la stabilité des parcs éoliens, notamment en cas de perturbations du réseau telles que les creux de tension. L'objectif est de doter les éoliennes d'une capacité de maintien en connexion au réseau, grâce à l'intégration de dispositifs de protection appropriés, tels que la résistance de crowbar, tout en garantissant une réponse rapide et stable du système. En complément, des analyses de performances et des simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink afin d'évaluer le comportement des systèmes étudiés dans des conditions de fonctionnement réalistes, notamment lors de perturbations équilibrées et déséquilibrées du réseau électrique.

Mots-clés : Énergie renouvelable, Éolien, Turbine, MADA, Creux de tension, Diagnostic de défauts, Commande, Simulation.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure.1.1	Estimation de la capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2013 à 2023(en Gigawatts)	6
Figure.1.2	Atlas de la vitesse du vent de l'Algérie	7
Figure.1.3	GSRB connectée au réseau	16
Figure.1.4	GSAP reliée au réseau électrique	17
Figure.1.5	Configuration de la GAS en liaison avec le réseau.	18
Figure.1.6	GASAS connectée au réseau.	18
Figure.1.7	GADA « Brushless » connectée au réseau	19
Figure.1.8	Configuration GADA connectée au réseau électrique	20
Figure.1.9	Schéma fonctionnel du système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	21
Figure.1.10	Principaux composants d'un système de conversion éolien haute puissance à vitesse variable	22
Figure.1.11	Principe de la conversion d'énergie éolienne	24

Chapitre 2

Figure 2.1	Chaîne éolienne	29
Figure.2.2.	Fonctionnement de la GADA en régime moteur	32
Figure.2.3	Fonctionnement de la GADA en régime générateur	32
Figure 2.4	Profil du vent	34
Figure 2.5	Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales	36
Figure 2.6	Coefficient du couple en fonction du rapport des vitesses relatives	37
Figure 2.7	Modèle mécanique de la turbine éolienne	38
Figure 2.8	Schéma bloc fonctionnel de la turbine	39
Figure.2.9	Différents cadres de référence pour représenter les vecteurs spatiaux du GADA	42
Figure 2.10	Modèle de circuit équivalent du DFIG dans le cadre de référence dq	44
Figure.2.11	Cadre de référence dq rotatif synchrone aligné sur le vecteur d'espace de flux du stator	45

Figure 2.12	Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA	47
Figure 2.13	Représentation du système d'alimentation de la GADA	48
Figure 2.14	Modèle simplifié du générateur connecté au réseau avec les deux convertisseurs statiques et le filtre	48
Figure 2.15	Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux	49
Figure 2.16	Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo sinusoidale à une porteuse.	51
Figure 2.17	Structure du redresseur à MLI	52
Figure 2.18	Schéma fonctionnel du redresseur à MLI	53
Figure 2.19	Schéma bloc de la commande en courant du redresseur à MLI dans le repère (d, q)	55
Figure 2.20	Boucles de régulation équivalentes des courants et de la tension	55
Figure.2.21	(a) Vitesse de la turbine, (b) Puissance aérodynamique et (c) Couple aérodynamique	56
Figure.2.22	(a) Vitesse relative et (b) Coefficient de puissance	57
Figure.2.23	(a) Vitesse mécanique et (b) Couple électromagnétique	57
Figure.2.24	Composantes des courants statoriques (I_{sq} et I_{sd}) selon le repère (d,q)	58
Figure.2.25	Composantes des courants rotoriques (I_{rd} et I_{rq}) suivant le repère	58
Figure.2.26	Composantes des flux statoriques (φ_{sd} et φ_{sq}) selon le repère (d, q)	59
Figure.2.27	Composantes des flux rotoriques (φ_{rd} et φ_{rq}) selon le repère (d,q)	59
Figure.2.28	Courants rotoriques	59
Figure.2.29	Courants statoriques	60
Figure.2.30	Composantes des tensions rotoriques (V_{rd} et V_{rq}) suivant le repère (d,q)	60
Figure.2.31	Composantes des tension statoriques (V_{sd} et V_{sq}) selon le repère (d,q)	61

Chapitre 3

Figure 3.1.	Architecture de commande du système éolien	62
Figure 3.2	Zones de fonctionnement d'une éolienne	63
Figure 3.3	Schéma bloc du control du l'angle de calage.	65
Figure 3.4.	Principe de la méthode MPPT de lambda optimal (RVP)	68
Figure 3.5.	MPPT par contrôle de couple optimal	69
Figure 3.6.	Principe de fonctionnement de MPPT	70
Figure 3.7	Schéma de principe pour l'optimisation de la puissance par la logique floue	70

Figure 3.8	Schéma bloc de Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation	72
Figure 3.9	Schéma bloc de contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation	73
Figure 3.10	Boucle de régulation de la vitesse de rotation par un régulateur PI	75
Figure 3.11	Différents modes de glissant dans le plan de phase : (a) glissement idéal, (b) glissement réel	76
Figure 3.12	Commande équivalente	77
Figure 3.13	Fonction " Sign " (Commande de type relais)	80
Figure 3.14	Fonction saturation	81
Figure 3.15	Fonction Smooth	82
Figure 3.16	Schéma de principe du contrôle par backstepping	86
Figure 3.17	(a) Schéma synoptique d'un contrôleur flou (b) Configuration d'un contrôleur flou	88
Figure 3.18	Schéma bloc d'un contrôleur flou	91
Figure 3.19	Fonctions d'appartenance (e , Δ_e et Δ_{u_n}) utilisées par le contrôleur	92
Figure.3.20	Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse mécanique	94
Figure.3.21	Résultat de simulation de la vitesse relative avec asservissement de la vitesse mécanique	95
Figure.3.22	Résultat de simulation de la vitesse mécanique avec asservissement	96
Figure.3.23	Résultat de simulation de l'erreur de la vitesse mécanique avec asservissement	97
Chapitre 4		
Figure 4.1	Construction de systèmes éoliens basés sur le GADA	100
Figure 4.2	Circuit équivalent en régime permanent dans le repère dq de la GADA	102
Figure 4.3	Organigramme du processus de programmation appliqué à l'analyse des performances de la GADA avec $Q_s = 0$	105
Figure 4.4	Le modèle de simulation du système éolien	107
Figure 4.5	Référentiel synchrone et son modèle de commande vectorielle	107
Figure.4.6	Simulation de la commande MPPT avec contrôle de la vitesse mécanique utilisant un FLC	109
Figure.4.7	Résultats de simulation du contrôle en régime permanent de la GADA dans une éolienne à vitesse variable avec les deux techniques de magnétisation $Q_s = 0$ et $i_{dr} = 0$.	112
Figure.4.8	Résultats de la simulation de l'étude des performances de la GADA avec les modèles Matlab/Simulink	115
Figure.4.9	Classifications des stratégies de contrôle des entraînements à fréquence variable	116

Figure.4.10.	Principe de la commande vectorielle à flux orienté	117
Figure.4.11.	Schéma bloc du système à réguler	118
Figure.4.12.	Schéma du principe du Commande vectorielle directe basée sur l'orientation du flux statorique	119
Figure.4.13.	Schéma bloc du principe du contrôle des puissances statoriques de la GADA (commande directe)	120
Figure.4.14.	Principe de contrôle vectoriel sans boucle de puissance	121
Figure.4.15.	Schéma de la commande indirecte sans boucles de puissances	121
Figure.4.16.	Principe de control vectoriel avec boucle de puissance	122
Figure.4.17.	Schéma bloc du principe du contrôle des courants rotoriques de la GADA (commande indirecte)	123
Figure.4.18.	Système régulé par un PI	123
Figure.4.19.	Résultats de simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne avec Réglage des puissances par régulateur PI	125
Figure.4.20.	Structure du contrôleur en mode glissant pour la puissance active	128
Figure.4.21.	Structure du contrôleur en mode glissant pour la puissance réactive	129
Figure.4.22.	Schéma bloc de réglage par mode glissant	131
Figure.4.23.	Résultats de simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne avec réglage des puissances par régulateur de mode glissant	132
Figure.4.24.	Schéma fonctionnel de la conception de la commande par backstepping	136
Figure.4.25.	Résultats de simulation de la chaine de conversion d'énergie éolienne avec réglage des puissances par mode backstepping	137
Figure.4.26	Tests de robustesse pour les trois (3) régulateurs	138

Chapitre 5

Figure 5.1.	Caractéristiques générales de la qualité de l'énergie électrique	139
Figure.5.2.	Signal sinusoïdale avec creux de tension	141
Figure 5.3.	Influence de la qualité de l'énergie du réseau sur les parcs éoliens	142
Figure 5.4.	Influence de la qualité de l'énergie d'un parc éolien sur le réseau	143
Figure 5.5.	Système triphasé parfaitement équilibré	144
Figure 5.6.	a) Système triphasé asymétrique résultant d'amplitudes et d'angles	144

	inégales, b) Système triphasé asymétrique résultant d'amplitudes inégales	
Figure 5.7.	Codes réseau des exigences LVRT pour la production d'énergie éolienne	148
Figure 5.8.	Techniques LVRT pour le système DFIG	149
Figure 5.9.	Représentation schématique de la DFIG-WT fonctionnant avec un circuit DCCP	150
Figure 5.10.	Représentation schématique de la DFIG-WT fonctionnant avec un circuit de crowbar série stator	151
Figure 5.11.	Représentation schématique de la DFIG-WT fonctionnant avec un circuit de crowbar à terminal extérieur	151
Figure 5.12.	Représentation schématique de la GADA fonctionnant avec un circuit de crowbar rotor traditionnel	152
Figure 5.13.	Diagramme de la résistance de protection par crowbar	152
Figure 5.14.	Diagramme du SCEE avec GADA pour l'étude de la chute de tension à l'aide de Matlab/Simulink	154
Figure 5.15.	Contrôle de vitesse indirect.	155
Figure 5.16.	Contrôleur logique flou du crowbar	155
Figure.5.17.	Fonctions d'appartenance	156
Figure 5.18.	Schéma de contrôle vectoriel du convertisseur côté rotor avec compensation de la séquence négative en cas de creux de tension	157
Figure 5.19.	Schéma de commande du convertisseur côté réseau avec compensation de la séquence négative du courant statorique en cas de creux de tension	157
Figure 5.20.	Schéma illustrant l'approche de contrôle utilisée pour les creux de tension symétriques et asymétriques (type C)	158
Figure.5.21.	Résultats de la simulation du CCM en état sain	160
Figure.5.22.	Résultats de la simulation du CCR en état sain	162
Figure.5.23.	Résultats de simulation de l'analyse des défauts en état sain	162
Figure.5.24.	Résultats de simulation du CCM lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar	163
Figure.5.25.	Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar	165
Figure.5.26.	Résultats de la simulation de l'analyse de défaut lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar	166
Figure.5.27.	Résultats de simulation du CCM lors d'un creux de tension asymétrique sans protection Crowbar	168
Figure.5.28.	Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension asymétrique sans protection Crowbar	170
Figure.5.29.	Résultats de simulation de l'analyse de défaut lors d'un creux de tension asymétrique sans protection Crowbar	171

Figure.5.30.	Résultats de simulation du CCM lors d'un creux de tension asymétrique avec protection Crowbar	172
Figure.5.31.	Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension asymétrique avec protection Crowbar	174
Figure.5.32.	Résultats de simulation de l'analyse de défaut lors d'un creux de tension asymétrique avec protection Crowbar	175

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau.1.1.	Vitesses de vent utilisables par les éoliennes	5
Tableau.1.2.	Avantages et les inconvénients de EV	10
Tableau.1.3.	Avantages et les inconvénients des EH	12
Tableau.1.4.	Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé	13
Tableau.1.5.	Classification des éoliennes selon la puissance	13
Tableau.1.6.	Avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe	14
Tableau.1.7.	Avantages et les inconvénients des VSWT	15
Tableau.1.8.	Avantages et inconvénients de la GADA	20

Chapitre 3

Tableau.3.1.	Méthode usuelle de l'inférence floue	89
Tableau.3.2.	Matrice d'inférence	92

Chapitre 4

Tableau.4.1.	Comparaison des valeurs en régime permanent en utilisant les deux méthodes « Point de fonctionnement : 1800 tr/min »	116
--------------	--	-----

Chapitre 5

Tableau.5.1.	Classification des types de creux de tension asymétrique	145
Tableau.5.2.	Comparatif des techniques de protection LVRT	149
Tableau.5.3.	Résumé des modes conventionnels de fonctionnement des éoliennes à GADA en conditions normales et de défaut	150
Tableau.5.4.	Matrice d'inférence pour la commutation du Crowbar	155

Liste des abréviations

Abréviations Définitions

WECS	Wind Energy Conversion System
GWEC	Global Wind Energy Council
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
PNEREE	Programme National d'Energies Renouvelables et d'Efficacité Energétique
EV	Eolienne à axe vertical
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
EH	Eolienne à axe horizontal
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
FSWT	Fixed Speed Wind Turbine
VSWT	Variable Speed Wind Turbine
GSRB	Génératrice synchrone à rotor bobiné
GSAP	Génératrice synchrone à aimant permanent
GAS	Génératrice asynchrone
GI	Génératrices à induction
GASAS	Génératrice asynchrone à double stator
GADA	Génératrice asynchrone double alimentation
IGBT	Transistor Bipolaire à Portée Isolée
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MARB	Machine à Induction à Rotor Bobiné
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
CCM	Convertisseur Coté Machine
CCR	Convertisseur Coté Réseau
MPPT	Maximum Power Point Tracking
TSR	Tip Speed Ratio
RVP	Rapport de Vitesse de Pointe
OTC	Optimal Torque Control
CCO	Contrôle de couple optimal
FLC	Fuzzy Logic Controller
CMG	Commande par Mode Glissant
MG	Mode Glissant
SM	Sliding mode
MRP	Mode du régime permanent
RLF	Régulateur par Logique Floue
SCEE	Système de Conversion de l'Energie Eolienne
ARP	Analyse Régime Permanent
RP	régime permanent
FOC	Commande Vectorielle à Flux Oorientée (Field Oriented Control)
MCC	Machine à Courant Continu
CVD	Commande Cectorielle Directe
CVI	Commande Vectorielle Indirecte
PI	Proportionnel Intégral
CMG, SMC	Commande par mode glissant (Sliding Mode Controller)
CTR	Conditions Techniques de Raccordement

LVRT	Low Voltage Ride-Through
HVRT	High Voltage Ride-Through
FRT	Fault Ride-Through
DFIG	Doubly-Fed Induction Generator
PCC	Point de couplage commun
PLL	Phase Locked Loop

Liste des Symboles

Symboles	Définition
E_r	Fem créée au rotor
E_s	Fem créée au stator
N_r	Nombre de spires des bobinages rotorique
N_s	Nombre de spires des bobinages statorique
ω_s	Pulsation statorique de la MADA
ω_r	Pulsation rotorique de la MADA
ω_m	Vitesse angulaire de rotation de la MADA
P	Nombre de paires de pôles
f_s	Fréquence du stator
f_r	Fréquence du rotor
f_m	Fréquence du rotor
g	Glissement
V_v	Vitesse du vent
V_0	Valeur moyenne de la vitesse du vent
a_k	Amplitude de l'harmonique de l'ordre k
w_k	Pulsation de l'harmonique de l'ordre k
i	Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent
E_c	Energie cinétique du vent
p_w	Puissance du vent
ρ	Masse volumique de l'air
S	Surface circulaire balayée par la turbine
R	Longueur de la pale
P_{aer}	Puissance aérodynamique
C_p	Coefficient de puissance
C_{aer}	Couple aérodynamique
C_t	Coefficient du couple
λ	Vitesse relative
Ω_t	Vitesse de l'arbre
C_m	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice
Ω_m	Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice
Ω_t	Vitesse de la turbine
C_f	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice
C_{em}	Couple électromécanique
f_v	Coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice
J_t	Moment d'inertie de la turbine équivalent
J_g	Moment d'inertie de la génératrice
$[V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T$	Vecteurs des tensions statoriques
$[V_{ar} V_{br} V_{cr}]^T$	Vecteurs des tensions rotoriques

$[i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$	Vecteurs des courants statoriques
$[i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$	Vecteurs des courants et rotoriques
$[\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^T$	Vecteurs des flux statoriques
$[\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]^T$	Vecteurs des flux rotoriques
R_s	Résistance statorique
R_r	Résistance rotorique
L_s	Inductance propre statorique
M_s	Inductance mutuelle entre phases statoriques
L_r	Inductance propre rotorique
M_r	Inductance mutuelle entre phases rotoriques
i_{ds}, i_{qs}	Courant du stator
i_{dr}, i_{qr}	Courant du rotor
θ_s	Angle électrique du champ tournant statorique
θ_r	Angle électrique du champ tournant rotorique
M	Inductance mutuelle entre les barres du rotor et l'enroulement du stator
P_s	Puissance active au stator
P_r	Puissance active au rotor
V_{ds}, V_{qs}	Tension statorique orienté selon l'axe d et q
i_{ds}, i_{qs}	Courant statorique orienté selon l'axe d et q
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique orienté selon l'axe d et q
V_{dr}, V_{qr}	Tension rotorique orienté selon l'axe d et q
i_{dr}, i_{qr}	Courant rotorique orienté selon l'axe d et q
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique orienté selon l'axe d et q
σ	Coefficient de dispersion
S_1, S_2, S_3	Impulsions des commandes
V_{ref}	Tension de référence
U_p	Tension de la porteuse
r	Taux de modulation
f_p	Fréquence de la porteuse
f	Fréquence de la tension de référence
m	Indice de modulation
R	Résistance totale de la ligne
L	Inductance totale de la ligne
V_{an}, V_{bn} et V_{cn}	Tensions simples
C	Capacité
V_p, V_q	Composantes des tensions à l'entrée du convertisseur
V, V_q	Composantes des tensions du réseau
i, i_q	Composantes des courants du réseau
ω	Pulsation du réseau
Q_s	Puissance réactive du stator
Q_r	Puissance réactive du rotor

P_{mn}	Puissance nominale
V_{vn}	Vitesse de vent nominale
V_{vd}	Vitesse de démarrage
V_{vmax}	Vitesse maximale du vent
β	Angle de calage des pales
G	Gain du multiplicateur
ξ	Coefficient d'amortissement
ω_n	Pulsation propre
$k_{p\omega}, k_{i\omega}$	Gains du régulateur PI
t_r	Temps de réponse
$S(x, t)$	Surface de glissement
$[x]$	Vecteur d'état
$[U]$	Vecteur de commande
$e(x)$	Ecart entre la variable à régler et sa référence
u	Entrée du système (la commande)
y	Sortie du système
$h(x)$	Fonction analytique de x
$f(x), g(x)$	Champs de vecteurs supposés infiniment différentiables
ε	Nouveau vecteur d'état
Δ_{u_n}	Abscisse du centre de gravité
$\mu(x)$	Fonction d'appartenance
x	Variable dans l'univers de discours
e	Erreur
Δ_e	Dérivation de l'erreur
$x_e, x_{\Delta e}$	Normalisation de l'erreur et sa dérivation
Δ_u	Dérivation du contrôle
$G\Delta_u$	Gain associé à la commande u_{k+1}
$\Delta_{u_{k+1}}$	Dérivation de la commande u_{k+1}
$G_e, G_{\Delta e}$	Facteurs d'échelle (normalisation).
I_a	Courant d'induit
S_{ps}	Variable de glissement de la puissance active
V_{rq}^{eq}	Commande équivalente
S_{Qs}	Variable de glissement de la puissance réactive
ΔT	Variation du temps
ΔV	Variation de l'amplitude
V_{bus}	Tension du bus continue
$R_{r_crowbar}$	Résistance du crowbar du rotor
X_r^{sc}	Réactance transitoire du rotor
X_s^{sc}	Réactance transitoire du stator
V_r^{max}	Tension maximale autorisée du rotor
m	Profondeur de modulation ($0 \leq m \leq 1$)
V_{dc}^b	Valeur de base de la tension continue (dc)

V_r^b	Valeur de la tension du rotor
$sign, Sat, Smooth$	Fonctions du signe et de saturation
K, k_1, k_2, k_3	Constantes positives

Introduction Générale

La croissance de la consommation d'énergie électrique, l'épuisement progressif des ressources fossiles et les risques liés aux centrales nucléaires ont conduit de nombreux pays à se tourner vers des solutions énergétiques plus durables et respectueuses de l'environnement, notamment les énergies renouvelables. Ces dernières années, la production d'électricité à partir de ces sources a connu une hausse significative, favorisée par la libéralisation du marché de l'électricité et par une prise de conscience écologique croissante, en raison des changements climatiques et des engagements internationaux [1]. L'Algérie, bien que historiquement dépendante des ressources fossiles a pris un engagement fort en faveur du développement des énergies renouvelables et a mis en place des projets d'envergure dans ce domaine afin de diversifier ses sources d'énergie et réduire sa dépendance aux énergies fossiles [2]. En outre, elle a défini des objectifs ambitieux pour augmenter la part des énergies renouvelables dans son mix énergétique, avec des projets d'installation de grandes capacités éoliennes, particulièrement dans les régions du sud du pays où le potentiel éolien est élevé.

Les éoliennes à vitesse variable permettent selon leur principe la conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité grâce à des turbines éoliennes tout en maximisant la production et d'améliorer la qualité de l'énergie produite [3]. De plus, les générateurs les plus utilisés dans les grands systèmes éoliens modernes sont basés sur des génératrices asynchrones et asynchrones à double alimentation (GADA) car elles sont capables de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent. En plus, les avancées notables en microélectronique et l'électronique de puissance leur a permis une meilleure intégration dans les réseaux électriques. Cependant, l'intégration de cette énergie intermittente (énergie éolienne) peut provoquer des perturbations dans le réseau telles que les coupures ou les creux de tension, ce qui constitue un défi de taille pour de nombreux autres pays, y compris l'Algérie, qui doivent s'assurer de l'intégration fiable de cette source d'énergie variable. Par ailleurs, en cas de défaillance du réseau, les éoliennes se déconnectent souvent, ce qui affecte la stabilité de l'ensemble du système. Alors, pour garantir une intégration efficace et fiable, il est essentiel que les éoliennes puissent rester connectées au réseau, même en cas de perturbations de tension. Cela permettrait aux gestionnaires de réseau de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie et d'assurer une stabilité du réseau à long terme. L'Algérie, dans le cadre de ses objectifs en matière de transition énergétique, devra donc relever ce défi pour optimiser l'exploitation de son potentiel éolien et garantir une énergie stable et fiable pour ses besoins internes et ses objectifs d'exportation.

La GADA présente des avantages importants, notamment la réduction de la taille des convertisseurs de puissance pour une même production d'énergie, tout en assurant un rendement élevé. Elle est particulièrement vulnérable aux perturbations du réseau, lors de chutes de tension

soudaines car elles peuvent affecter son électronique de puissance. En outre et sont souvent accompagnées d'une sur vitesse de la turbine, ce qui dégrade son fonctionnement normal. Pour faire face à ces défis, de nombreuses recherches ont porté sur le développement de stratégies qui permet à la GADA de continuer à fonctionner pendant les défauts du réseau. Cependant, malgré les avancées, des problématiques restent à résoudre pour garantir une intégration fiable et sécurisée de la production éolienne dans les réseaux électriques, notamment lors des perturbations importantes [4].

Cette thèse vise à développer une approche intégrée pour optimiser la production d'énergie éolienne, en se concentrant particulièrement sur les systèmes utilisant des génératrices asynchrones à double alimentation. Deux grands axes sont abordés :

- **Commandes des systèmes éoliens** : il s'agit de sélectionner et optimiser la structure la plus performante pour la production d'énergie éolienne, basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation couplée à une turbine à calage variable des pales. Cette configuration permettra de contrôler efficacement la capture d'énergie sous différent profil de vitesses de vent. Les convertisseurs bidirectionnels à MLI, connectant la machine au réseau, seront utilisés pour améliorer la gestion de l'énergie et le facteur de puissance. Des techniques de commande avancées seront mises en œuvre pour maximiser le rendement et la qualité de la production d'énergie.
- **Stratégies de contrôle et protection** : c'est de garantir la stabilité du parc éolien, essentiellement, en cas de perturbations de tension. Il s'agira de concevoir des stratégies de contrôle robustes et des systèmes de protection, y compris l'utilisation de la résistance de crowbar, pour prévenir les défaillances des convertisseurs lors des défauts de tension. En parallèle, cette thèse abordera le diagnostic des défauts dans ces systèmes, afin d'identifier et traiter les défaillances potentielles pour assurer une production fiable et continue.

Le contenu de la thèse est structuré en cinq (5) chapitres détaillant chaque aspect du système éolien étudié :

Le premier chapitre présente des notions sur l'énergie éolienne : son historique, sa capacité installée dans le monde et en Algérie, ainsi que ses avantages et inconvénients. Une attention particulière est donnée aux différents types d'aérogénérateurs, avec une étude approfondie de l'aérogénérateur à axe horizontal, qui est l'objet de cette thèse. Ce chapitre se termine par une revue des méthodes de diagnostic et des défauts des systèmes éoliens.

Le deuxième chapitre aborde la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Il est divisé en plusieurs parties : la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et de l'évolution du vent, la modélisation de la GADA, et celle des convertisseurs côté réseau et côté

machine. Des stratégies de commande pour la turbine et l'onduleur côté réseau sont également présentées, suivies des résultats de simulation pour valider les modèles.

Le troisième chapitre est dédié aux stratégies de commande de suivi du point de puissance maximum, en anglais Maximum Power Point Tracking (MPPT) pour extraire la puissance maximale. Différentes techniques de commande sont explorées, dont la commande par régulateur PI, ainsi que des commandes robustes (mode glissant, backstepping) et intelligentes (commande floue). Les performances de ces stratégies sont comparées à travers des simulations numériques.

Le quatrième chapitre traite l'optimiser des performances du générateur et le contrôle indépendant des puissances active et réactive générées par la GADA. Des méthodes de commande vectorielle, mode glissant et backstepping sont considérées pour améliorer l'efficacité et la stabilité du système. Les résultats de simulation sont présentés et analysés.

Le cinquième chapitre présente les conséquences des creux de tension, et les stratégies de contrôle et les méthodes active et passive de protection proposées pour garantir que les éoliennes restent connectées au réseau même lors de perturbations sévères.

Toutes les simulations ont été réalisées avec les outils MatLab et Simulink pour valider les différentes stratégies et modélisations proposées.

La thèse se conclut par une récapitulation des résultats obtenus, accompagnée de perspectives pour de futures recherches dans ce domaine.

Chapitre 1

Généralités sur l'énergie éolienne

1.1. Introduction

L'énergie éolienne est parmi les énergies renouvelables qui connaissent une croissance très rapide dans le monde. Elle est universellement reconnue comme une source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen terme, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement.

Ce chapitre a pour objectifs de présenter d'abord un état de l'art sur les systèmes de conversion éolienne de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies et enfin l'évolution de son exploitation dans le monde et en Algérie, ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Une description des différents aérogénérateurs et un aperçu détaillé de l'aérogénérateur à axe horizontal seront également présentés.

Présenter les différents types de machines électriques utilisées dans les éoliennes tout en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients. La machine asynchrone à double alimentation qui est choisie comme générateur dans le système éolien fera l'objet de cette étude. La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à l'état de l'art sur le diagnostic et les défauts du système éolien, ainsi qu'un aperçu sur la terminologie dédiée au diagnostic, puis nous allons mettre en évidence les défauts des composants critiques des éoliennes.

1.2. Énergie éolienne

1.2.1. Définition de l'énergie éolienne

La chaleur de l'astre solaire engendre une dynamique fascinante au sein de notre atmosphère, provoquant le déplacement incessant des masses d'air [5]. Ce phénomène, résultant des variations de la température à la surface de la Terre cause des gradients de pression qui déclenchent des mouvements aériens [6]. L'énergie éolienne, pour sa part, est reconnue comme l'une des ressources les plus prometteuses et dynamiques dans le paysage des énergies renouvelables. Elle est considérée comme l'une des filières énergétiques les plus efficaces et plus dynamique dans la génération d'énergies renouvelables dans le monde [7]. Une éolienne, est appelée plus communément un aérogénérateur. Il s'agit d'un système 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. Ce système est connu sous l'appellation anglaise « Wind Energy Conversion System (WECS) ». L'énergie éolienne est une énergie renouvelable respectueuse de l'environnement dans son développement et son exploitation, c'est-à-dire non dégradée et de plus, c'est une énergie verte qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif [8]. Historiquement, l'énergie éolienne sous forme de moulins à vent a été utilisée pendant des siècles pour des tâches telles que la mouture du grain et le pompage de l'eau [9].

1.2.2. Propriétés du vent

Les vents sont généralement appliqués aux déplacements horizontaux naturels de l'atmosphère, également connu sous le nom de mouvement aérien. Or, ceux, qui peuvent varier en intensité et en direction, sont produits par les variations de la pression atmosphérique, et sont provoquées surtout par les divers gradients de température que l'on trouve dans notre environnement [10]. À cause de la masse de l'air ainsi que de la vitesse du vent, une forme d'énergie cinétique, se manifeste et elle peut être exploitée de plusieurs manières. Le tableau 1.1 présente une classification grossière et concise sur les types des vents et leurs puissances.

Tableau.1.1. Vitesses des vents utilisables par les éoliennes

Vent léger, brise	3 m/s	16 KW/m ²
Vent modéré	7 m/s	0.2 KW/m ²
Vent fort	12 m/s	1.0 KW/m ²
Tempête	18 m/s	3.5 KW/m ²
Ouragan	>32 m/s	>20 KW/m ²

Remarque : les vitesses de vent qui sont considérées comme utilisables par les éoliennes se situent entre 7m/s et 15m/s, ce qui permet d'optimiser leur performance et leur efficacité.

1.3.Capacité éolienne installée

1.3.1. Situation de l'énergie éolienne dans le monde

L'exploitation de l'énergie éolienne a connu, au cours de ces trois dernières décennies, un essor remarquable et sans précédent, particulièrement en raison des premiers chocs pétroliers qui ont profondément impacté le marché mondial de l'énergie [11]. Cette source d'énergie renouvelable, a bénéficié d'une dynamique exceptionnelle parmi les nombreuses technologies de production d'électricité développées, devenant une ressource fondamentale, voire essentielle, au sein de notre société moderne [11]. D'après des sources très respectées et spécialisées dans le domaine de l'énergie éolienne, telles que le GWEC "Global Wind Energy Council", les systèmes de conversion d'énergie éolienne ont gagné en popularité sur divers marchés industriels au cours des dernières années et continuent d'attirer de plus en plus d'attention [12]. En effet, les taux de pénétration de ces systèmes augmentent considérablement à l'échelle mondiale, ce qui témoigne de l'intérêt croissant pour cette forme d'énergie. Les investisseurs, internes et externes, manifestent un intérêt accru pour ces systèmes qu'ils considèrent à juste titre comme l'une des sources d'énergie les plus prometteuses pour l'avenir [13]. La figure 1.1. présente les statistiques de la capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2013 à 2023. On constate que la capacité cumulée de la puissance éolienne installée à l'échelle mondiale est d'environ 1,021 GW en 2023 [14], ce qui couvre près de 15 % de la demande mondiale d'électricité.

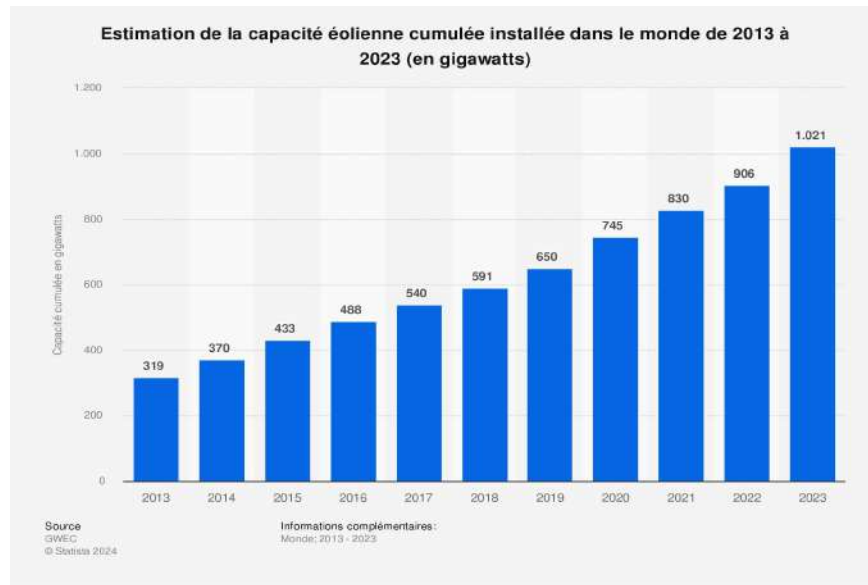


Figure.1.1. Estimation de la capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2013 à 2023(en Gigawatts) [14]

Bien que l'Algérie ne soit pas classée avec les 10 premiers dans l'utilisation de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale, son programme n'exclut cependant pas l'éolien. Ce dernier constitue l'un des axes principaux de développement énergétique du pays, juste après l'énergie solaire [21]. D'ailleurs, il est prévu que la part de l'énergie éolienne dans le mix énergétique national devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030, ce qui représente une avancée notable pour diversifier les sources d'énergie.

1.3.2. Gisement éolien en Algérie

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est aujourd'hui reconnu comme étant le plus important d'Afrique du Nord [15]. En effet, la toute première éolienne qui a été installée en Algérie remonte à une période historique marquée par la colonisation française, en 1953, par l'intermédiaire de "le Service de la Colonisation et de l'Hydraulique", une entité relevant du contrôle militaire qui régnait alors sur les territoires du sud algérien [16]. À l'époque, l'énergie éolienne en Algérie n'était exploitée que pour un usage très spécifique, principalement le pompage de l'eau. La première expérience concrète de cette énergie renouvelable a été effectuée dans la région d'Adrar, en 1957, à ksar Sidi-Aïssa, où elle a été mise en œuvre pour irriguer 50 hectares de terres agricoles, répondant ainsi à un besoin agricole crucial [17]. Présentement, cette technologie existe encore à l'intérieur même de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) d'Adrar, permettant ainsi de poursuivre les recherches et l'exploitation des énergies renouvelables [18]. Cette installation se compose d'un mât de 24 mètres de hauteur, surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 mètres, illustrant le potentiel d'expansion de cette ressource énergétique. Le gisement éolien en Algérie se révèle être particulièrement

diversifié, car il varie d'une zone à une autre en fonction de différents critères, notamment la situation géographique et les spécificités climatiques [19]. La carte du vent de l'Algérie présente une estimation de la variation des vitesses annuelles moyennes de 2 à 6,5 m/s, comme le montre la figure 1.2 et souligne l'importance de la compréhension des ressources éoliennes pour l'avenir énergétique du pays. Selon la cartographie représentée, il est évident que le potentiel éolien varie significativement d'une région à l'autre en Algérie : la région côtière, à l'exception des zones de Bejai, Oran, Tassili et de Beni Abbés, affiche une vitesse de vent moyenne dépassant les 3 m/s. Dans la partie centrale de l'Algérie, on observe des vitesses de vent qui vont de 3 à 4 m/s, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour le développement de l'énergie éolienne. En revanche, la région d'Adrar se distingue en affichant une valeur moyenne de 6.5 m/s, ce qui est particulièrement prometteur pour l'exploitation éolienne. Par ailleurs, il existe de nombreux microclimats localisés où la vitesse du vent dépasse les 5 m/s, notamment dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran. Bien que le potentiel éolien général soit considéré comme relativement faible, le programme national n'élimine pas l'énergie éolienne, qui se positionne comme le second axe de développement des énergies renouvelables, représentant environ 3% (soit 1,7 GW) de la production d'électricité d'ici 2030. Ainsi, il est incontestable que l'énergie éolienne représente un axe de développement prometteur pour les énergies renouvelables en Algérie, après l'énergie solaire, qui demeure la principale priorité [20]. En 2011, afin de structurer et de dynamiser ces efforts, le ministère de l'énergie a initié le « programme national d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique » (PNEREE). Ce vaste plan ambitieux comprend deux (2) phases d'une capacité totale de 22GW d'énergies renouvelables d'ici 2030, avec des perspectives de réalisation très encourageantes pour produire de l'électricité pour le marché national [20,21].

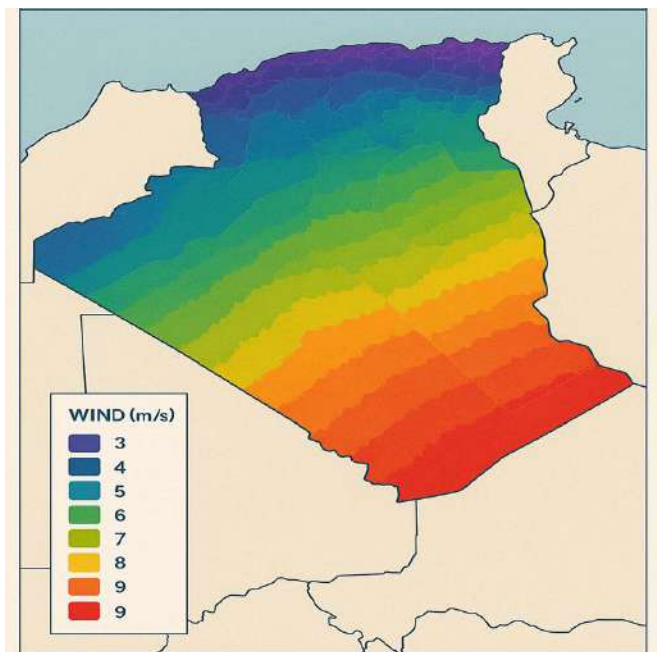


Figure.1.2. Atlas de la vitesse du vent de l'Algérie

1.4. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie ce qui lui donne un rôle important dans l'avenir. Cette source d'énergie présente également quelques points faibles qui nécessitent des études et recherches pour sa valorisation.

1.4.1. Avantages

L'énergie éolienne est connue par ses nombreux avantages, tels que [22] :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles, c'est-à-dire n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs. Le vent est une source d'énergie renouvelable fiable et infinie ;
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable. C'est une énergie respectueuse de l'environnement ce qui offre aux générations futures la possibilité d'en bénéficier ;
- C'est une énergie moins coûteuse par rapport aux autres énergies renouvelables ;
- Sa conception est simple, les parcs éoliens sont très faciles à démonter, ne laissent aucune trace, robuste et nécessite peu d'entretien ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement et rapidement l'arrêter, contrairement aux autres procédés thermiques ou nucléaires ;
- La durée de vie des éoliennes modernes peut aller jusqu'à 25 ans, ce qui est comparable aux autres centrales de production conventionnelles ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont besoin ces pays pour se développer ;
- Disponible : c'est une énergie qui existe partout et de favorise l'indépendance énergétique.
- La période de forte productivité est en hiver (vents plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus élevée.

1.4.2. Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages [22] :

- Le bruit des pales (nuisances sonores).
- Le couplage des éoliennes dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux afin de satisfaire les conditions de couplage et de ne pas dégrader la qualité de tension sur les réseaux ;
- Les éoliennes présentent des risques d'accidents lors des fortes vitesses du vent qui peuvent rompre les structures du système ;
- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux ;
- Les éoliennes génèrent des bruits mécaniques (multiplicateurs) et aérodynamiques (vitesse de rotation du rotor) ;

- Les pales des éoliennes représentent un danger pour les oiseaux de la région ;
- C'est une énergie qui ne peut pas être stockée, mais qui doit être consommée dès qu'elle est produite. Cela signifie qu'elle ne peut pas offrir une alternative complète à l'utilisation d'autres types d'énergie.

1.5. Applications des systèmes éoliens

On distingue trois (3) applications distinctes des systèmes éoliens [23] :

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

1.5.1. Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides se caractérisent par la présence simultanée de plusieurs sources d'énergie, telles que les turbines éoliennes, les génératrices Diesel, et les modules photovoltaïques, entre autres. Cependant l'utilisation de plusieurs simultanément augmente la complexité du système et exige un usage optimisé et un contrôle efficace pour extraire le maximum d'énergie de chacune des sources.

1.5.2. Systèmes isolés

Ces systèmes sont souvent conçus pour satisfaire les besoins des utilisateurs se trouvant dans des lieux difficilement accessibles ou dépourvus de connexion à un réseau électrique, tels que des villages éloignés, des refuges perchés en montagne, des îles isolées, etc. En règle générale, ces systèmes indépendants intègrent diverses méthodes de stockage d'énergie qui peut être réalisé grâce à des batteries, dotées de dispositif spécifique pour réguler leur charge et décharge.

1.5.3. Systèmes reliés au réseau

Ces systèmes sont généralement employés en raison des leurs nombreux avantages. Alors, environ 95 % de la capacité mondiale en énergie éolienne est reliée à de vastes réseaux de puissance car cette configuration facilite le contrôle des éoliennes pour atteindre une puissance optimale et aussi compense la fluctuation de la production d'énergie éolienne grâce à l'électricité fournie par les centrales conventionnelles également intégrées au même réseau. Toutefois, le raccordement des éoliennes au réseau électrique nécessite d'harmoniser la fréquence et la tension avec celles du réseau, indépendamment des variations de la vitesse du vent. Cela peut se réaliser en maintenant une vitesse de rotation constante de la génératrice via l'orientation des pales, ou par l'intégration de convertisseurs statiques tels que des onduleurs et des redresseurs. En général, les éoliennes connectées au réseau sont regroupées au sein de parcs éoliens composés d'environ 5 à 50 machines. Il existe également des éoliennes isolées qui sont reliées à ce réseau.

1.6. Classification des éoliennes

La classification des éoliennes, peut se faire selon différents critères, à savoir : la disposition géométrique de l'axe de rotation, le régime de fonctionnement, la localisation géographique, la taille de l'éolienne, le mode de régulation de la vitesse du rotor et le secteur d'utilisation [24].

1.6.1. Selon la disposition géométrique de l'axe de rotation

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal.

1.6.1.1. Éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (EV), en anglais : Vertical Axis Wind Turbine (VAWT); ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Selon leur caractéristique aérodynamique, ces éoliennes peuvent être classées en trois grandes familles [25] :

- **Rotor de Savonius** (du nom de son inventeur, breveté en 1925) : le fonctionnement de ces dispositifs repose sur le principe de la traînée différentielle. Dans ce cas le couple moteur entraînant la génératrice est obtenu par les efforts d'intensité différente, exercés par le vent sur chacune des faces concaves et convexes de la structure. Le rotor de Savonius nécessite un grand couple de démarrage.
- **Rotor de Darrieus** (du nom de son savon George Darrieus en 1931) : Elles ressemblent dans leur structure à un fouet à œufs vu la forme en 'C' de leurs pales. Le fonctionnement de ce type d'aérogénérateurs repose sur la génération d'un couple moteur entraînant la rotation du dispositif, suite à des forces de direction et d'intensité variables, exercées sur le profil placé dans la direction d'écoulement d'air. Dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, ceci ne pose pas de problème, car la machine peut être utilisée comme un moteur qui absorbe du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.
- **Rotor de Musgrove** (connu sous l'appellation de rotor en "H-type ") : Cette appellation est expliquée par la forme en 'H' des lames ou des pales de l'éolienne. Ce type d'aérogénérateur est capable de démarrer seul et commence à produire de l'énergie lorsque le vent souffle à une faible vitesse de l'ordre de 1 [m/s]. Il ne nécessite pas de régulation mécanique et résiste à des vents violents.

Le tableau (1.2) ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des EV :

Tableau.1.2. Avantages et les inconvénients de EV

Avantages	Inconvénients
Faible bruit du système puisqu'elles tournent à faible vitesse.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort.

La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Ceci ne constitue cependant qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.
Absence d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.	Faible rendement et variations importantes de la puissance produite.

1.6.1.2. Éolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (EH), en anglais Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), à trois pales sont actuellement les plus utilisées en raison de leur bon rendement. Elles consistent en plusieurs lames profilées. Un éolien monopole coûte moins cher grâce à l'utilisation réduite de matériaux, mais présente des pertes aérodynamiques à cause de la nécessité d'un contrepoids. Les EH, avec une hélice perpendiculaire au vent, montées sur un mât, sont maintenant privilégiées par rapport aux EV grâce à leur coût inférieur, leur résistance au stress mécanique et leur position élevée qui améliore l'efficacité. Les HAWT peuvent être classifiés selon l'orientation des pales face au vent en deux types [25] :

○ Éoliennes lentes

Les éoliennes à circulation lente possèdent entre 20 et 40 pales, atteignant rapidement un coefficient de puissance maximal avec l'augmentation de la vitesse, puis celui-ci diminue. Elles sont idéales pour des vitesses de vent faibles, démarrant à 2-3 m/s avec des couples de départ élevés. Cependant, leur efficacité est inférieure à celle des éoliennes rapides et elles sont souvent utilisées pour le pompage de l'eau.

○ Éoliennes rapides

Les éoliennes rapides comptent généralement de 2 à 4 pales et sont largement utilisées pour leur efficacité. Elles se classifient en deux types selon leur aérodynamisme : « hélice au vent » où l'hélice est en amont de la machine et « hélice sous le vent » où l'hélice est en aval.

➤ En « amont » (up-wind) : ce type est caractérisé par un rotor positionné face au vent ; le flux d'air frappe directement sur les pales ;

➤ En « aval » (down-wind) : ce type, le vent souffle derrière le rotor, donc le vent atteint les pales après avoir balayé la nacelle. Ceci entraîne une usure prématurée du matériel par les phénomènes vibratoires ou de fatigue mécanique.

En conclusion, la majorité des éoliennes actuellement installées sont à axe horizontal avec le rotor en amont.

Le tableau 1.3 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des EH :

Tableau.1.3. Avantages et les inconvénients des EH

Avantages	Inconvénients
Elles sont efficaces et possèdent un bon rendement.	L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
Possibilité du contrôle de la vitesse pour avoir le maximum de la puissance générée.	La nécessité d'un système d'orientation des pales.
Cette structure capte le vent plus haut, donc plus fort et plus régulier que près du sol.	Coût de construction très élevé.
Le générateur et les dispositifs de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'ajouter un dispositif auxiliaire de démarrage.	

1.6.2. Selon le régime de fonctionnement

Selon le critère du régime de fonctionnement, les éoliennes peuvent être classées en deux grandes familles : les systèmes éoliens isolés ou autonomes « Off-grid » et les systèmes éoliens connectés au réseau « On-grid » [26].

1.6.2.1. Systèmes éoliens isolés : permet d'alimenter un site isolé non raccordé au réseau électrique en utilisant des batteries pour stocker le surplus d'électricité générée. Cette énergie est sollicitée lorsque le vent est insuffisant pour répondre directement à la demande des consommateurs.

1.6.2.2. Systèmes éoliens connectés au réseau : ces systèmes dominent le marché éolien. La turbine éolienne est dotée d'un transformateur qui augmente la tension de 400 ou 690 V à 20 kV. L'électricité produite est transportée par un câble enterré vers un poste de transformation pour être intégrée au réseau et envoyée aux consommateurs.

1.6.3. Selon la localisation

Selon la localisation, les éoliennes peuvent être classées en trois grandes catégories : Les éoliennes terrestres « Onshore », en pleine mer « Offshore » et les éoliennes volantes « Farshore ». Les éolienne terrestres 'Onshore' et les éoliennes en mer 'Offshore', ont le même aspect et le même principe de fonctionnement, mais se différencient par la nature des fondations [27].

1.6.3.1. Éoliennes terrestres « Onshore »

Installée sur la terre ferme.

1.6.3.2. Éoliennes en pleine mer « Offshore »

Elle est soit enfoncée et ancrée au fond de la mer sur une fondation dite 'posée', soit montée sur une fondation simplement reliée aux fonds marins par des lignes d'ancrage. Cette fondation est dite 'flottante.' La technologie de l'éolien offshore peut produire jusqu'à deux (2) fois plus d'électricité qu'une éolienne terrestre, car le vent au large des côtes est plus fort. Cependant, les mâts des aérogénérateurs en mer doivent résister aux vagues et au courant. Il est

donc important de penser à leur protection contre la corrosion et au raccordement électrique par des câbles sous-marins, ce qui entraîne des coûts de construction, d'installation et de maintenance plus élevés en mer qu'à terre.

1.6.3.3. Éoliennes volantes « Farshore »

L'éolienne volante produit de l'électricité loin des côtes, où les vents sont plus forts et l'eau plus profonde. Sa facilité d'installation, sans fondation ni navires comme pour l'éolien posé, est un atout majeur. La technologie d'éolien « farshore » est encore à ses débuts, avec des pilotes en place.

1.6.4. Selon la taille de l'éolienne

En théorie, aucune relation directe n'existe entre la hauteur et la puissance d'une éolienne. La puissance générée dépend de la surface balayée par le rotor, liée au diamètre de l'hélice. Le tableau 1.4 présente les tailles des éoliennes et les puissances associées. Il est important de noter que ce sont des ordres de grandeur, car c'est la vitesse du vent qui détermine la puissance délivrée [28].

Tableau.1.4. Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé

Dénomination	Aire balayée [m ²]	Diamètre du rotor [m]	Puissance [kW]
Domestique	7-79	3-10	15
Micro	0.2-1.2	0.5-1.25	0.25
Mini	1.2-1.7	1.25-3	1.5
Grande commerciale	1963-7854	50-100	3000
Petite commerciale	79-314	10-20	100
Moyenne commerciale	314-1963	20-50	1000

1.6.5. Selon leur puissance nominale

Les éoliennes sont classées selon leur puissance nominale en trois catégories. Le tableau 1.5 propose une classification selon la puissance qu'elles délivrent [29].

Tableau 1.5. Classification des éoliennes selon la puissance délivrée

Echelle	Puissance délivrée
Petite	Moins de 40 kW
Moyenne	40 kW à 1 MW
Grande	1 MW

1.6.6. Selon le mode de régulation de la vitesse du rotor

Selon la vitesse de rotation du générateur, on classe les éoliennes en deux (2) types : les éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable [30].

1.6.6.1. Éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe en anglais Fixed Speed Wind Turbine (FSWT), sont les conceptions les plus classiques. Elles se caractérisent par le fait que le rotor de l'éolienne tourne toujours à la même vitesse angulaire quel que soit la vitesse du vent, la vitesse angulaire dépend essentiellement du profil des pales et de la fréquence du réseau dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau électrique. Pour les éoliennes à vitesse fixe, la puissance mécanique peut être limitée selon deux (2) méthodes : par décrochage aérodynamique (Stall), par un système d'orientation de pales :

- Les éoliennes à décrochage aérodynamique (Stall) : produisent une puissance variable, atteignant généralement la puissance nominale. En dessous de cette limite, la puissance croît avec la vitesse du vent. Le décrochage a introduit progressivement grâce à un dispositif déviant les pales contre le vent. Pour les grandes machines, un système « Stall actif » permet ce décrochage en inclinant les pales. Ce dispositif est avantageux en coût et simplicité, car nécessite peu d'orientation des pales.

- Les éoliennes à pales orientables utilisent un système d'orientation des pales qui permet par une modification aérodynamique de maintenir la puissance constante de la machine en fonction de la vitesse du vent. Le tableau 1.6 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe :

Tableau.1.6. Avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe

Avantages	Inconvénients
Un faible coût.	La perte du contrôle de la puissance réactive et l'absence de contrôle du système de magnétisation de la génératrice.
La simplicité d'implantation.	Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
Une grande fiabilité.	Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.
L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.	Variations brusques et rapides du courant injecté dans le réseau, dues aux variations du couple à cause du mouvement des pales pour maintenir une vitesse de rotation constante.

1.6.6.2. Éolienne à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable en anglais Variable Speed Wind Turbine (VSWT) sont actuellement, les plus courantes. Les éoliennes à vitesse variable permettent d'améliorer l'efficacité de la conversion énergétique en adaptant la vitesse de la turbine à la vitesse du vent. Ces systèmes à vitesse variable sont des conceptions récentes développés grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, elles permettent à la fois de récupérer plus d'énergie, de réduire les coûts du système mécanique, de réduire le bruit et d'améliorer la qualité de l'énergie produite. Le tableau 1.7 résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse variable :

Tableau.1.7. Avantages et inconvénients des VSWT

Avantages	Inconvénients
Rentables et offrent un contrôle simple de l'angle de calage.	Une perte d'énergie pendant le processus de conversion.
Améliorent la qualité de l'énergie ; Les pulsations de couple peuvent être réduites grâce à l'élasticité du système d'éolienne. Ceci élimine les variations de puissance électrique, c'est-à-dire moins de scintillement	Un raccordement indirect du système au réseau et son coût.
Réduisent les bruits acoustiques.	Une grande complexité du système de puissance.
Permet une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.	Maintenance périodique de la boîte de vitesse et le contact glissant pour les bagues-balais (les turbine à base MADA).
Nécessite un système d'orientation des pales simplifié.	Contrôle-Commande plus complexe, avec un prix élevé des convertisseurs de puissance.
Contrôle de puissances active et réactive transmis au réseau.	
Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses du vent.	
Simplicité de contrôle de la vitesse de la génératrice grâce au système d'orientation des pales.	
Le système d'orientation des pales et le convertisseur de puissance contrôlent l'énergie mécanique acquise et le couple électromagnétique de la génératrice respectivement permettant ainsi de contrôler la puissance générée.	

1.6.7. Selon le secteur d'utilisation

Dans cette catégorie, On distingue deux (2) typologies d'installations [31] :

- **Domestiques** : pour les petites éoliennes installées chez les particuliers pour le pompage ou l'électrification.

- **Industrielles** : lorsqu'on parle des grands parcs éoliens ou aussi « fermes éoliennes », raccordés au réseau électrique.

1.7. Génératrices électriques

De nombreux types de machines sont utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe ou variable. Dans ce qui suit, les générateurs électriques utilisés dans les éoliennes sont présentés ci-dessous.

1.7.1. Génératrices synchrones

Les génératrices synchrones sont largement utilisées dans de différentes centrales de conversion d'énergie éolienne et de production, surtout dans les grandes éoliennes qui ne nécessitent pas de multiplicateur. Ces dernières ont plusieurs avantages, à savoir : un bon rendement, un couple massique important à dimensions convenables, comme ils ne demandent pas d'énergie réactive pour la magnétisation du rotor qui est assuré directement par un aimant permanent ou par un enroulement d'excitation. Il existe plusieurs types de génératrices synchrones dans l'énergie éolienne : la génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB) et la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP).

1.7.1.1. Génératrice synchrone à rotor bobiné

La (GSRB) à rotor bobiné possède un grand nombre de pôles et fonctionne à faible vitesse. Son circuit d'excitation, nécessaire, diminue son efficacité et augmente les coûts de fabrication et d'exploitation, compliquant aussi sa modélisation. Deux types de circuits d'excitation sont utilisés : le circuit d'excitation avec convertisseurs statiques (convertisseur d'addition) et le circuit d'excitation de la machine synchrone inversée (élimine les bagues/brosses). Des variations des couples électromagnétiques dans un système éolien peuvent démagnétiser les aimants, réduisant leur longévité en raison de leur matériau rare et coûteux à extraire. Pour limiter cet inconvénient, certains fabricants proposent des éoliennes avec des machines synchrones à rotor bobiné, où le champ tournant est alimenté par un enroulement de courant continu, à l'aide d'un redresseur. Ce système requiert un contact glissant ou une configuration "Brushless" avec un redresseur tournant. La figure 1.3 présente la GSRB connectée au réseau [32].

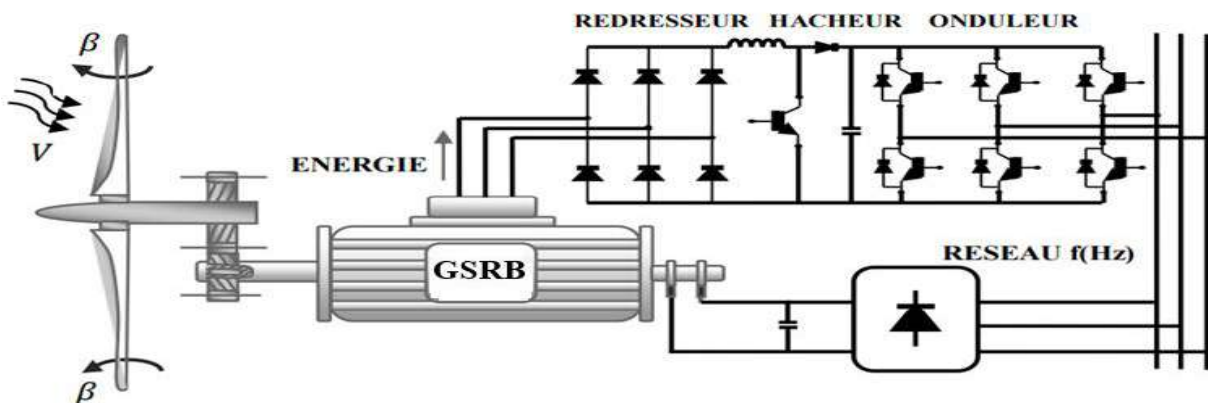


Figure.1.3. GSRB connecté au réseau

1.7.1.2. Génératrice synchrone à aimant permanent

Ce type de génératrice se caractérise par l'utilisation d'un rotor multipôles équipé d'un aimant permanent, ce qui confère un avantage notable, à savoir un couple massique élevé et l'élimination de la nécessité d'une boîte de vitesse, permettant ainsi de minimiser les pertes mécaniques. Toutefois, les GSAP présentent également un inconvénient significatif : les variations des propriétés magnétiques du rotor ainsi que le coût onéreux des aimants [33]. La figure 1.4 illustre la GSAP reliée au réseau électrique.

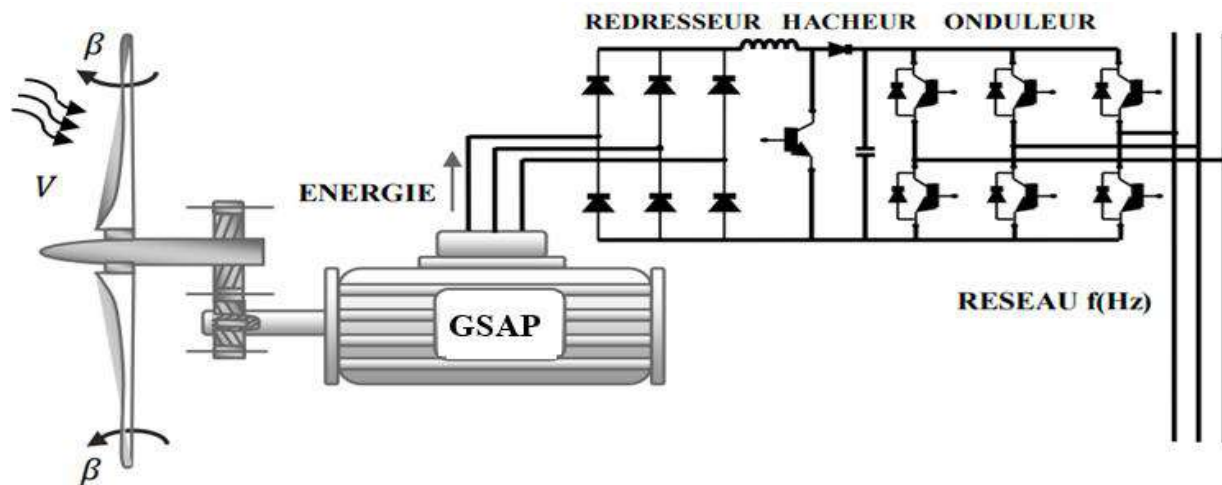


Figure.1.4. GSAP reliée au réseau électrique

1.7.2. Génératrices Asynchrones

Les génératrices asynchrones (GAS), ou génératrices à asynchrone (GI), sont couramment utilisées dans la production d'énergie éolienne. Elles permettent un fonctionnement à vitesse variable tout en respectant les exigences de fréquence et de tension. Ce type de génératrice est populaire dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance grâce à sa robustesse, sa simplicité, son coût réduit, sa faible maintenance et sa capacité à se synchroniser facilement avec le réseau. Plusieurs types de génératrices asynchrones existent : la génératrice asynchrone à cage, la génératrice asynchrone à double stator, la génératrice asynchrone double alimentée à rotor bobiné et la génératrice asynchrone double alimentée sans collecteur.

1.7.2.1. Génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Les génératrices asynchrones à cage, couramment désignées sous le terme de génératrices à asynchrone, tirent leur appellation de la configuration particulière de leur rotor, qui prend la forme d'une cage d'écureuil. Ces génératrices sont utilisées de manière prédominante dans les aérogénérateurs et se distinguent par leur capacité de réversibilité, leur robustesse et leur coût de construction relativement faible. Ce dernier avantage est notamment dû à l'absence de système de contact glissant, ce qui implique un entretien minimal. De plus, leur intégration au réseau électrique est facilitée. La figure 1.5 illustre la configuration de la génératrice GAS en liaison avec le réseau [33].

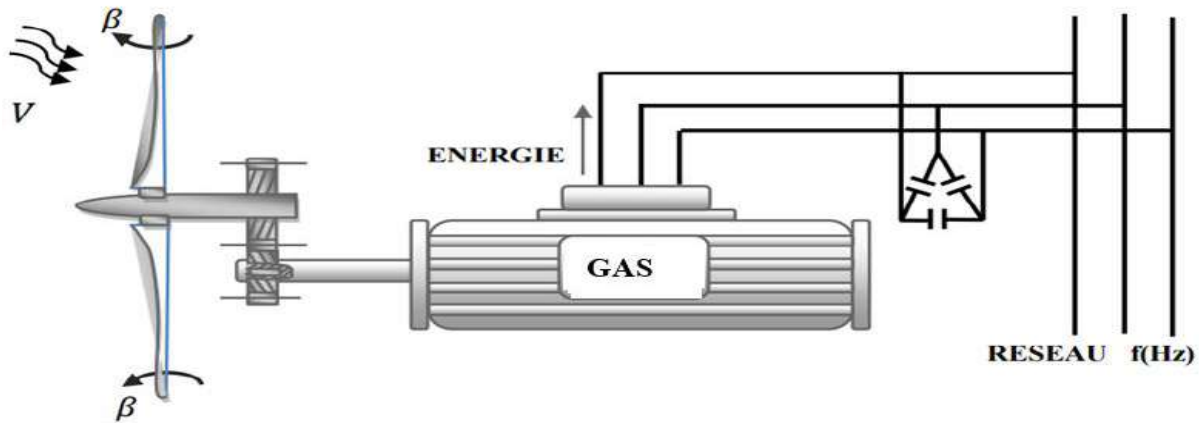


Figure.1.5. Configuration de la GAS en liaison avec le réseau

1.7.2.2. Génératrice asynchrone à double stator

Pour garantir le fonctionnement à deux (2) vitesses fixes distinctes et améliorer l'efficacité de la machine décrite dans le paragraphe précédemment, certains fabricants adoptent un système reposant sur des génératrices asynchrones à double stator (GASAS). L'une des génératrices est conçue pour les faibles puissances, intégrant un grand nombre de paires de pôles, ce qui favorise le fonctionnement aux les petites vitesses du vent. En revanche, l'autre génératrice est destinée aux fortes puissances, avec un faible nombre de paires de pôles adaptées aux grandes vitesses du vent. L'intégration d'un second stator confère à la génératrice une configuration spécifique, entraînant une augmentation non négligeable des coûts et du diamètre, ce qui se traduit par un accroissement du poids et des dimensions globales de l'appareil. Du fait des caractéristiques de fonctionnement, le bruit généré par l'éolienne est réduit lors des faibles vitesses de vent, car l'angle de calage requis pour orienter les pales prend des valeurs moins élevées [34]. La figure 1.6 illustre la génératrice à double stator connectée au réseau.

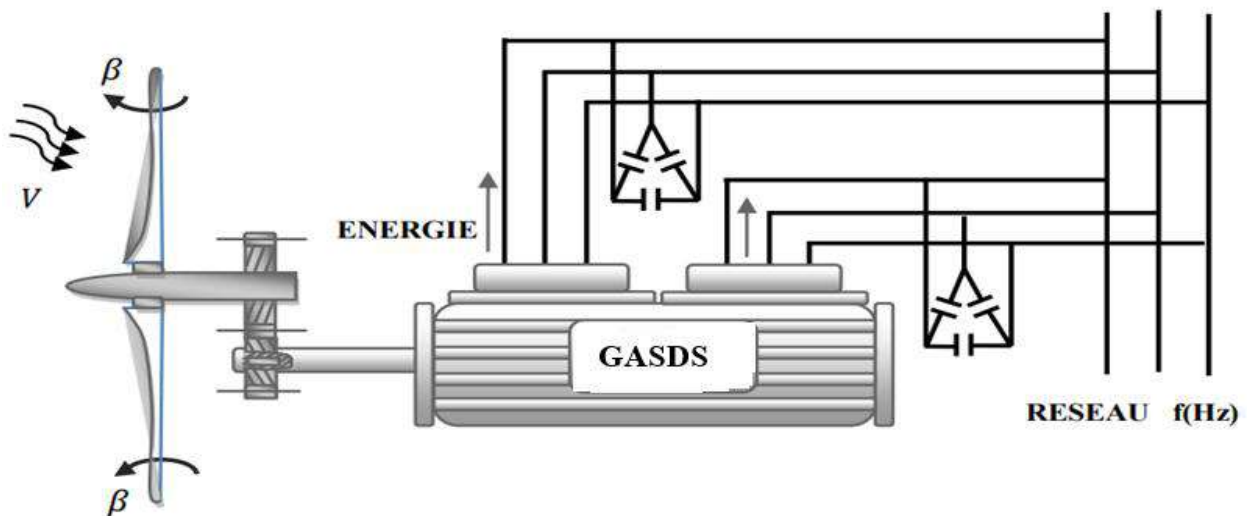


Figure.1.6. GASAS connectée au réseau

1.7.2.3. Génératrice asynchrone à double alimentation « Brushless »

Cette génératrice se distingue par sa capacité à fonctionner à vitesse variable, intégrant deux enroulements aux nombres de paires de pôles distincts, tous deux installés au sein de la même armature du stator. Le premier enroulement est directement relié au réseau destiné aux applications nécessitant de grandes puissances. En revanche, le second enroulement, dont la section des conducteurs est moins volumineuse, a pour fonction de moduler le courant d'excitation de la machine grâce à un convertisseur bidirectionnel et contrôlé. Le rotor de cet équipement présente une conception différente de celle d'une machine à cage d'écureuil classique, tout en conservant une robustesse comparable. Il est constitué de multiples boucles conductrices concentriques, disposées de manière à posséder un nombre de paires de pôles correspondant à la somme des nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques [35]. La figure 1.7 illustre cette génératrice asynchrone à double alimentation « Brushless » connectée au réseau.

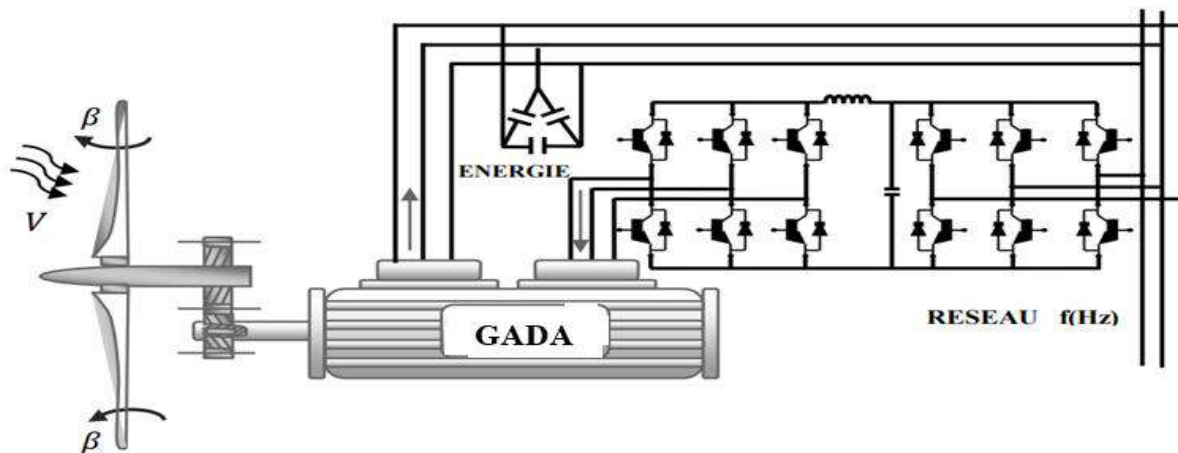


Figure.1.7. GADA « Brushless » connectée au réseau

1.7.2.4. Génératrice asynchrone à double alimentation

Les génératrices asynchrones à double alimentation (GADA), également désignées sous le terme de génératrices à rotor bobiné, connaissent une expansion significative, en particulier dans le domaine des énergies renouvelables. Parmi les diverses technologies disponibles, GADA, elle se distingue comme la plus couramment employée pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne [36]. Cela est principalement dû à plusieurs de ses atouts, notamment la réduction des dimensions du convertisseur de puissance, rendue possible par l'échange de puissance entre le rotor et le réseau, qui demeure relativement faible par rapport à la puissance statorique. La configuration d'une éolienne utilisant la GADA est considérée comme la plus simple parmi toutes les options de conception. Dans cette configuration, les enroulements du stator sont directement connectés au réseau électrique, tandis que les enroulements du rotor se branchent au réseau à travers des convertisseurs de puissance bidirectionnels [37]. Ces convertisseurs se composent de deux unités statiques distinctes : le convertisseur côté GADA et celui côté réseau. Un des atouts majeurs de ces convertisseurs est leur capacité à ajuster le glissement, permettant ainsi au système de fonctionner à des vitesses variables sur une large plage, ce qui le rend plus performant par rapport à la génératrice asynchrone à cage d'écureuil. De plus, ils compensent les différences

entre les fréquences mécanique et électrique en injectant un courant à fréquence variable dans le rotor. La figure 1.8 illustre la configuration d'une génératrice asynchrone à double alimentation, désignée par l'acronyme « GADA », connectée au réseau électrique [38].

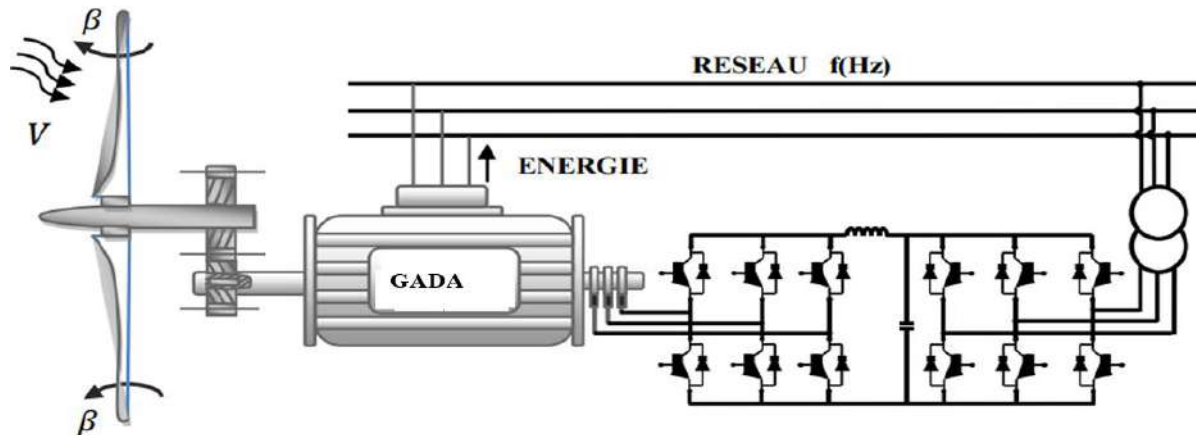


Figure.1.8. Configuration GADA connectée au réseau électrique

○ Avantages et les inconvénients de la GADA

La GADA alimentation réunit les avantages des génératrices asynchrones et synchrones à cause de sa structure qui lui permet de fonctionner comme les deux (2) génératrices. Dans Le tableau 1.8, nous résume les principaux avantages et inconvénients de la GADA lorsqu'elle est utilisée dans la plage de vitesse variable :

Tableau.1.8. Avantages et inconvénients de la GADA [39]

Avantages	Inconvénients
Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse.	Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
La commande indépendante des puissances active et réactive.	Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques.
La réduction des dimensions des convertisseurs statiques, et la minimisation ainsi des pertes fer de la machine et l'augmentation de son rendement.	L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs (redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs).
Le fonctionnement à vitesse de rotation variable.	
La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse du synchronisme.	
Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau.	
La possibilité de fonctionner en régime dégradé grâce à la configuration des deux convertisseurs alimentant la machine.	

1.8. Technologie de la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne

Comme l'illustre la figure 1.9, la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique passe par deux phases: la première phase est la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et la deuxième phase est la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, en utilisant différents composants. Cette partie, traite le concept de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec ses majeurs composants.

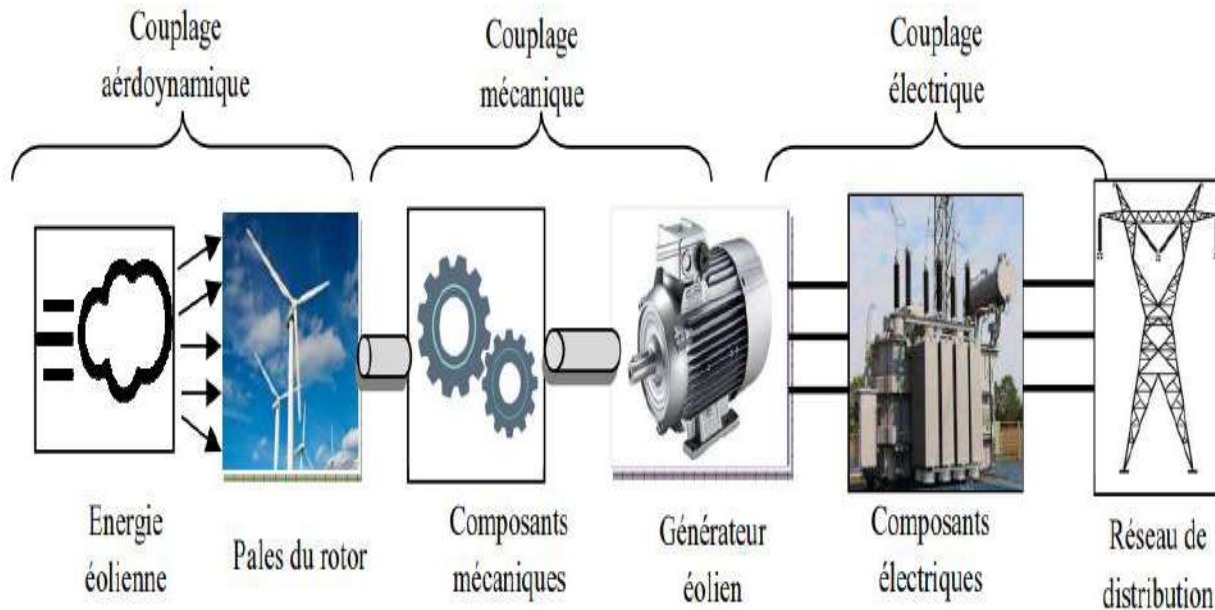


Figure. 1.9. Schéma fonctionnel du système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [39]

1.8.1. Majeurs composants majeurs de système éolien

Les principales composantes d'un système de conversion de l'énergie éolienne est composé principalement en trois (3) catégories [39] :

- **Composants électriques** : comprend d'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 ;
- **Composants mécaniques** : comprend 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 ;
- **Composantes de contrôle** : comprennent les systèmes de commande mécaniques et électriques.

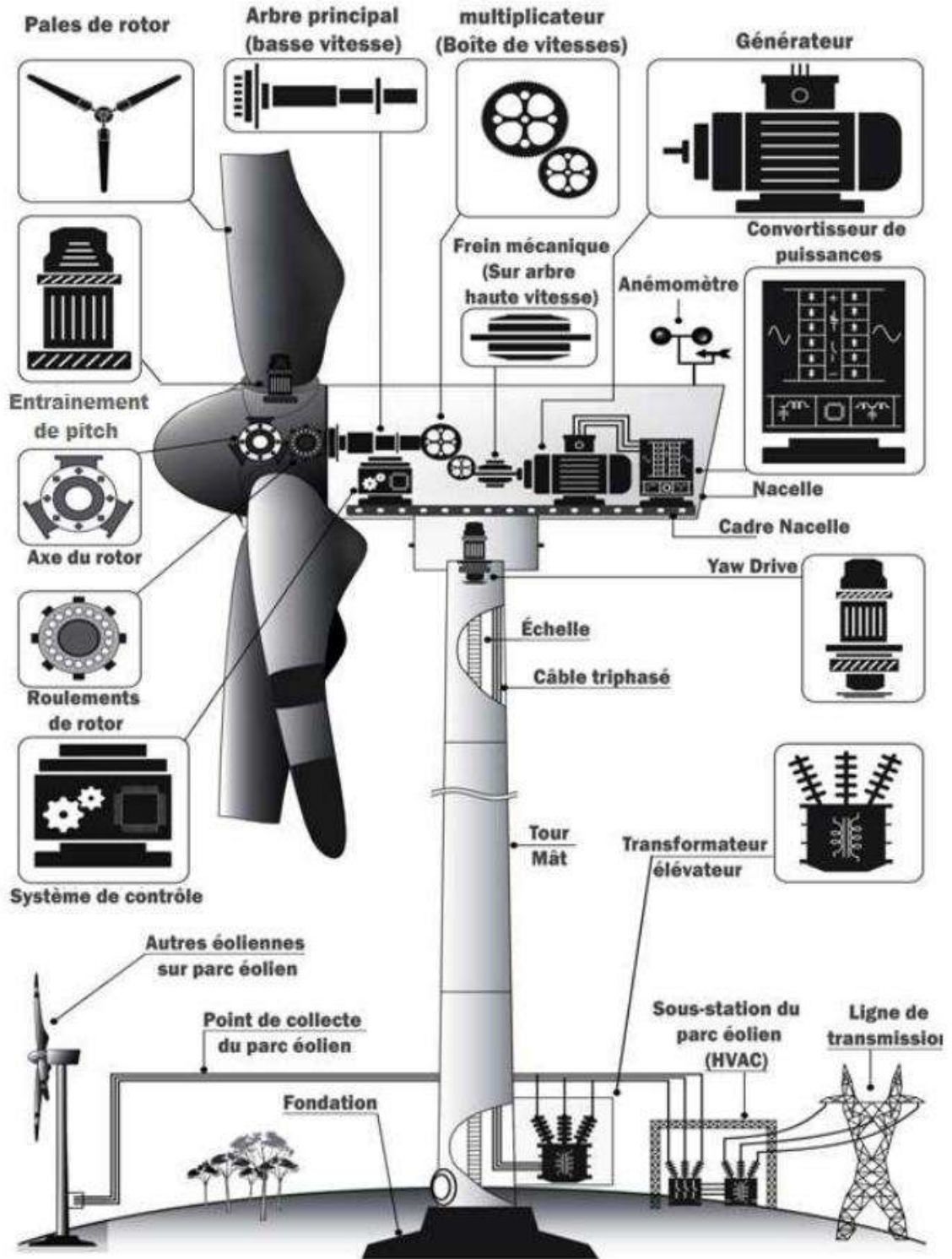


Figure.1.10. Principaux composants d'un système de conversion éolien haute puissance à vitesse variable [39]

1.8.2. Principe de conversion de l'énergie éolienne

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est de convertir le mouvement du vent en énergie de rotation qui peut être utilisée pour conduire un générateur. Les éoliennes captent la puissance du vent au moyen de pales aérodynamiques tournant la puissance mécanique. Actuellement, les éoliennes les plus populaires sont les turbines à axe horizontal, où le nombre des pales est généralement égal à trois. La figure 1.11 représente la structure de la chaîne éolienne et les étapes de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [40].

- **Transformation de l'énergie par les pales** : les pales fonctionnent sur le principe fondamental d'une aile d'avion, où la différence significative de pression entre les deux côtés de la pale engendre une force aérodynamique. Cette force dynamique met le rotor en mouvement, permettant ainsi la conversion efficace de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisable. Grâce à ce procédé, les pales deviennent des éléments essentiels pour la transformation de l'énergie naturelle en énergie que l'on peut exploiter pour nos besoins quotidiens.

- **Accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur** : les pales tournent à une vitesse relativement lente, généralement de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, ce qui est plus courant lorsque l'éolienne est grande. En effet, la taille de l'éolienne a un impact direct sur la vitesse de rotation des pales. La plupart des générateurs doivent tourner à très grande vitesse, souvent dans la plage impressionnante de 1000 à 2000 tours par minute, afin de générer suffisamment d'électricité pour répondre aux besoins énergétiques. C'est pourquoi, il est essentiel que le ralenti du rotor soit efficacement accéléré par le biais d'une boîte de vitesses, qui joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'éolienne. En revanche, certains types d'éoliennes ne sont pas équipés de ce mécanisme, ce qui signifie que leur générateur doit être beaucoup plus grand et plus lourd pour compenser cette absence afin de produire une énergie suffisante.

- **Production d'électricité par le générateur** : l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est convertie en énergie électrique au sein du générateur. Le rotor, entraîné à grande vitesse, induit un champ électromagnétique variable qui génère un courant électrique de manière stable et efficace. Cette conversion électromécanique assure une production d'électricité fiable et adaptée aux exigences du réseau.

- **Traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur** : cette électricité, en réalité, ne peut pas du tout être utilisée directement pour alimenter les appareils ; elle doit d'abord être soigneusement traitée par un convertisseur. Ensuite, sa tension est augmentée en à un impressionnant niveau de 20.000 volts à l'aide d'un transformateur spécialisé. Après cette étape cruciale, l'électricité est ensuite acheminée efficacement par un câble enfoui dans le sol vers une station de transformation. C'est dans cette station que l'électricité est finalement injectée dans le réseau électrique. De là, elle est soigneusement distribuée aux consommateurs les plus proches, assurant ainsi un accès fiable et continu à l'énergie.

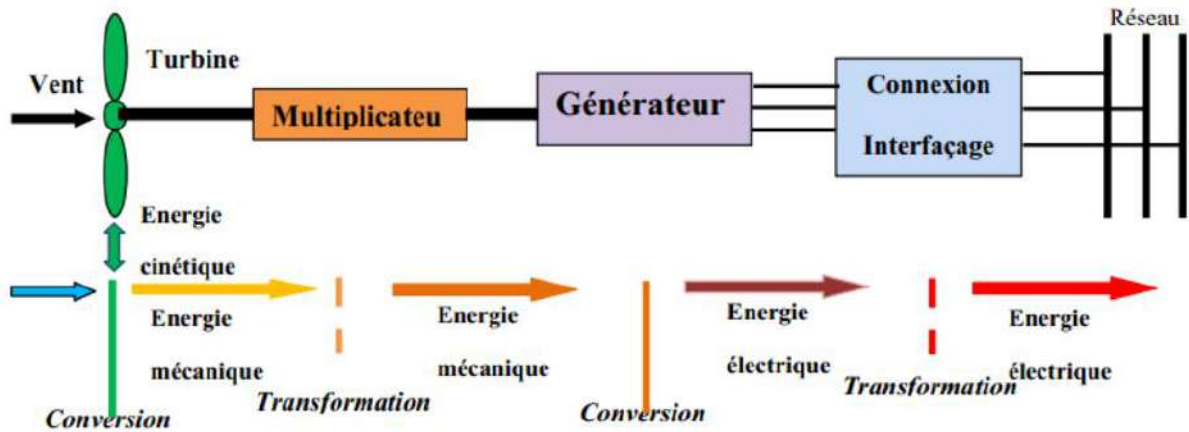


Figure.1.11. Principe de la conversion d'énergie éolienne

1.9. Etat de l'art sur le diagnostic et les défauts du système éolien

Les turbines éoliennes, qui jouent un rôle crucial dans la production d'énergie renouvelable, sont exposées à une grande variété de conditions de fonctionnement. Ces conditions, qui peuvent varier considérablement d'une installation à une autre, peuvent parfois pousser les différentes composantes du système au-delà de leurs limites de conception initiales. Par conséquent, pour évaluer de manière précise les défaillances potentielles des turbines éoliennes, il est essentiel de considérer deux critères principaux : leur fréquence d'apparition et la durée de leurs arrêts en cas de panne, afin de déterminer les défauts spécifiques. La surveillance continue et le diagnostic approfondi des défauts des éoliennes jouent un rôle clé dans la gestion des opérations. Ils permettent de prédire et de détecter rapidement toute occurrence d'une défaillance avant qu'elle ne se propage et n'entraîne l'arrêt total ou, pire encore, la destruction de l'appareil éolien. Cela garantit non seulement l'efficacité de la production d'énergie, mais offre également une sécurité accrue pour les opérateurs et une réduction des coûts de maintenance [41].

1.9.1. Terminologie dédiée au diagnostic

La terminologie relative au domaine du diagnostic des défauts n'obéit pas encore à un formalisme unifié, ce qui rend parfois difficile l'appréhension des contributions. Dans cette section, on présente des définitions aux termes techniques utilisés fréquemment dans l'étude des systèmes de contrôle tolérants aux défauts, en se basant sur plusieurs références Bibliographiques [42].

- **Défaut** : c'est l'écart non autorisé qui peut être entre la valeur nominale et la valeur réelle d'une réponse d'un système.

- **Défaillance** : l'incapacité du système à garantir des performances prédéfinies suite à une interruption permanente d'un équipement à accomplir une fonction requise après l'occurrence d'un défaut.

○ **Panne** : c'est un état de dysfonctionnement matériel ou logiciel d'un système ou d'une partie du système et elle résulte toujours d'une défaillance. Une panne peut être permanente ou intermittente.

○ **Dégradation** : une dégradation est une diminution de performances d'une des fonctionnalités d'un système.

○ **Perturbations** : les perturbations sont des signaux d'entrées indésirables et non contrôlables mais restent tolérables.

○ **Dysfonctionnement** : le dysfonctionnement signifie que soit le système reste sans réponse soit il y a une exécution incomplète d'une tâche spécifique.

○ **Résidu** : le résidu est un indicateur pour signaler la présence d'un défaut. Il s'agit de l'écart entre la performance réelle du système et la performance optimale indiquée par un modèle de référence

○ **Tolérance aux défauts** : c'est la capacité d'un système contrôlé à garder les objectifs de la commande, malgré l'apparition d'un défaut. Une dégradation des performances peut être acceptée. La tolérance aux défauts peut être obtenue via l'élimination du défaut et/ou par reconfiguration du contrôleur.

○ **Diagnostic** : le diagnostic du défaut est une opération qui suit la détection du défaut qui nous fournit des informations sur le type, l'amplitude, la taille, la localisation, et l'instant d'apparition du défaut. Le processus de diagnostic de défauts est réalisé en trois étapes : la détection, l'isolation et l'identification.

○ **Détection de défauts** : détermination de la présence de défauts et de l'instant de leurs occurrences.

○ **Localisation de défaut** : détermination de la classe à laquelle appartient le défaut.

○ **Identification de défauts** : déterminer les caractéristiques de chacun des défauts (son amplitude et son évolution temporelle).

○ **Mode de fonctionnement** : les trois (3) modes de fonctionnement d'un système sont déterminés par :

➤ **Mode sain** : le système accomplit tous les objectifs selon le cahier de charge exigé par l'exploitant.

➤ **Mode dégradé** : le système accomplit, partiellement, les objectifs requis avec une dégradation de performances mais sans défaillances.

➤ **Mode défaillant** : le fonctionnement du système est mauvais à causes des effets des défaillances.

1.9.2. Défaits des composants critiques des éoliennes

Les éoliennes sont des systèmes composés de plusieurs éléments, qui peuvent être influencés par plusieurs facteurs, tels que [43] :

○ **Défaut hydraulique**

Les éoliennes se trouvent souvent face à des conditions environnementales extrêmes, telles que des températures élevées ou basses, ainsi que la corrosion et les vibrations. Les éléments hydrauliques, cruciaux dans de multiples connexions à haute pression, sont intégrés dans divers systèmes, notamment les système de pas, d'orientation de la nacelle, de freinage et le système de lubrification de la boîte de vitesses. Les fuites survenant dans ces composants peuvent provoquer des pannes hydrauliques. Il est à noter que 60 % des défaillances sont dues à une mauvaise installation. Ces dysfonctionnements peuvent engendrer une réduction de la production d'énergie, une usure prématurée des pièces et des défaillances majeures.

○ **Défaits de la boîte de vitesses**

La boîte de vitesses (multiplicateur) est un élément essentiel dans la plupart des turbines éoliennes. Toutefois, elle est l'un des composants les plus vulnérables aux défauts, notamment. L'usure des jeux entre les dents et les ruptures des dents. Ces défaillances sont généralement causées par des contaminations particulières, ainsi que par des arrêts et démarrages fréquents, sans oublier les conditions de fonctionnement à forte charge. On peut résumer certains facteurs causant ces défaillances de la boîte de vitesses des turbines éoliennes comme suit : usure des engrenages due à une sollicitation inappropriée, défaillance des roulements, souvent exacerbée par des conditions de fonctionnement extrêmes, alignement incorrect qui peut résulter d'une installation défaillante, vibrations excessives pouvant engendrer des dommages répétés, dépassement de la charge de conception lié à des arrêts et démarrages fréquent, problèmes de lubrification causés par des fuites dans les systèmes intégrés, corrosion accélérée par des conditions environnementales difficiles, la fatigue et l'usure de la surface résultant d'une exposition prolongée à des charges élevées. Il est essentiel de souligner que les défaillances des roulements constituent la majorité des pannes au sein de la boîte de vitesses, souvent dues à l'écaillage de la structure blanche, à l'éraflure et au micropitting [41].

○ **Défaits des pales**

Les pales des rotors des turbines éoliennes jouent un rôle important dans la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Conçues en matériaux composites, elles sont susceptibles de dissimuler des défauts difficiles à détecter et sont soumises à des conditions extrêmes, telles que les turbulences et les impacts de foudre. Ces éléments peuvent provoquer des défaillances graves, comme des fissures ou même la perte d'une pale. Une pale endommagée a le

potentiel d'être projetée jusqu'à 1,3 km de la tour, ce qui présente des risques significatifs pour la sécurité et nuit à la confiance des habitants des environs [44].

- **Défauts des générateurs**

Le générateur est un composant essentiel pour le fonctionnement d'une éolienne, étant soumis à divers facteurs tels que les effets environnementaux, les surcharges et la fatigue. Cela engendre plusieurs défaillances communes [41] :

- **Défaillance des enroulements statoriques et rotoriques** : cette défaillance est provoquée par des surcharges significatives, des courts-circuits imprévus, ou une isolation qui se dégrade avec le temps, entraînant ainsi des pannes électriques notables et des pertes de performance considérables dans les appareils concernés.

- **Rupture de l'isolation de l'enroulement du stator** : elle peut survenir pour plusieurs raisons. Elle est principalement causée par un ensemble de contraintes mécaniques, électriques et thermiques qui agissent simultanément. Ces facteurs combinés peuvent entraîner une dégradation de l'isolation, compromettant ainsi le bon fonctionnement du moteur.

- **Asymétrie électrique du rotor** : elle est causée par l'augmentation de la résistance ou le circuit ouvert des circuits balais-engins, ce qui entraîne des complications. Cette situation engendre non seulement une surchauffe, mais aussi une survitesse importante. De plus, la vibration excessive peut devenir un problème majeur. Un autre facteur à considérer est la survitesse qui, en effet, contribue également à des défaillances mécaniques. Parmi celles-ci, le désalignement se manifeste souvent comme une conséquence directe. Finalement, il est crucial de noter que cela peut conduire à une perte significative de contrôle de la chaîne cinématique, entraînant des pannes désastreuses.

- **Divers défauts mécaniques qui mènent à une excentricité notable du rotor par rapport au stator** : comprennent notamment une déformation significative du rotor ou de l'arbre, un mauvais alignement, ainsi qu'un défaut de centrage qui peut être problématique et impactant.

- **Défauts qui entraînent des oscillations de couple** : il existe divers types de défauts en tout genre, liés à la charge mécanique ainsi qu'aux défauts de roulement qui peuvent perturber le fonctionnement optimal.

- **Défauts qui entraînent des perturbations de la répartition des forces magnétomotrices** : parmi ces défauts, on trouve les défauts de court-circuit statoriques, qui peuvent causer une dissipation d'énergie et une surchauffe. On note également la rupture des connexions électriques, que ce soit au niveau du stator ou du rotor, qui peut entraîner des situations de déséquilibre dangereux et perte d'efficacité.

- **Défauts du convertisseur statique**

Les convertisseurs statiques se composent (Transistor Bipolaire à Portée Isolée IGBT), des dispositifs semi-conducteurs qui peuvent les défauts suivants [45] :

- **Défaut d'ouverture** : l'IGBT se trouve dans un état ouvert et ne répond plus à la commande de fermeture. Si ce défaut affecte les deux IGBT d'un même bras, il engendre un autre type de défaut connu sous le nom de phase ouverte.

- **Défaut de fermeture** : l'IGBT se présente dans un état fermé et ne répond plus à la commande d'ouverture. Si ce défaut concerne les deux IGBT d'un même bras, cela entraîne un défaut de court-circuit.

1.10. Conclusion

Dans le présent chapitre, un état de l'art sur l'énergie éolienne et une étude descriptive de l'ensemble des éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne a été présentée. La situation actuelle, des statistiques sont données sur les différentes sources de production mondiale de l'énergie éolienne ainsi un potentiel éolien en cas de l'Algérie ont été présentés.

Après avoir présenté les différentes génératrices utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne, leurs avantages et leurs inconvénients dans le but d'atteindre une exploitation optimale de ces éoliennes quel que soit la vitesse du vent, le choix s'est porté sur la machine asynchrone double alimentation.

A la fin de ce chapitre, on s'est intéressé à un bref état de l'art sur le diagnostic et les défauts du système éolien. Quelques notions théoriques sur terminologie dédiée au diagnostic et les défauts des composants critiques des éoliennes sont évoqués.

Afin d'entamer l'étude du système éolien choisi, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une GADA.

Chapitre 2

Modélisation de la chaîne de conversion éolienne basée sur la GADA

2.1. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la machine. Avec le modèle approprié, on peut s'orienter facilement vers n'importe quelle commande.

Dans ce chapitre, notre étude consistera à la modélisation de chaque élément et la simulation d'un système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Dans un premier temps, nous allons présenter le modèle du vent qui sera appliqué à la turbine, le modèle aérodynamique, mécanique de la turbine. Par la suite, on présentera une étude détaillée sur les convertisseurs de tension à deux niveaux coté machine (CCM) et coté réseau (CCR) en vue de leur modélisation et leur commande, nous avons ensuite étudié la stratégie de commande à savoir la commande MLI (sinus-triangulaire), ainsi le modèle de la génératrice, un banc de condensateur, un filtre R-L et le réseau électrique. La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation.

2.2. Chaîne éolienne étudiée

La chaîne éolienne étudiée dans cette thèse est présentée par la figure 2.1. Elle est composée, essentiellement sur les éléments suivants [46] :

- Une turbine éolienne ;
- La génératrice asynchrone à double alimentation ;
- Un bus continu ;
- Un filtre passif ;
- Deux convertisseurs statiques (l'un côté génératrice et l'autre côté réseau).

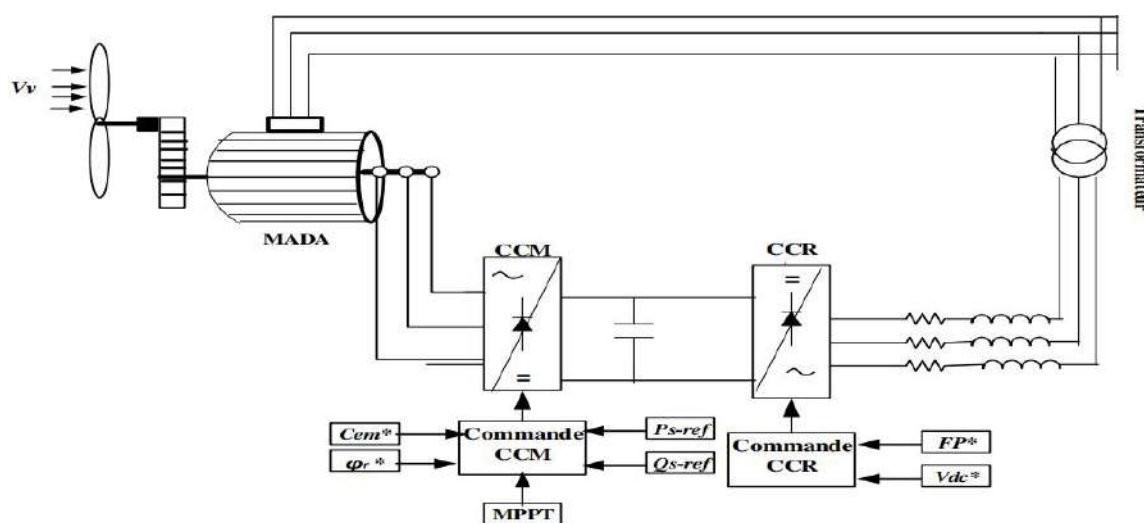


Figure.2.1. Chaîne éolienne

2.3. Structure de la machine (MADA) et configuration électrique

2.3.1. Description de la MADA

Les machines à asynchrone à double alimentation (MADA) ou les machines à asynchrone à rotor bobiné (MARB) sont souvent utilisées dans la gamme des mégawatts de puissance et plus rarement dans la gamme de l'ordre de quelques kilowatts [46]. Ces machines présentent une alternative aux machines asynchrones et synchrones. Parmi leurs principaux avantages c'est que dans les applications présentant une plage de vitesse limitée, permettant une réduction de la taille du convertisseur électronique de puissance d'alimentation [46]. Cela est particulièrement pertinent dans des domaines tels que la production à vitesse variable et le pompage de l'eau. Le stator reçoit des tensions triphasées directement du réseau, avec une amplitude et une fréquence constante, qui permettent de créer le champ magnétique au stator [47]. Le rotor est également alimenté par des tensions triphasées dont l'amplitude et la fréquence sont ajustées en régime permanent pour répondre aux diverses conditions de fonctionnement de la machine (telles que la vitesse et le couple) [47]. Pour ce faire, on utilise un convertisseur triphasé dos à dos, comme le montre la figure 2.1. Ce convertisseur, associé à la stratégie de contrôle appropriée, est chargé d'imposer des tensions alternatives au rotor nécessaires pour contrôler le point de fonctionnement global du GADA et effectuer l'échange de puissance entre le rotor et le réseau.

2.3.2. Modes de fonctionnement de la MADA

Le fonctionnement de la MADA, est fondamentalement basé sur le principe d'interaction électromagnétique. Une fois que le stator de la machine est correctement connecté au réseau électrique, un flux magnétique significatif apparaît au niveau du stator. Ce flux magnétique dépend de plusieurs facteurs, notamment la réluctance du circuit magnétique, le nombre de spires dans le bobinage, ainsi que du courant statorique qui traverse le système. Pendant la rotation de la machine, le flux magnétique généré par le stator engendre des forces électromotrices (fem) dans les enroulements rotoriques, ce qui permet à la machine de produire un travail utile en convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique. Ces principes sont essentiels pour comprendre le fonctionnement efficace de la MADA dans diverses applications industrielles [48].

Le rapport entre les fems créées au rotor et au stator est défini par [48] :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \frac{\omega_s - p\Omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (2.1)$$

Avec, N_r et N_s : nombre de spires des bobinages rotorique et statorique, respectivement ;
 p : nombre de paires de pôles,

ω_s et ω_m : pulsation statorique et la vitesse angulaire de rotation de la MADA, respectivement ;

La relation entre la vitesse mécanique de l'arbre (Ω_m) et la vitesse électrique (ω_s) dépend des paires de pôles (p) de la machine, dans le cas où le nombre de paires de pôles du stator et du rotor sont identiques [61] :

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r = P\Omega_m \quad (2.2)$$

Avec, ω_r : pulsation rotorique

Le signe plus (+) signifie que la machine fonctionne en régime hypo synchrone ($\omega_m < \omega_s$). Le signe moins (-) signifie que la machine fonctionne en régime hyper synchrone ($\omega_m > \omega_s$).

D'autre part, on peut donner la relation liant la fréquence du stator et celle du rotor [61]:

$$f_s = f_r + pf_m \quad (2.3)$$

Dans ce cas le glissement est défini par [48] :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.4)$$

D'après l'équation ci-dessus, on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la GADA :

- ($g=1$) : mode stationnaire ;
- ($0 < g < 1$) : mode hypo-synchrone ;
- ($g=0$) : mode synchrone ;
- ($g < 0$) : mode hyper-synchrone.

La machine asynchrone classique opère essentiellement en tant que moteur lorsqu'elle fonctionne en dessous de la vitesse de synchronisme. En revanche, elle ne peut passer en mode génératrice que lorsque ses vitesses dépassent ce seuil. Cependant, il est important de noter que, comme mentionné précédemment, la MADA, avec sa conception plus flexible, peut facilement fonctionner à la fois en mode moteur et en mode générateur aux vitesses hypo-synchrone ainsi qu'aux vitesses hyper-synchrone. Cette polyvalence dans son fonctionnement mène alors à la création de quatre modes distincts de fonctionnement pour la MADA. Cela élargit considérablement les possibilités d'application et d'utilisation dans divers contextes.

2.3.2.1. Mode moteur

○ Hypo-synchrone

Le fonctionnement en mode hypo-synchrone du moteur électrique est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage précise de vitesse qui s'étend de la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la vitesse à laquelle le moteur fonctionne en synchronisation avec le réseau électrique, à une vitesse plus faible, permettant ainsi une variété de réglages. La figure 2.2.a illustre clairement que la puissance est fournie par le réseau électrique au niveau du stator, alors que la puissance de glissement, qui représente l'énergie perdue lors de la conversion, transite par le rotor et est ensuite réinjectée au réseau, contribuant à l'efficacité globale du système. On a donc un fonctionnement optimal en mode moteur situé en dessous de la vitesse de synchronisme, ce qui permet d'optimiser les performances du moteur tout en améliorant son rendement énergétique dans diverses applications industrielles [49].

○ Hyper-synchrone

Le fonctionnement en mode hyper-synchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme, permettant ainsi au système de maximiser son efficacité dans certaines applications. La figure 2.2.b illustre clairement que la puissance est fournie par le réseau au stator, et que la puissance de glissement est également acheminée par le réseau au rotor. Cela indique que, sous ces conditions, on a alors un

fonctionnement en mode moteur qui se déroule au-dessus de la vitesse de synchronisme, ce qui est particulièrement utile dans des scénarios où une augmentation de la performance est nécessaire. Il est important de noter que le générateur asynchrone à cage, ne peut pas fonctionner dans ce mode spécifique à cause de sa conception, ce qui limite son utilisation dans des applications exigeant une telle performance avancée [49].

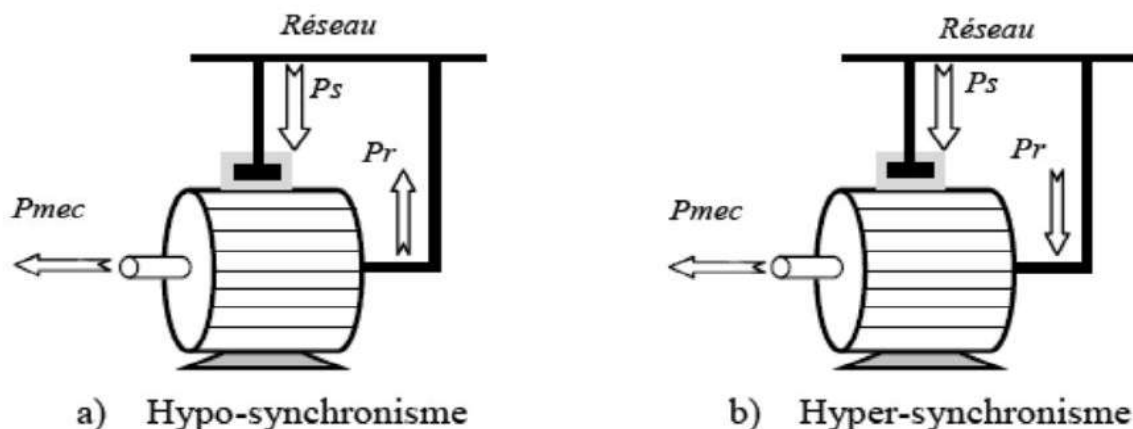


Figure.2.2. Fonctionnement de la GADA en mode moteur

2.3.2.2. Mode générateur

○ Hypo-synchrone

La figure 2.3.a illustre clairement que la puissance est efficacement fournie au réseau électrique par le stator, tandis que la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Dans ce cas précis, nous observons un fonctionnement en mode générateur qui se produit en dessous de la vitesse de synchronisme. Il est important de noter que la machine à courant alternatif à cage d'écureuil, quant à elle, ne peut pas fonctionner dans ce mode [50].

○ Hyper-synchrone :

La figure 2.3.b illustre clairement que la puissance est fournie au réseau électrique par le stator, tandis que la puissance de glissement est récupérée efficacement via le rotor. Ce processus permet à cette puissance de glissement d'être réinjectée de manière optimale au réseau. On observe ainsi un fonctionnement générateur qui se produit lorsque l'on dépasse la vitesse de synchronisme [50].

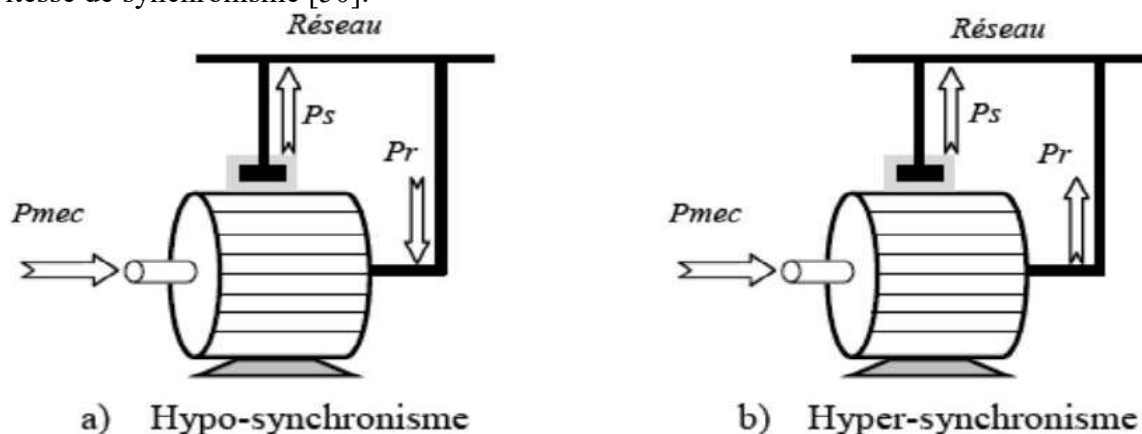


Figure.2.3. Fonctionnement de la GADA en mode générateur

2.4. Modélisation d'un système éolien

Pour optimiser le compromis entre couple et vitesse de la turbine et de la génératrice, ainsi que l'efficacité de conversion, il est essentiel d'avoir une modélisation précise et des techniques de commandes adaptées aux vitesses du vent. Le fonctionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne demande un développement mathématique rigoureux de chaque composant de la chaîne. La modélisation de la chaîne de conversion éolienne inclut le vent, le comportement aérodynamique des pales, le générateur électrique, les convertisseurs de puissance et leurs systèmes de commande.

2.4.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la turbine de manière efficace et pertinente, un ensemble d'hypothèses simplificatrices sont couramment [50] :

- Les trois pales de la turbine sont considérées comme étant de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air, ce qui simplifie considérablement les calculs et les analyses.
- Les trois pales sont orientables, permettant ainsi un ajustement optimal, et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support, afin de garantir une homogénéité dans le comportement dynamique de l'ensemble de la turbine.
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, ce qui est une hypothèse essentielle pour s'assurer que chaque pale reçoit le même apport d'énergie cinétique du vent.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable, ce qui implique que nous pouvons ignorer les pertes énergétiques dues à cette interaction dans notre modélisation.
- Enfin, les pertes par frottement de la turbine, dues aux différents éléments en mouvement, sont également négligeables par rapport aux pertes par frottement qui se produisent du côté de la génératrice. Cette dernière hypothèse est importante, car elle nous permet de se concentrer sur les aspects les plus significatifs du système tout en gardant une analyse précise et pertinente.

2.4.2. Modèle du vent appliqué au système

La chaîne éolienne exige une source primaire, qui est à la fois essentielle et fondamentale, pour fonctionner efficacement et fournir l'énergie utile souhaitée. Le vent se présente comme la source principale d'énergie qui permet de faire fonctionner une éolienne, ce qui souligne l'importance de comprendre son modèle mathématique. Ce modèle peut être extrêmement complexe, car il doit prendre en compte et rendre compte de sa phénoménologie turbulente, qui est un aspect nécessaire des interactions entre le vent et les pales de l'éolienne [50].

La modélisation du vent est primordiale pour :

- ✓ Définir les conditions de l'éolienne ;
- ✓ Les sollicitations sur les pales ;

- ✓ Évaluer l'énergie utilisable ;
- ✓ Aider à l'implantation des machines.

Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Soit :

$$V_v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \quad (2.5)$$

Avec,

V_v : Vitesse du vent (m/s) ;

V_0 : Valeur moyenne de la vitesse du vent ;

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k ;

w_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k ;

i : Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent ;

La composante V_0 représente trois niveaux de vitesse du vent :

$V_0 = 6$ m/s pour une faible vitesse du vent ;

$V_0 = 12$ m/s pour une vitesse moyenne du vent ;

$V_0 = 18$ m/s pour une forte vitesse du vent.

En ce qui nous concerne, le profil du vent est de moyenne vitesse, et sa variation en fonction du temps est représentée par la figure 2.4.

$$V_v(t) = 7 + 0.3 * \sin(0.1047t) + 0.3 \sin(0.2665t) + 0.3 * \sin(1.2930t) + 0.3 \sin(3.6645t) + 0.3 \sin(0.93275t) + 0.3 \sin(4.3365t) + 0.3 \sin(12.82575t) + 0.3 \sin(3.264625t) + 0.3 \sin(15.17775t) \quad (2.6)$$

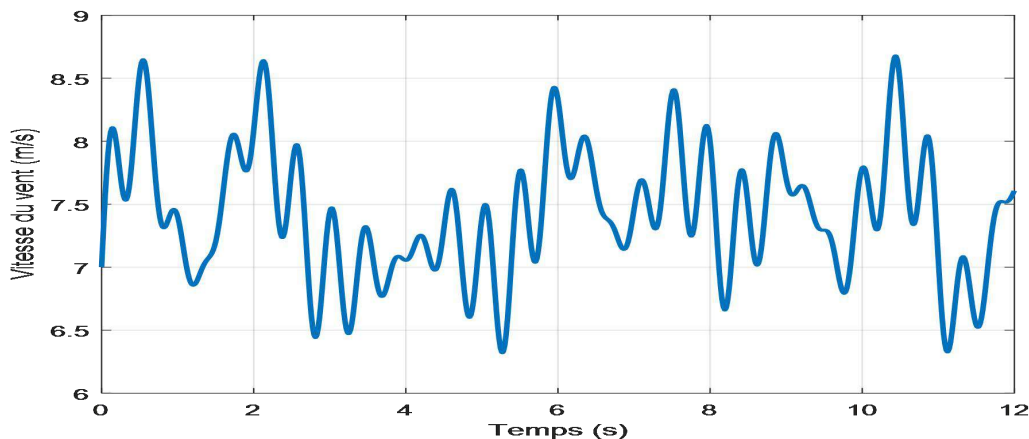


Figure.2.4. Profil du vent

2.4.3. Modélisation de la partie mécanique

2.4.3.1. Énergie éolienne

Provient de l'énergie cinétique du vent représentant la quantité de vent de masse (ρ) et de vitesse (V_v) est donnée par la relation ci-dessous [50] :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V_v^2 \quad (2.6)$$

2.4.3.2. Puissance du vent

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par l'équation suivante [50] :

$$p_w = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (2.7)$$

Avec,

p_w : Puissance du vent (w) ;

ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 Kg/m³ en atmosphère normale) ;

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

R : Longueur de la pale (m) ;

V_v : Vitesse du vent (m/s).

2.4.3.3. Coefficient de puissance

Le coefficient de puissance (C_p) reflète l'efficacité aérodynamique d'une éolienne et varie selon ses caractéristiques. Sa valeur maximale, 0,59, est la limite Betz, une théorie inatteignable en pratique. Elle détermine la puissance maximum extractible à une certaine vitesse de vent. Ce coefficient non linéaire dépend de l'angle de décrochage, de l'angle d'orientation de pale (β) et de la vitesse spécifique (λ).

Le coefficient de puissance (C_p) s'exprime pour la relation ci-dessous [50] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 - C_2 \cdot (\beta - C_3) \cdot \sin(A) - C_4 (\lambda - C_5)(\beta - C_3) \quad (2.8)$$

Un tracé de la variation de ce coefficient en fonction de la vitesse spécifique pour différentes valeurs de l'angle d'orientation des pales, figure 2.5 permet d'avoir le point maximum de ce coefficient ($C_p = 0.529$) qui correspond aux valeurs optimales ($\lambda = 9.39$) et ($\beta = 2^\circ$) avec ces valeurs, la turbine fonctionnera avec un rendement maximum et fournira ainsi une puissance mécanique optimale [48].

Ou, A et λ est défini par l'équation :

$$A = \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)} \quad (2.9)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_v} \quad (2.10)$$

La puissance mécanique P_{aer} peut être exprimée par l'équation :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (2.11)$$

Avec,

P_{aer} : La puissance aérodynamique (W).

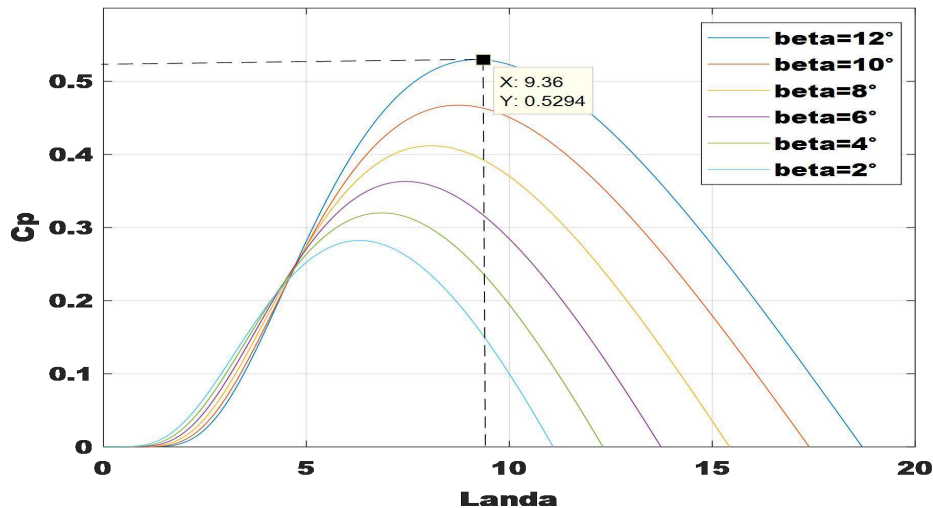


Figure.2.5. Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de la turbine et de l'angle d'orientation des pales

2.4.3.4. Coefficient de couple

Il est essentiel de considérer le couple exercé par le vent sur les pales, car c'est ce couple qui est à l'origine de leur rotation et de leur mouvement. Dans des conditions de vitesse du vent très faible, le couple généré est insuffisant pour provoquer la rotation des pales en raison du frottement important qui freine cette action. Ainsi, le rapport de vitesse de pointe devient donc égal à zéro, ce qui conduit inévitablement à une production d'énergie nulle, conformément à l'équation 2.11. Cependant, il existe toujours un couple non nul appliqué aux pales de l'éolienne. Cela met en évidence que, même dans des conditions où la génération d'énergie semble impossible, il est donc nécessaire de définir et d'utiliser le coefficient de couple C_{aer} afin de décrire de manière précise le fonctionnement de l'éolienne d'un point de vue mécanique et technologique. Cette définition est fondamentale pour comprendre comment l'éolienne peut tirer parti des variations du vent pour optimiser son rendement [50].

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\rho \pi R^3 V_w^2}{2\lambda} C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_w^2 C_t \quad (2.12)$$

Avec,

C_{aer} : couple aérodynamique (N.m) ;

C_t : coefficient du couple ;

λ : vitesse relative ;

Ω_t : vitesse de l'arbre.

Le couple mécanique (C_t) disponible sur l'arbre lent de la turbine peut être calculé en utilisant la vitesse de rotation de la turbine comme présenté dans l'équation suivante :

$$C_t(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (2.13)$$

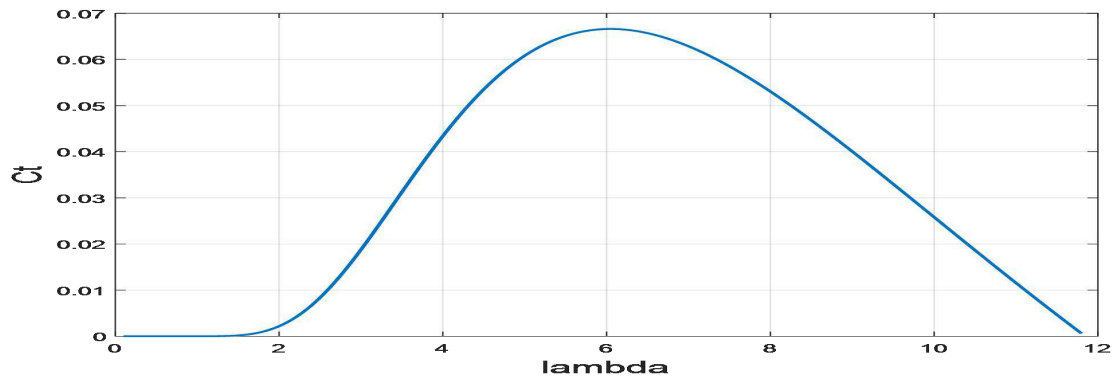


Figure.2.6. Coefficient du couple en fonction du rapport des vitesses relative

2.4.3.5. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur relie la turbine à la génératrice GADA pour adapter leur vitesse. Pour cette étude, plusieurs hypothèses ont été posées :

- ✓ Le multiplicateur est rigide et représenté par un simple gain ;
- ✓ L'élasticité et le frottement sont négligés ;
- ✓ Les pertes énergétiques sont considérées comme nulles.

En général, la turbine éolienne fonctionne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/mn. Le multiplicateur convertit la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple d'entraînement selon les expressions suivantes [50] :

$$\Omega_m = G \Omega_t \quad (2.14)$$

$$C_m = \frac{1}{G} C_{aer} \quad (2.15)$$

Avec,

C_m : couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

Ω_m : vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice (rad/s) ;

C_{aer} : Couple de la turbine (aérodynamique) (rad/s) ;

Ω_t : vitesse de la turbine (rad/s).

2.4.3.6. Modèle de l'arbre mécanique

Sur la base des hypothèses simplificatrices dans la partie précédente, un modèle mécanique avec deux masses est établi, illustré par la figure 2.7. La turbine comporte trois pales identiques de rayon (R), fixées sur un arbre tournant à une vitesse (Ω_t). Nous considérons une répartition uniforme de la vitesse du vent sur les pales, avec des forces de poussée égales. Grâce à la conception aérodynamique, le coefficient de frottement est négligeable, tout comme les pertes par frottement de la turbine par rapport à celles de la génératrice [51].

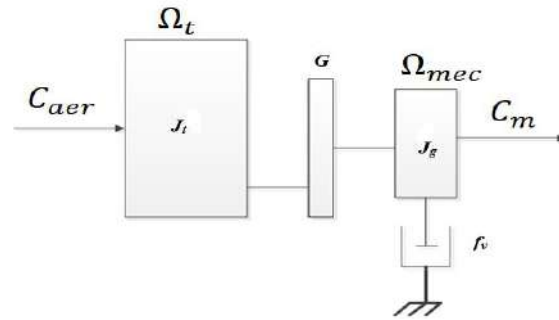


Figure.2.7. Modèle mécanique de la turbine éolienne

Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale (J) constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de cette dernière [51]. Comme il est présenté sur la figure 2.7 est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'inertie de l'arbre mécanique est donnée par l'expression suivante :

$$J = J_t + J_g \quad (2.16)$$

L'évolution de la vitesse mécanique est conditionnée par le couple qui est appliqué sur le rotor de la génératrice, ce couple résultant est en effet le produit d'un couple électromagnétique généré par la génératrice, ainsi que d'un couple de frottement visqueux qui s'oppose au mouvement. De plus, il faut également prendre en compte le couple du multiplicateur de vitesse qui influence également le fonctionnement du système. L'ensemble de ces interactions est modélisé par la relation dynamique ci-après, qui permet d'analyser et de prévoir les variations de la vitesse en fonction des couples appliqués [51].

$$C_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{aer} - C_{em} - C_f \quad (2.17)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux C_f .

$$C_f = f_v \Omega_m \quad (2.18)$$

J : moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;

C_f : couple aux frottements visqueux de la génératrice GADA ;

C_m : couple mécanique sur l'arbre de la génératrice GADA ;

C_{em} : couple électromécanique (N.m) ;

f_v : coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice GADA.

$$J = \frac{J_t}{G} + J_g \quad (2.19)$$

J_t : est le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des pales de l'éolienne (comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine) ;

J_g : est le moment d'inertie de la génératrice ;

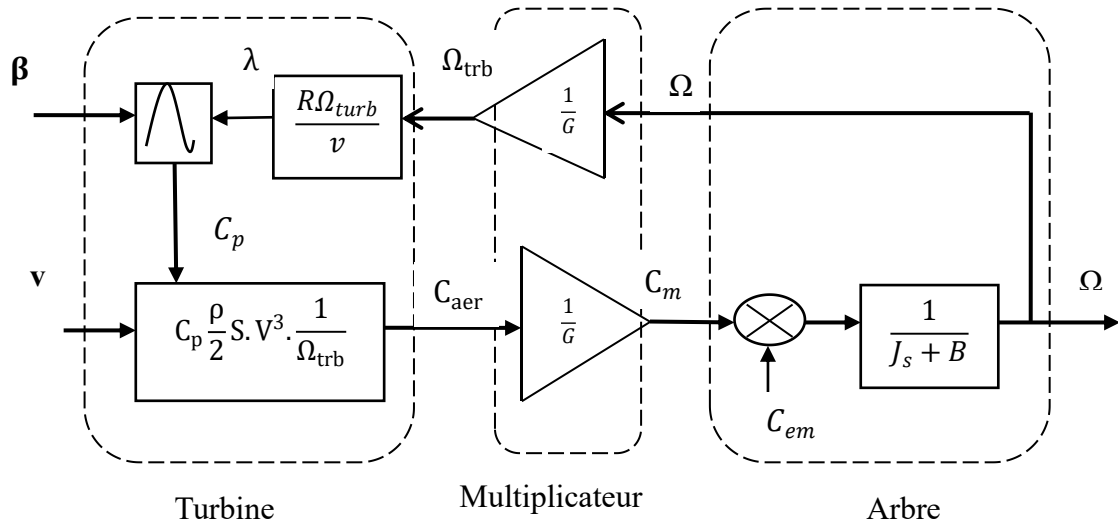


Figure.2.8. Schéma bloc fonctionnel de la turbine

2.4.4. Modélisation de la partie électrique

2.4.4.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation

En raison de la répartition des enroulements de la GADA et de sa géométrie complexe, des hypothèses simplificatrices sont faites pour modéliser les machines électriques en vue de leur commande [52] :

- ✓ l'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant) ;
- ✓ effet des encoches négligé ;
- ✓ la force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale ;
- ✓ la machine à une construction symétrique ;
- ✓ pas de régime homopolaire puisque le neutre n'est pas connecté ;
- ✓ circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- ✓ l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- ✓ les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire) et de l'échauffement non prises en compte.

2.4.4.2. Modèle de la GADA

L'analyse des machines géométriquement complexes requiert un modèle simplifié qui imite leur comportement. Ces modèles transforment le système naturel en une version plus accessible d'un modèle simple qui traduit le fonctionnement de la machine. La GADA en cas où on inverse son couple en injectant un couple moteur au lieu d'un couple résistant au niveau de son arbre, elle garde toujours son propre modèle. En considérant certaines hypothèses simplificatrices, le modèle de la machine peut être exprimé à partir de relations spécifiques [52] :

✓ **Les équations électriques** peuvent être données sous forme matricielle :

✓ Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

✓ Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$[V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T, [V_{ar} V_{br} V_{cr}]^T$: Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$[i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T, [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$[\Phi_{as} \Phi_{bs} \Phi_{cs}]^T, [\Phi_{ar} \Phi_{br} \Phi_{cr}]^T$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

R_s, R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

✓ **Les équations magnétiques** sont données comme suite :

✓ Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

✓ Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Avec,

L_s : inductance propre statorique ;

M_s : inductance mutuelle entre phases statoriques ;

L_r : inductance propre rotorique ;

M_r : inductance mutuelle entre phases rotoriques.

Les inductances mutuelles entre phases statorique et rotorique ont pour expression [54] :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Ces inductances transforment le couplage magnétique qui existe entre les phases statorique et rotorique de la machine.

2.4.4.3. Modèle de la GADA dans le repère de Park

La transformation de Clark-Park représente de manière efficace un moteur rotatif recevant des courants triphasés via trois enroulements. Ceux-ci sont alimentés par deux enroulements perpendiculaires fixes avec des courants sinusoïdaux. Les variables modélisées, comme les courants, les flux et tensions, permettent de convertir un système triphasé en un modèle biphasé, changeant ainsi le cadre de référence. Clarke est fixé par rapport au stator, avec des axes α et β , tandis que Park est lié au rotor, avec des axes d (direct) et q (quadrature). Cette transformation joue un rôle clé dans l'analyse et le contrôle des moteurs, permettant une représentation simplifiée des phénomènes complexes qui se produisent dans les systèmes électromécaniques [52].

Dans le cas d'un système triphasé équilibré, la forme simplifiée de la transformation est représentée comme suit [52] :

A. Matrices de transformation de Clarke (abc- $\alpha\beta$)

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

La matrice inverse est alors :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

B. Matrices de transformation de Park (abc-dq)

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

La matrice inverse est alors :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

La matrice de l'axe $\alpha\beta$ dans les axes dq des axes du rotor peut alors être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

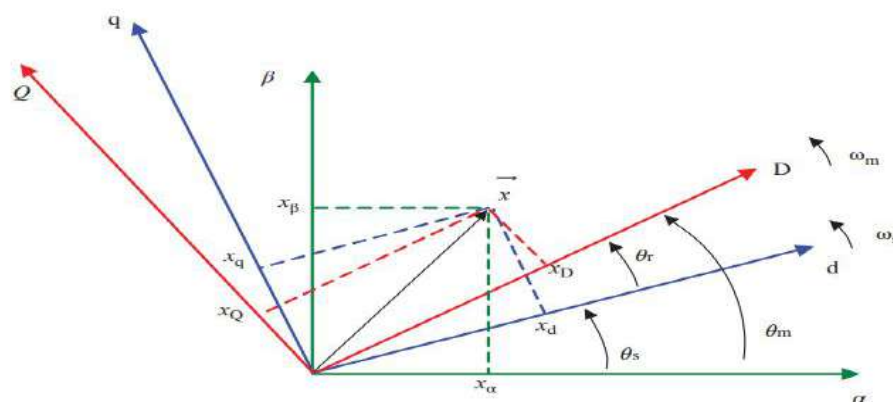


Figure.2.9. Différents cadres de référence pour représenter les vecteurs spatiaux du GADA

Nous allons maintenant décrire de manière détaillée la modélisation dans un repère tournant biphasé (d-q), en utilisant les transformations de Park, qui permettent de garantir la conservation des puissances dans le système étudié. Soit l'angle électrique, noté comme étant θ_s , entre l'axe direct (d) du repère biphasé et le repère fixe qui est lié à la phase « a » du stator du moteur. Si l'on applique ces transformations aux différentes variables telles que les flux et les tensions qui interviennent dans les équations de la GADA, cela nous permet d'obtenir un modèle biphasé pertinent et fonctionnel. À partir de la figure et des considérations établies, on peut distinguer plusieurs éléments importants : L'axe direct qui est désigné par l'indice (d) ; l'axe en quadrature qui est identifié par l'indice (q). Dans le cas particulier de la figure 2.9 que nous examinons, on ne peut pas distinguer la composante homopolaire, symbolisée par (o), car nous faisons l'hypothèse que le système est équilibré, c'est-à-dire que les différentes phases sont dans une relation harmonieuse, dont l'axe peut être choisi de manière conventionnelle comme étant orthogonal au plan (o-d, o-q). Ce choix simplifie grandement notre analyse.

De plus, la projection des grandeurs réelles qui concernent les phases (a-b-c) sur le repère (d-q) nous permet de mieux comprendre les interactions et les comportements des différentes composantes du système. Ces projections sont essentielles pour la mise en place d'analyses plus poussées et pour le développement de stratégies de contrôle efficaces, permettant par la suite, de mieux appréhender les comportements dynamiques de la machine dans le cadre de son fonctionnement normal ou lors de situations particulières.

La modélisation des tensions du stator et du rotor, du flux et des puissances actives/réactives de la GADA peut être représentée dans le repère dq comme indiqué dans les équations suivantes [52] :

Tension du stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (2.32)$$

Flux du stator :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (2.33)$$

Puissance du stator :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} \cdot i_{ds} - V_{ds} \cdot i_{qs}) \end{cases} \quad (2.34)$$

Tension du rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.35)$$

Flux du rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (2.36)$$

Puissance du rotor :

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} \cdot i_{dr} + V_{qr} \cdot i_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr} \cdot i_{dr} - V_{dr} \cdot i_{qr}) \end{cases} \quad (2.37)$$

Avec,

i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} : courant du stator et rotor ;

R_s , R_r : résistance du stator et rotor ;

L_s , L_r : inductance propre du stator et rotor ;

θ_s : l'angle électrique du champ tournant statorique ;

M : l'inductance mutuelle entre les barres du rotor et l'enroulement du stator ;

$\omega_s \omega_r$: vitesse du stator et du rotor ;

P_s , P_r : puissance active du stator et du rotor (w) ;

$Q_s Q_r$: puissance réactive du stator et du rotor (var).

Les équations précédentes permettent de simplifier le circuit équivalent en régime permanent de la GADA dans le repère de référence dq, comme l'illustre la figure 2.10.

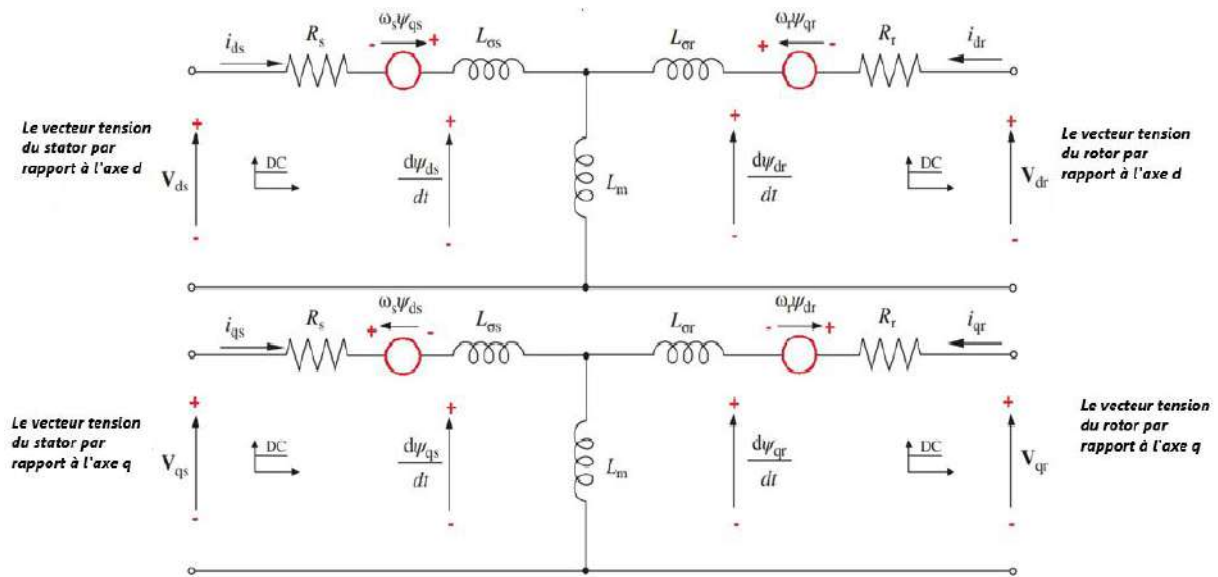


Figure.2.10. Modèle de circuit équivalent de la GADA dans le cadre de référence dq

Le couple électromagnétique s’exprime quant à lui en fonction des courants et des flux par [52] :

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{3}{2} \frac{pM}{L_s} (i_{dr}\varphi_{qs} - i_{qr}\varphi_{ds}) \\ C_{em} = -\frac{3}{2} \frac{pM}{L_s} i_{qr}\varphi_{ds} \end{cases} \quad (2.38)$$

Avec,

p : Le nombre de pôles de la paire ;

On remarque selon la figure que θ_s et θ_r sont liés naturellement à θ_m par la relation rigide :

$$\theta_m = \theta_s + \theta_r \quad (2.39)$$

Les vitesses angulaires de rotation sont obtenues telles que :

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \end{cases} \quad (2.40)$$

Avec,

ω_s , ω_r et ω_m représentent les vitesses de pulsation statorique, rotorique et de glissement de la GADA respectivement.

2.4.4.4. Choix de repère de référence

Le choix d’un repère de référence dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité des composantes du système étudié. Il existe trois repères biphasés de références [53] :

✓ Le repère fixe au stator appelé référentiel stationnaire :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0; \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_m \quad (2.41)$$

Ce repère de référence est le mieux adapté pour les grandeurs instantanées. Il est utilisé pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation de la machine.

✓ Le repère fixe au rotor appelé référentiel tournant :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0; \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (2.42)$$

Ce repère de référence est adapté pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante.

✓ Le repère fixe au champ tournant appelé référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} + \frac{d\theta}{dt} = \omega_s = \omega_r + \omega_m \quad (2.43)$$

Dans ce repère, les composantes relatives de la machine sont constantes, ce qui justifie sa large utilisation dans le domaine de la commande des machines asynchrones.

Vu les avantages que représente ce dernier repère de référence, il sera retenu dans notre étude.

- **Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique**

Le bon choix c'est le repère (d-q) qui est relié au champ tournant statorique. Ce choix est essentiel, car il est directement relatif à la fréquence de 50Hz, qui correspond à la fréquence du réseau électrique. Par conséquent, en prenant cette décision, le repère de Park sera adéquatement synchronisé avec le flux statorique, comme illustré dans la figure 2.11, ce qui permettra une meilleure efficacité et un contrôle plus précis des performances du système [53].

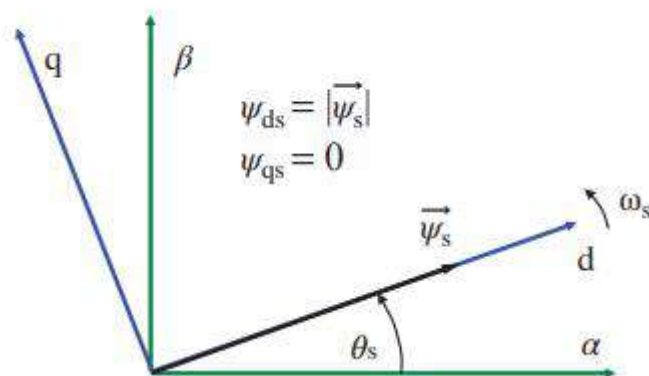


Figure.2.11. Cadre de référence dq rotatif synchrone aligné sur le vecteur d'espace de flux du stator

Souvent dans le cas très fréquent d'une GADA de moyenne et de grande puissance considérable, la résistance statorique R_s est souvent négligée lors de la synthèse de son modèle, cela étant fait sous l'hypothèse d'orientation précise du flux statorique [58]. En adoptant donc l'hypothèse d'une résistance statorique R_s totalement négligeable et que le flux statorique est constant (cette condition précise est assurée dans le cas d'un réseau stable et bien connectée au stator de la GADA), et orienté de manière appropriée selon l'axe d, on peut alors déduire [53] :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (2.44)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_a \cdot \varphi_s \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (2.45)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{qr} \\ 0 = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (2.46)$$

Les équations lient les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\varphi_s}{L_s} + \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \sigma L_r \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \varphi_s \\ \varphi_{qr} = \sigma L_r \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (2.48)$$

Avec,

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \text{ Coefficient de dispersion de Blondel}$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (2.48) par leurs expressions dans l'équation (2.35), on obtient

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - g\omega_s \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - g\omega_s \sigma L_r i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.49)$$

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

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - g\omega_s \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} - g\omega_s \sigma L_r i_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.50)$$

Où, g correspond au glissement de la machine asynchrone, et le terme $(g \frac{M V_s}{L_s})$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc

prendre en compte cette erreur. L'adaptation des équations des puissances (2.34) au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ($V_{dr} = 0$) donne :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s \cdot i_{qs} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s \cdot i_{ds} \end{cases} \quad (2.51)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (2.47) dans l'équation (2.51), les expressions des puissances active et réactive sont obtenues comme suit :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(-V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + V_s \frac{\varphi_s}{L_s} \right) \end{cases} \quad (2.52)$$

En tirant $\varphi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (2.52), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{3V_s^2}{2L_s\omega_s} \quad (2.53)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante \bar{a} comme constante (pas de saturation), le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $(\frac{3V_s^2}{2L_s\omega_s})$ près imposée par le réseau.

En remplaçant (2.45) dans (2.38), le couple de la GADA aura pour expression :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} \frac{PM}{L_s} i_{qr} \varphi_s = -\frac{3PV_sM}{2L_s\omega_s} i_{qr} \quad (2.54)$$

En examinant les équations (2.50), (2.52), (2.53) et (2.54), on peut établir le schéma bloc de la GADA illustré dans la figure 2.12 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances active et réactive statoriques et le couple électromagnétique.

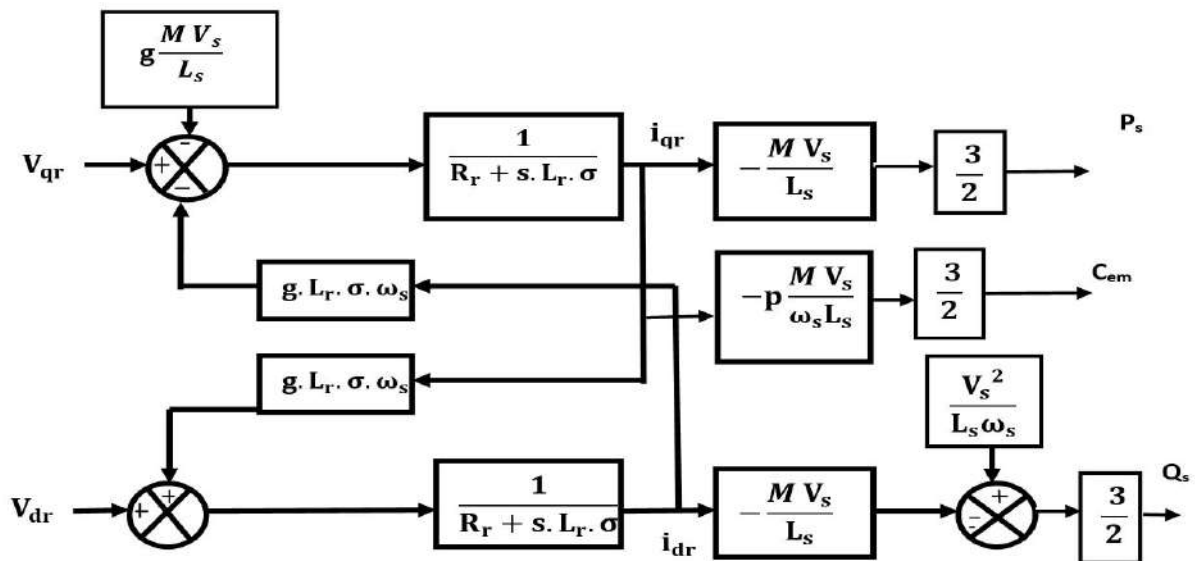


Figure 2.12. Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA

2.4.4.5. Modélisation de la source d'alimentation

Pour entraîner une machine asynchrone en rotation, diverses méthodes sont possibles, allant du branchement direct au réseau jusqu'aux variateurs de vitesse en passant par les démarreurs [59]. Ce travail étudie une génératrice asynchrone à doublement alimentée, avec le stator connecté directement au réseau. Le rotor est alimenté par une tension réduite via un convertisseur statique pour le redressement et l'ondulation. Le système comporte deux convertisseurs à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) réversibles, en mode back-to-back, reliant le rotor et le réseau, réalisant l'interface électrique entre le rotor de la machine et le réseau (figure 2.13).

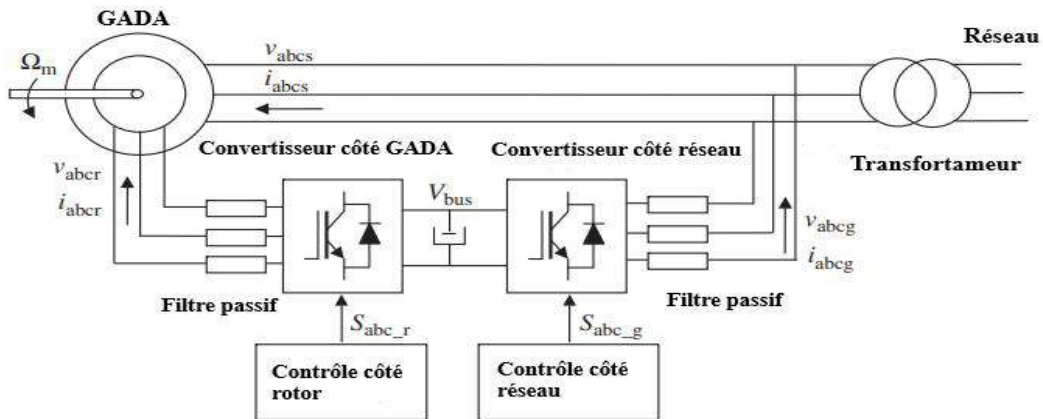


Figure.2.13. Représentation du système d'alimentation de la GADA

A. Modèle de convertisseur électronique (dos à dos)

Les convertisseurs dos à dos sont modélisés avec un modèle détaillé utilisant des dispositifs de commutation contrôlés par les signaux $S_{a_r}, S_{b_r}, S_{c_r}, S_{a_g}, S_{b_g}, S_{c_g}$. Ces modèles permettent des simulations adaptatives et synchronisent la fréquence de la tension du rotor avec celle du circuit statorique [54]. Dans cette étude, deux convertisseurs fonctionnent en mode onduleur ou redresseur, avec trois éléments de commutation et six interrupteurs IGBT, comme le montre la figure 2.14. Les commutateurs, connectés dos à dos par des diodes, visent à onduler la tension du bus continu pour le rotor, à générer des puissances via le stator et à les injecter au réseau. Le bus CC est bidirectionnel, assurant la réversibilité.

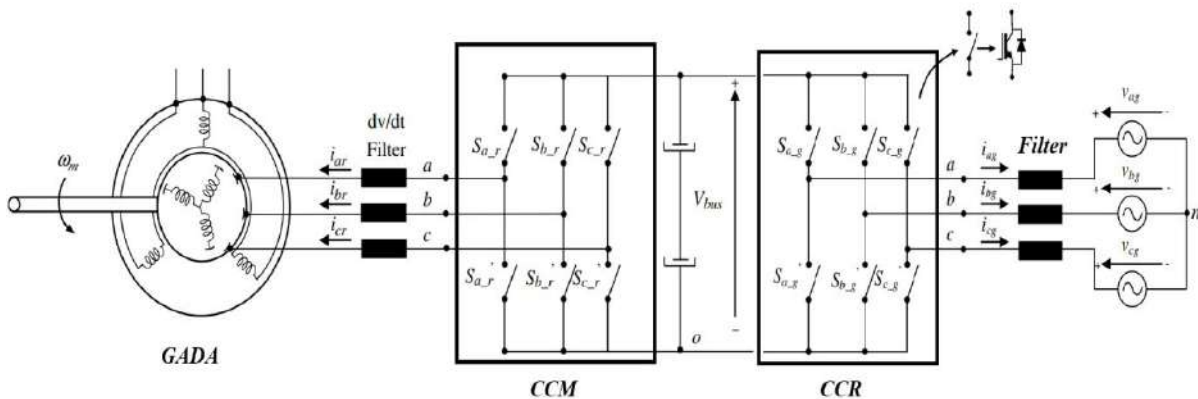


Figure.2.14. Modèle simplifié du générateur connecté au réseau avec les deux convertisseurs statiques et le filtre

L'approche de contrôle du convertisseur est basée sur la technologie de modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui minimise les harmoniques en réduisant le contenu des harmoniques de basse fréquence [55].

B. Modélisation du convertisseur coté machine (CCM)

Le rotor de la GADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux. Cet onduleur est spécialement équipé de plusieurs dispositifs de semi-conducteurs, lesquels sont commandés à l'ouverture et à la fermeture. Parmi ces dispositifs, on trouve soit des transistors MOSFET, soit des IGBT, associés à des diodes en tête bêche. Ce type d'onduleur joue un rôle crucial puisqu'il est considéré comme l'organe de commande de la GADA, et il peut être assimilé à un amplificateur de puissance en raison des fonctions qu'il remplit. On admet, à titre de simplification pour l'analyse, que les six interrupteurs électroniques qui sont représentés ci-dessous, dans la figure 2.15 sont en effet parfaits. En remplaçant chaque groupe de transistor-diode figure 2.15.a par des interrupteurs k_j , où j prend les valeurs 1, 2, 3, 4, 5, 6, on obtient ainsi un schéma simplifié, qui est illustré dans la figure 2.15.b. Ce processus de simplification est fondamental pour la compréhension et l'analyse détaillée du fonctionnement de l'ensemble du système [54].

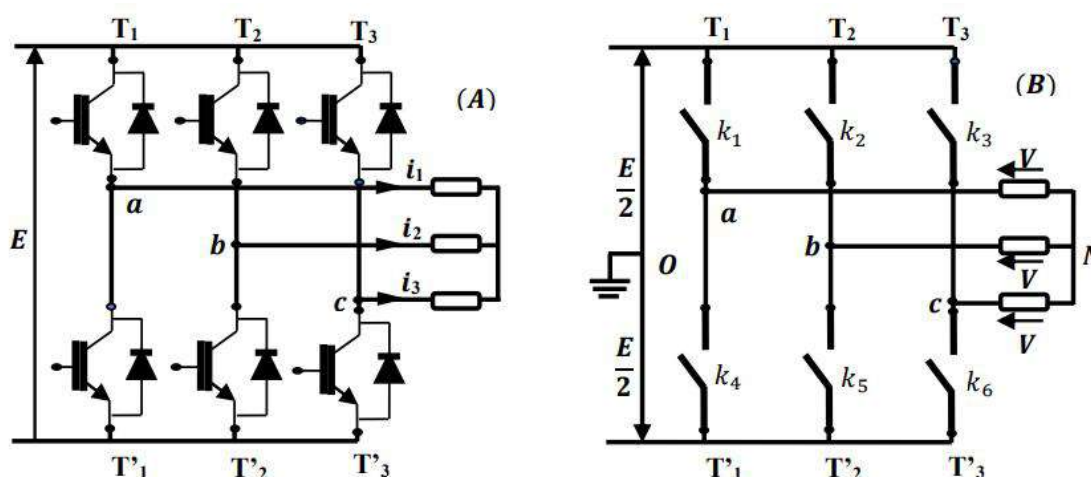


Figure.2.15. Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Pour simplifier l'étude, nous supposons que [56] :

- ✓ le couplage est du type étoile sans neutre ;
- ✓ les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminés ;
- ✓ le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré.

Les équations des tensions simples aux trois phases sont :

$$\begin{cases} V_a = V_{ao} + V_{on} \\ V_b = V_{bo} + V_{on} \\ V_c = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (2.55)$$

Par addition, on a :

$$V_a + V_b + V_c = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} \quad (2.56)$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

Donc,

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} = 0 \quad (2.57)$$

D'où,

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.58)$$

En remplaçant (2.58) dans (2.55), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_a = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_b = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_c = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.59)$$

On peut écrire l'équation (2.59) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Grâce à l'ouverture et la fermeture successives des interrupteurs, l'onduleur génère une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires.

$$\begin{cases} V_{ao} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{bo} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{co} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (2.61)$$

Tel que,

$$\begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } K_1 \text{ fermé} & \text{si non } S_1 = -1 \\ S_2 = 1 & \text{si } K_1 \text{ fermé} & \text{si non } S_1 = -1 \\ S_3 = 1 & \text{si } K_1 \text{ fermé} & \text{si non } S_1 = -1 \end{cases} \quad (2.62)$$

En remplaçant (2.61) dans (2.60), on aura le modèle mathématique de l'onduleur MLI triphasé à deux niveaux suivants :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

○ Commande par modulation de largeur d'impulsion

La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle est un processus sophistiqué qui se réalise par la comparaison d'une onde modulante de basse fréquence, souvent désignée comme tension de référence, à une onde porteuse de haute fréquence ayant une forme triangulaire distincte. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. L'objectif principal de la commande MLI est de permettre une comparaison instantanée et efficace de chacune des trois tensions sinusoïdales de référence que nous souhaitons imposer à un signal triangulaire de haute fréquence que

nous appellerons porteuse. Les impulsions des commandes (S_a , S_b , S_c) de l'onduleur sont les intersections entre les ondes modulantes (de références) avec l'onde triangulaire (porteuse) [57]. La comparaison entre les ondes de références et l'onde triangulaire détermine l'état des interrupteurs du circuit de puissance (ouverture et fermeture), figure 2.16.

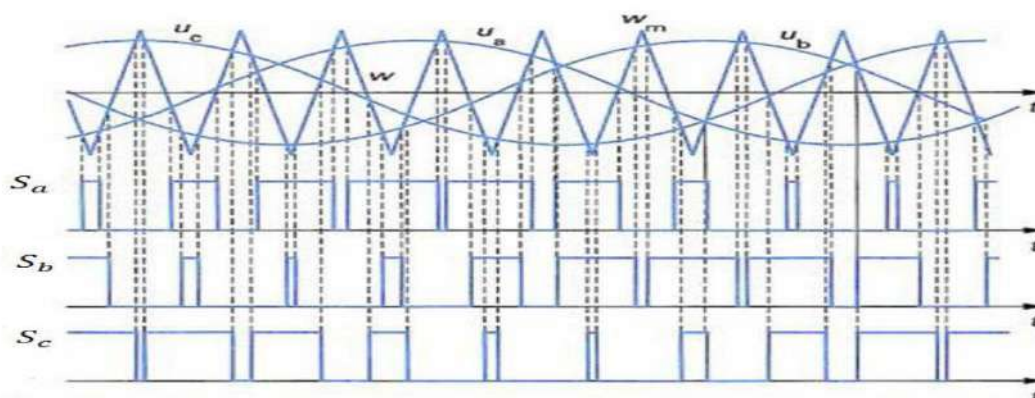


Figure.2.16. Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse

Cette commande est caractérisée par deux paramètres [54] :

✓ L'indice de modulation m qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (2.64)$$

✓ Le taux de modulation r qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence V_{ref} et celle de la porteuse U_p :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (2.65)$$

Si m est un multiple de trois nous pouvons éliminer les harmoniques d'ordre trois qui causent les majeurs inconvénients de cette technique.

○ Modélisation et technique de commande du convertisseur coté réseau (CCR)

Plusieurs topologies différentes dans le système de conversion d'énergie éolienne viennent inclure l'utilisation du redresseur à MLI, pour effectuer la connexion directe au réseau électrique. Ce redresseur est conçu de manière identique à celle de l'onduleur qui a été préalablement établi et analysé. L'un des grands avantages que présente le convertisseur situé du côté réseau, en plus de permettre la bidirectionnalité de la puissance, est qu'il facilite également un contrôle précis de la puissance active. Cela est réalisé en maintenant la tension du bus continu à un niveau constant, ce qui contribue à stabiliser l'ensemble du système. De plus, il est possible de fixer la puissance réactive de référence à une valeur strictement nulle, ce qui garantit de ne pas altérer la qualité du réseau électrique. Cela se traduit, entre autres, par un facteur de puissance du réseau qui demeure à une valeur unitaire idéale [58].

○ Modélisation du convertisseur coté réseau (CCR)

Le convertisseur côté réseau a la même conception que le convertisseur côté machine présentée précédemment.

- ✓ L'inductance (L) et la résistance (R) représentent l'impédance de ligne.
- ✓ V représente la tension de ligne.
- ✓ U_c la tension de sortie redressée.

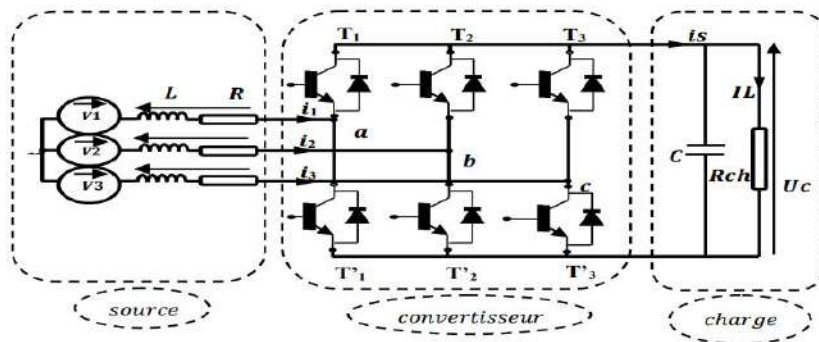


Figure.2.17. Structure du redresseur à MLI

• **Source d'alimentation (modèle du filtre passif)**

C'est une source triphasée supposée parfaitement sinusoïdale et équilibrée en série avec une résistance R et une inductance L représentant respectivement la résistance et l'inductance totales de la ligne.

Les tensions de lignes sont données par [59] :

$$\begin{cases} V_1 = R \cdot i_1 + L \cdot \frac{di_1}{dt} + V_{an} \\ V_2 = R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + V_{bn} \\ V_3 = R \cdot i_3 + L \cdot \frac{di_3}{dt} + V_{cn} \end{cases} \quad (2.66)$$

Où : V_{an} , V_{bn} et V_{cn} sont les tensions simples par rapport au neutre de la source à l'entrée du convertisseur. Les courants de chaque phase sont donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_1 - V_{an} \\ V_2 - V_{bn} \\ V_3 - V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

• **Partie Convertisseur**

Sachant que la structure du redresseur est identique à celle de l'onduleur déjà modélisé dans la section précédente, la matrice de connexion du pont est similaire à l'équation [64].

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

De plus, le courant redressé est donné par :

$$i_s = [S_1 \quad S_2 \quad S_3] \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

• **Partie charge**

Cette partie est constituée d'une capacité C en parallèle avec une résistance R qui représente une charge continue. Elle est régie par les deux équations électriques suivantes [56]:

$$\begin{cases} \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C} (i_s - i_{ch}) \\ U_c = R_{ch} i_{ch} \end{cases} \quad (2.70)$$

Ce qui permet d'obtenir la fonction de transfert entre tension et courant redressés :

$$\frac{U_c}{i_s} = \frac{R_{ch}}{1 + R_{ch}Cp} \quad (2.71)$$

D'après les relations précédentes, on peut établir le schéma fonctionnel global d'un redresseur MLI ayant comme entrée la commande des gâchettes des interrupteurs du haut (S_1, S_2, S_3) et comme sortie la tension redressée U_c .

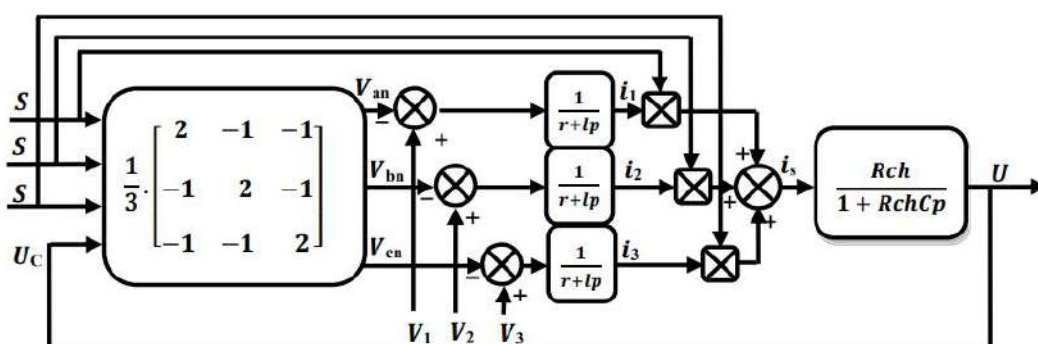


Figure.2.18. Schéma fonctionnel du redresseur à MLI

✓ **Commande du convertisseur coté réseau**

L'objectif de la commande de convertisseur côté réseau et de contrôler deux grandeurs importantes à savoir [60] :

- Maintenir la tension du bus continu à une valeur de référence désirée. Pour accomplir cette tâche, on doit mesurer la tension de bus continu et la régler à une valeur de référence.
- Maintenir la puissance réactive de référence à une valeur nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire.

La régulation du redresseur MLI peut se faire sous la forme d'une régulation cascade. Deux boucles internes régulent les courants des phases. Une boucle externe régule la tension de capacité, figure 2.18.

➤ La commande en courant du redresseur à MLI dans le repère (d, q)

Le correcteur PI n'est pas bien adapté pour commander des signaux alternatifs, la même chose pour le correcteur à hystérésis qui produit une fréquence de commutation variable. L'utilisation de ces régulateurs en triphasé nécessite plusieurs capteurs de courant et de tension. Afin d'éviter ces inconvénients, on utilise des correcteurs PI dans un repère tournant (repère d, q). La commande en courant dans ce repère est basée sur la séparation des axes l'un

de l'autres, ce qui permet de les contrôler indépendamment. Cette technique de commande à l'avantage de réduire le nombre de régulateurs ainsi que les grandeurs régulées qui seront des grandeurs continues.

• Application de la commande

Cette commande appliquée sur les tensions de lignes, est utilisée pour permettre un découplage entre le contrôle des puissances active et réactive. Les équations régissant les tensions de lignes dans le repère (d, q) sont :

$$\begin{cases} V_{pd} = -R \cdot i_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q + V_d \\ V_{pq} = -R \cdot i_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d + V_q \end{cases} \quad (2.72)$$

V_{pd} et V_{pq} : les composantes des tensions à l'entrée du convertisseur.

V_d et V_q : les composantes des tensions du réseau.

i_d et i_q : les composantes des courants du réseau.

ω : pulsation du réseau.

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} [V_d I_d + V_q I_q] \\ Q = \frac{3}{2} [V_q I_d - V_d I_q] \end{cases} \quad (2.73)$$

Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

On pose : $P_{ref} = U_{cmes} I_{red-ref}$ et $Q_{ref} = 0$

- ✓ La tension de référence désirée du bus continu U_{cref} est comparée à celle mesurée aux bornes du condensateur U_{cmes} .
- ✓ Le correcteur Proportionnel Intégral (PI) permet de maintenir la tension de bus continu à une valeur constante désirée, et génère le courant de référence I_{cref} .
- ✓ La puissance active nécessaire pour charger ce condensateur P_{ref} est obtenue en multipliant le courant redressé $I_{red-ref}$ par la tension mesurée U_{cmes} .
- ✓ La puissance réactive de référence Q_{ref} sera maintenue nulle.
- ✓ Les courants de références sont obtenus à partir des tensions mesurées et des puissances de références.
- ✓ Les courants de références seront comparés avec les courants mesurés.
- ✓ Les erreurs de comparaison des courants sont réglées par des régulateurs PI qui génèrent des tensions de références qui seront comparées à leur tour avec les tensions mesurées.
- ✓ Les erreurs de comparaisons des tensions génèrent des tensions qui seront comparées à leur tour avec les tensions du filtre.

- ✓ Les erreurs de comparaisons des courants génèrent des tensions de commande employées pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture.
- ✓ Le schéma bloc de la régulation est alors représenté par la figure 2.19.

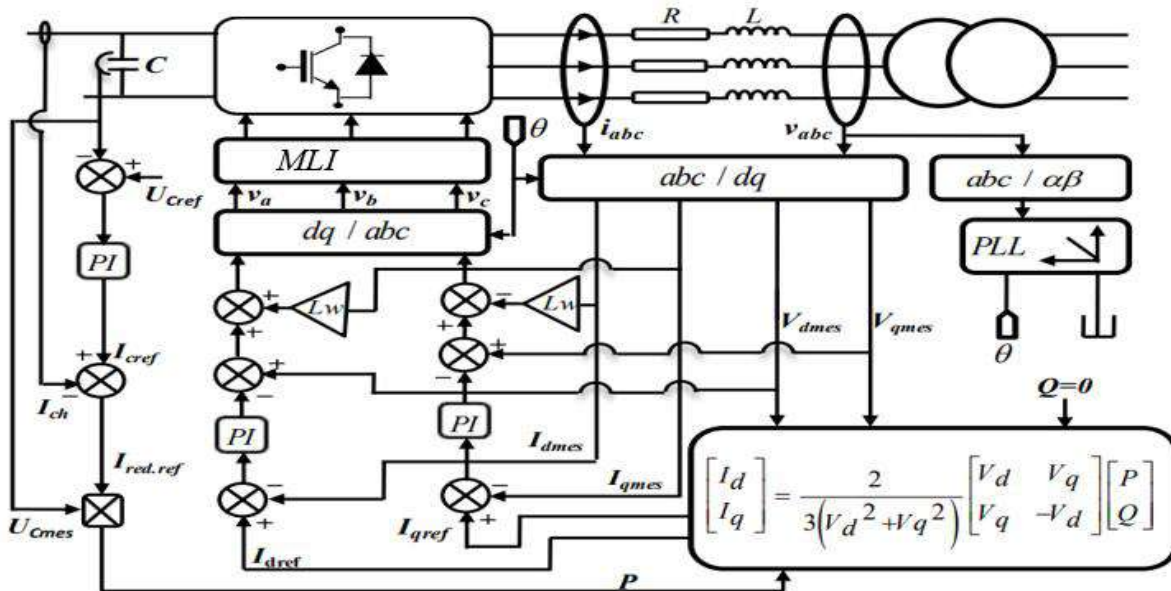


Figure.2.19. Schéma bloc de la commande en courant du redresseur à MLI dans le repère (d, q)

Le calcul des gains des régulateurs se fait avec la méthode classique, pour les deux boucles internes des courants et la boucle externe de tension représentées dans la figure 2.20.

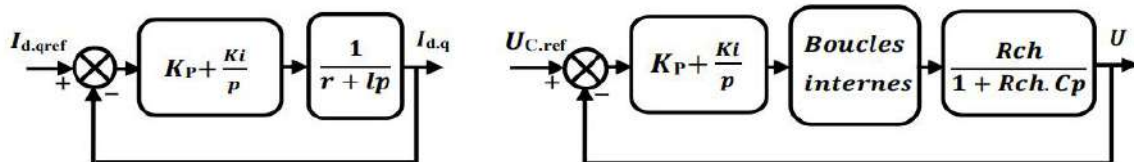


Figure.2.20. Boucles de régulation équivalentes des courants et de la tension

2.5. Résultats de simulation et discussion

2.5.1. Résultats de simulation de la turbine

Ces résultats de simulations sont obtenus pour une éolienne qui présente les paramètres suivants : Nombre de pale = 3. Diamètre d'une pale R = 3 m.

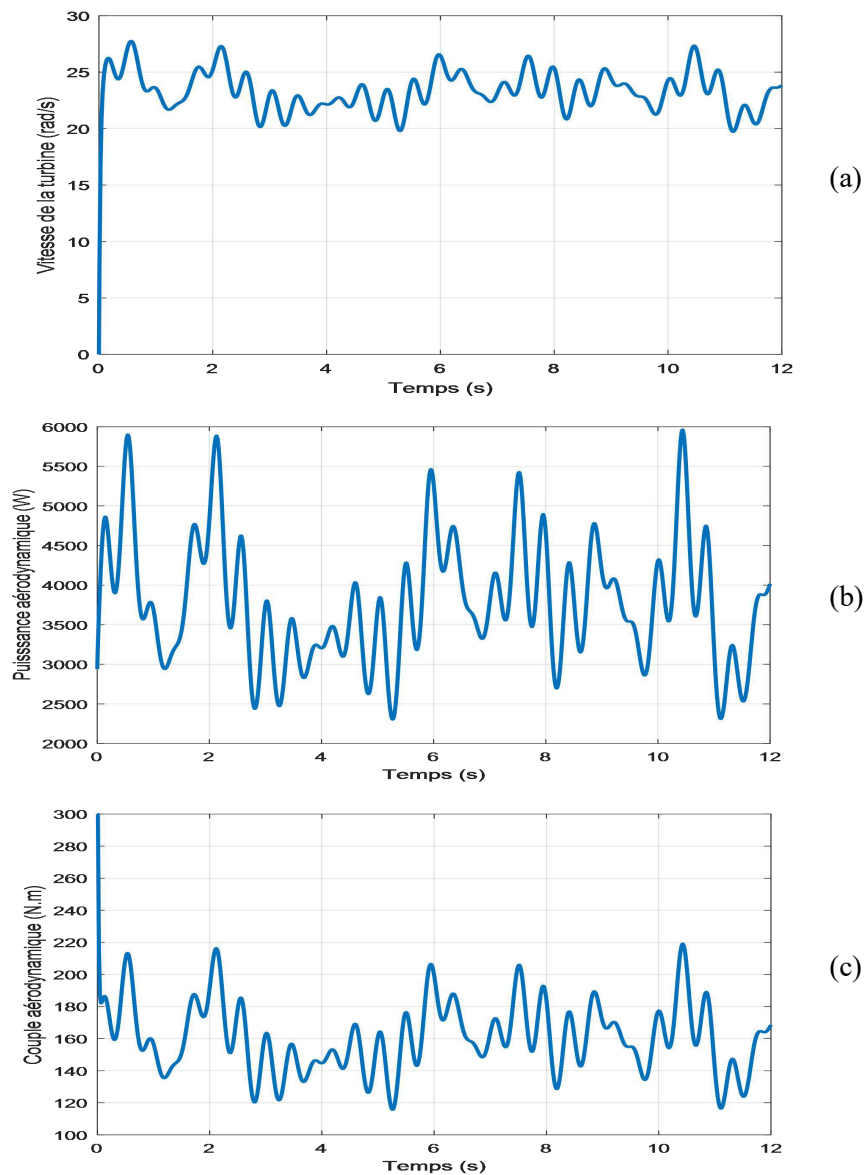
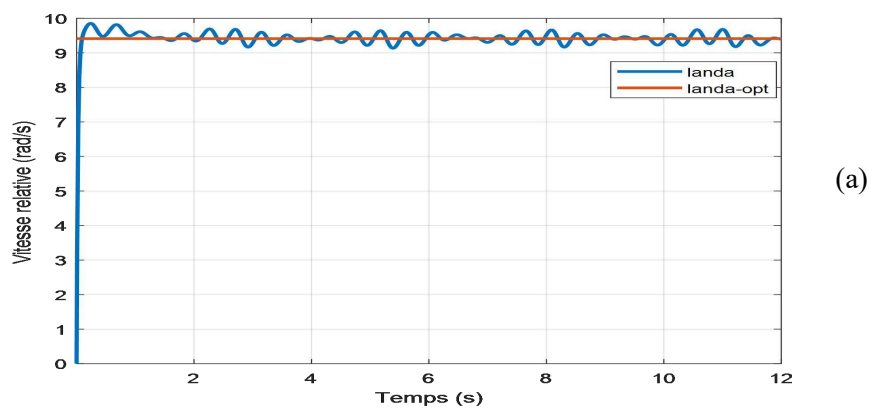


Figure.2.21. (a) Vitesse de la turbine, (b) Puissance aérodynamique et (c) Couple aérodynamique



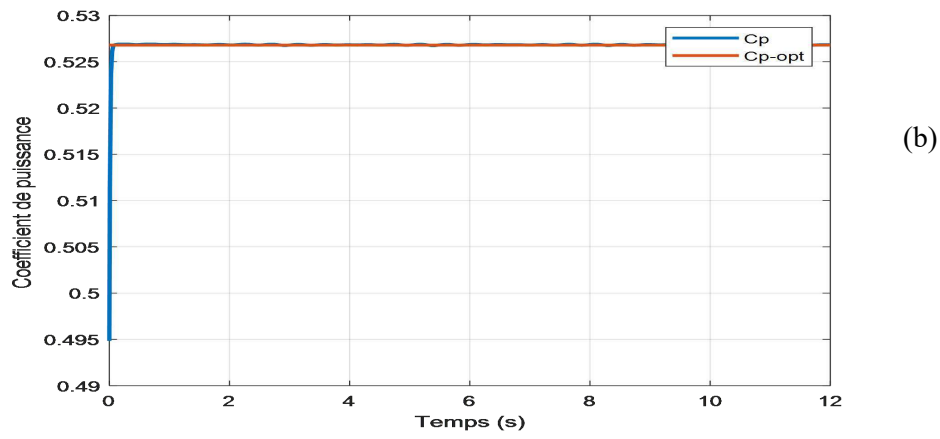


Figure.2.22. (a) Vitesse relative et (b) Coefficient de puissance

2.5.2. Résultats de simulation de la GADA

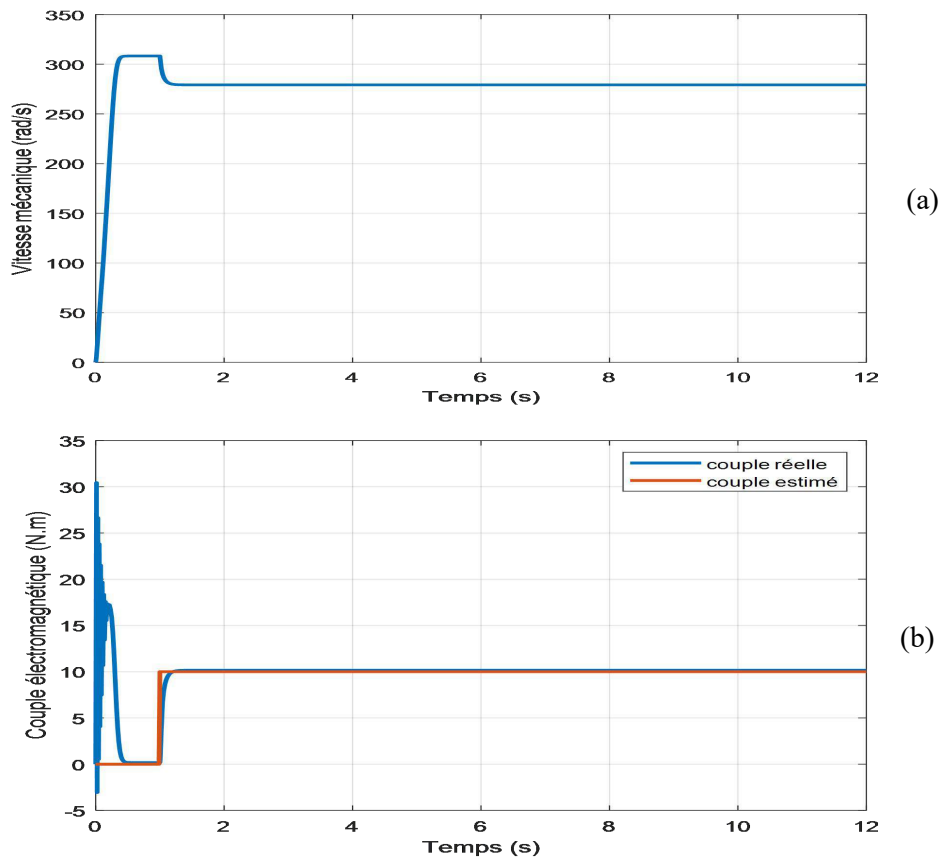


Figure.2.23. (a) Vitesse mécanique et (b) Couple électromagnétique

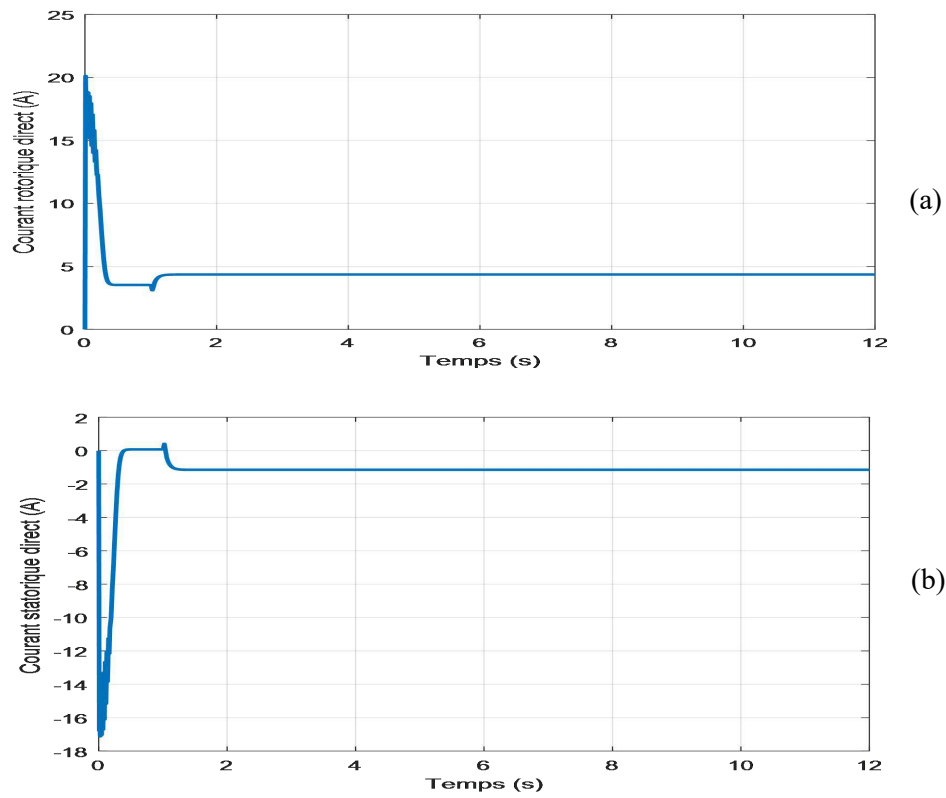


Figure.2.24. Courants statoriques (I_{sq} et I_{sd}) selon le repère (d,q)

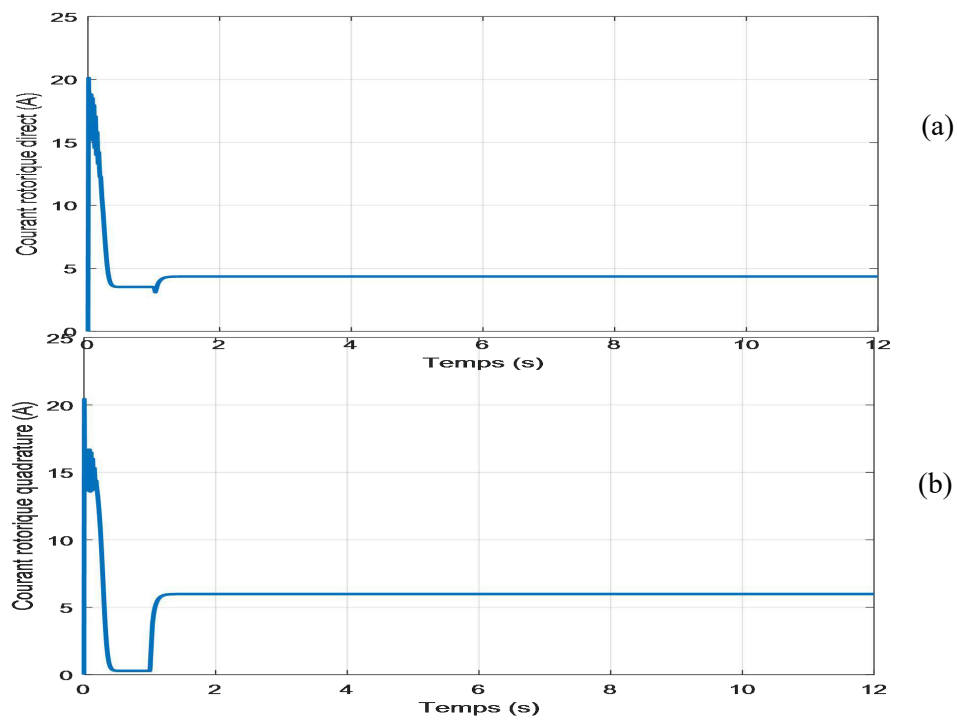


Figure.2.25. Courants rotoriques (I_{rd} et I_{rq}) suivant le repère (d, q)

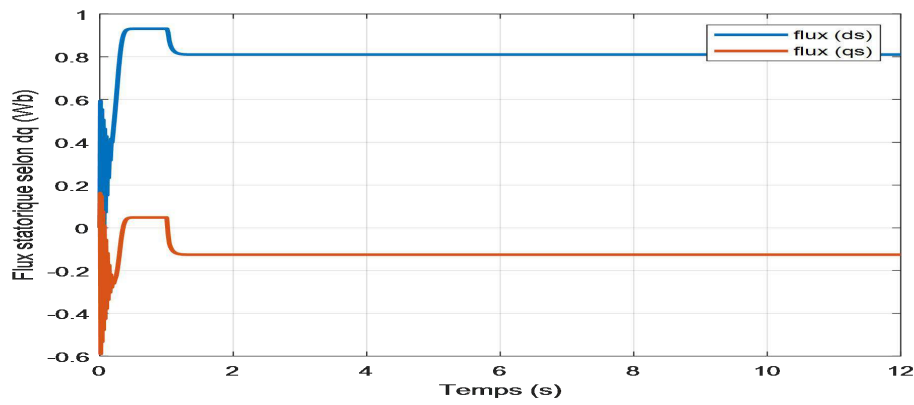


Figure.2.26. Flux statoriques (φ_{sd} et φ_{sq}) selon le repère (d, q)

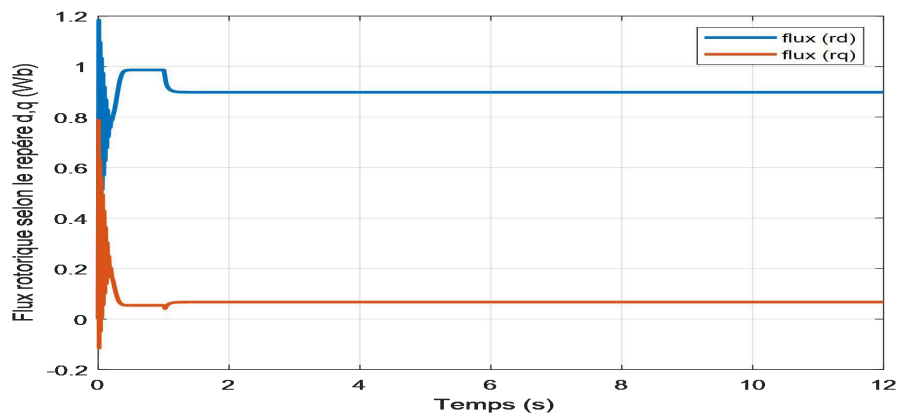


Figure.2.27. Flux rotoriques (φ_{rd} et φ_{rq}) selon le repère (d,q)

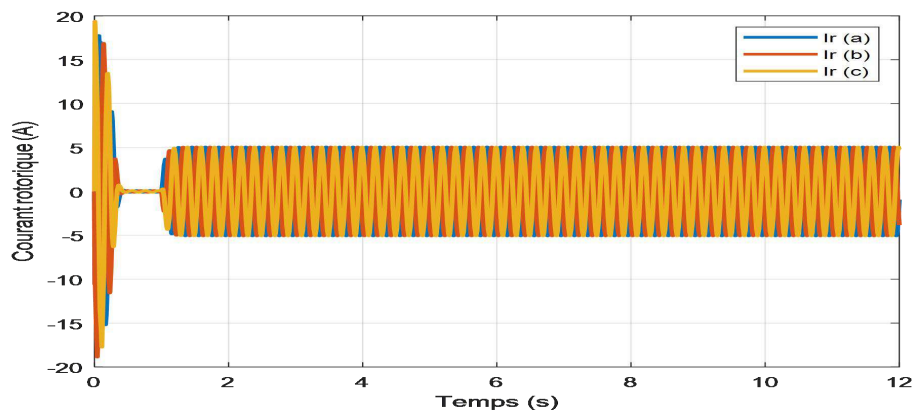


Figure.2.28. Courants rotoriques

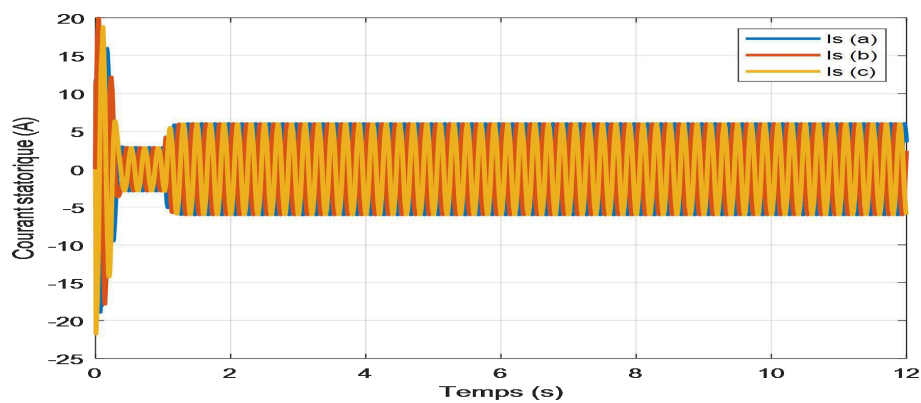


Figure.2.29. Courants statoriques

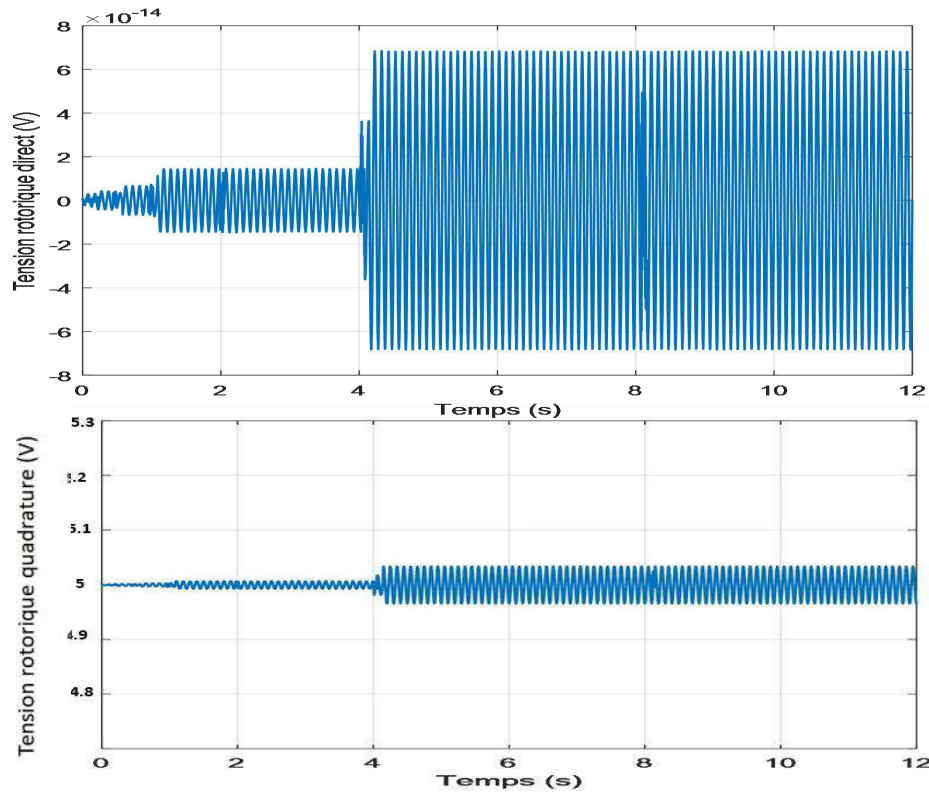


Figure.2.30. Tensions rotoriques (V_{rd} et V_{rq}) suivant le repère (d,q)

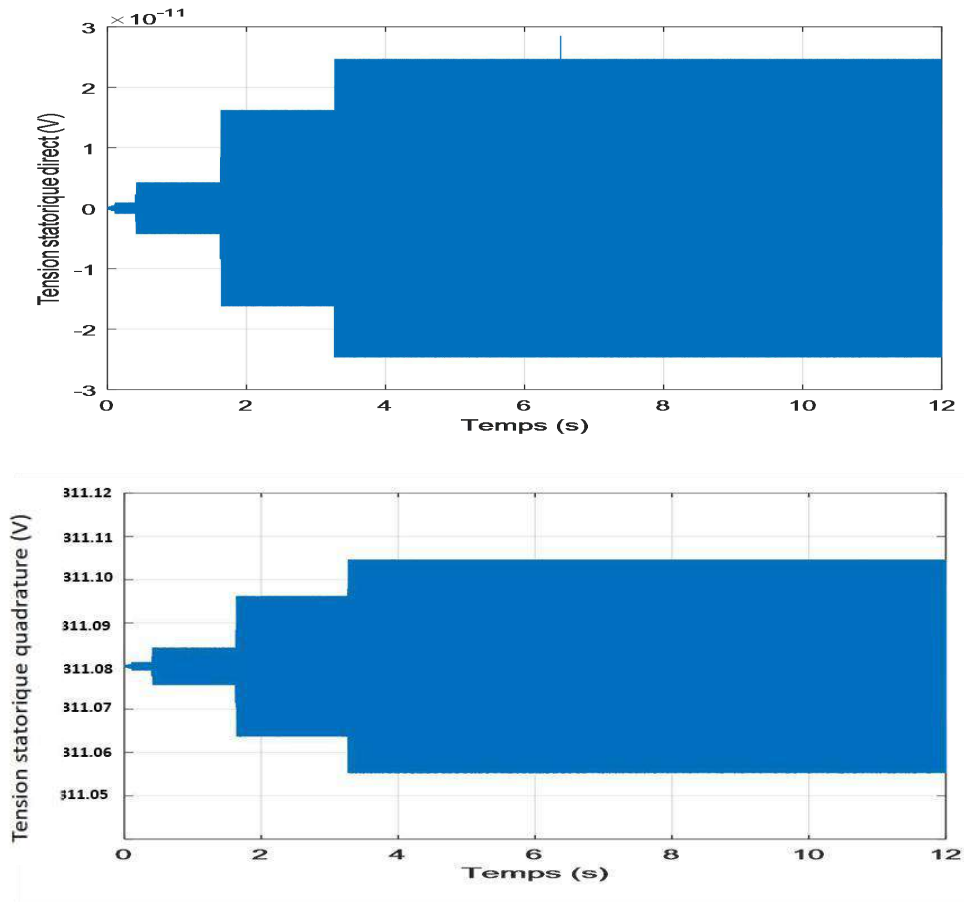


Figure.2.31. Tension statoriques (V_{sd} et V_{sq}) selon le repère (d,q)

2.5.3. Interprétations des résultats

Les résultats de simulation montrent que la variation de la vitesse mécanique est adaptée à celle du vent. La puissance aérodynamique varie entre 2000 W et 6000 W, en fonction de la vitesse du vent et du C_p . Les oscillations de la puissance et de la vitesse expliquent directement les fluctuations du couple. On remarque que le coefficient de puissance et la vitesse spécifique gardent leurs valeurs optimales. Cela permet d'avoir la puissance extractible maximale. Grâce à l'évolution du coefficient de puissance, on peut voir qu'il est approximativement à sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle fixe β ($\beta = 0$) qui nous donne un λ optimal. Il convient de noter qu'il atteint une valeur maximale de 0,5. Ces résultats de simulation montrent la fiabilité du contrôle de la vitesse du vent. Les résultats de la simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse du générateur, et ce dernier, est adapté à la variation de la vitesse du vent. Cela montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

Les figures de (2.23) jusqu'à (2.31) représentent le fonctionnement de la GADA à vide. On peut voir que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant que l'état soit établi. En outre, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche de zéro (figure 2.23) (présence de friction visqueuse). L'application du couple résistif entraîne une augmentation du couple électromagnétique, une augmentation de l'amplitude des courants statoriques et une diminution de la vitesse due à un glissement plus important qui se reflète dans les courants du rotor.

2.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation, la simulation et l'analyse d'un système éolien. Nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents constituants du système éolien. En effet, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été mis en place à savoir le profil du vent appliqué, le coefficient de puissance, ainsi que les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été développés. Par la suite, nous avons modélisé, dans une première étape, la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park (Repère biphasé (d,q)) lié au champ tournant qui réduit la complexité du modèle, puis, dans une seconde étape, l'onduleur qui alimente le rotor de la GADA permettant ainsi l'application des commandes pour contrôler les puissances générées par le stator de la machine. Enfin, on a considéré à la modélisation de l'alimentation de l'onduleur qui est un redresseur triphasé, ainsi qu'à sa commande MLI afin de contrôler par la suite le bus continu et le maintenir à une valeur constante dans le but d'améliorer le facteur de puissance du côté réseau. Les modèles de la chaîne de conversion ont été simulés par le logiciel MATLAB.

Dans le prochain chapitre, nous avons proposé différentes stratégies de commande de la turbine éolienne pour faire une étude comparative au point de vue maximisation de la puissance extraite aérodynamique.

Chapitre 3

Commande de la partie mécanique

3.1. Introduction

Une 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. Dans ce chapitre, on s'intéresse, essentiellement, à la commande de la turbine éolienne. L'objectif visé est l'élaboration de la commande du suivi du point de fonctionnement maximal (MPPT). Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine. Des modèles analytiques de la turbine éolienne seront réalisés et comparés en utilisant différentes méthodes d'extraction du maximum de puissance MPPT.

La commande du suivi du point de fonctionnement maximal (MPPT) sera élaborée par plusieurs types de régulateurs : un régulateur basé sur une loi linéaire de type PI, un régulateur basé sur la technique non linéaire par mode glissant MG, un régulateur basé sur la commande backstepping, un régulateur par logique floue. La comparaison des différents régulateurs montrera que ce dernier est le plus performant.

3.2. Aspect général de la commande d'une chaîne de production éolienne

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la figure 3.1. Elle schématise l'ensemble des différents composants à commander dans une chaîne de production éolienne. Commencent par la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit « MPPT » (Maximum Power Point Tracking), puis la commande du CCM en contrôlant les puissance active et réactive statorique de la GADA, et finalement la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissance active et réactive échangées avec le réseau [61].

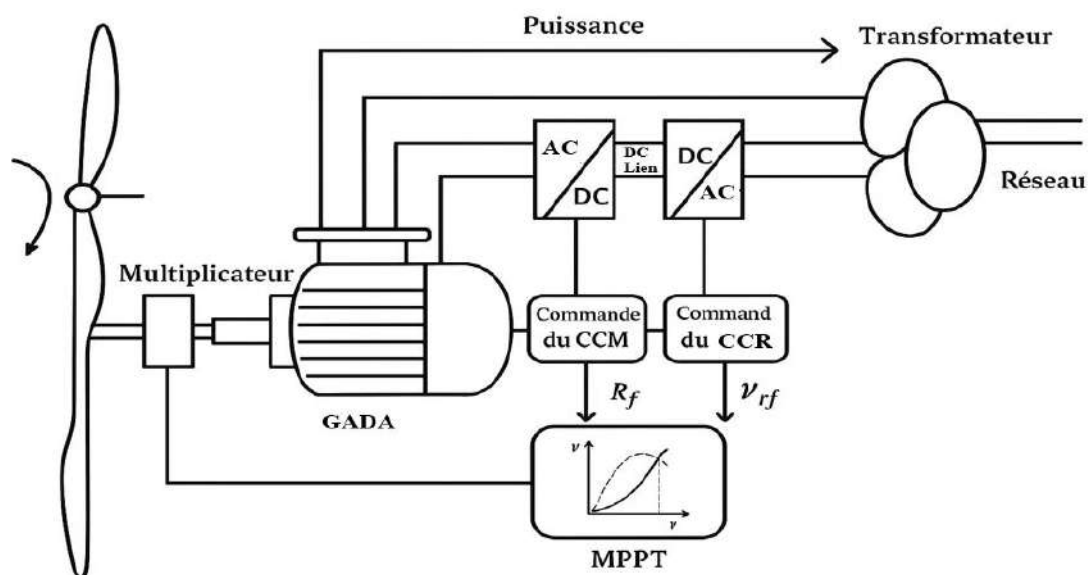


Figure.3.1. Architecture de commande du système éolien

3.3. Stratégie de la commande de la turbine éolienne

3.3.1. Extraction du maximum de la puissance du vent

Les objectifs de la régulation mécanique sont assurer l'extraction du maximum de la puissance du vent et la sécurité de l'éolienne contre le vent trop fort. Cette source éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale P_{mn} à partir d'une vitesse de vent nominale V_{vn} . Au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent être modifier afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes [61] :

- La vitesse du vent la plus basse est appelée vitesse de démarrage V_{vd} , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,

- la vitesse maximale du vent V_{vmax} , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement (protéger ses parties mécaniques des effets néfastes des grandes vitesses du vent).

Entre ces deux vitesses, la production de la puissance varie avec la vitesse du vent, comme indiqué sur la figure 3.2.

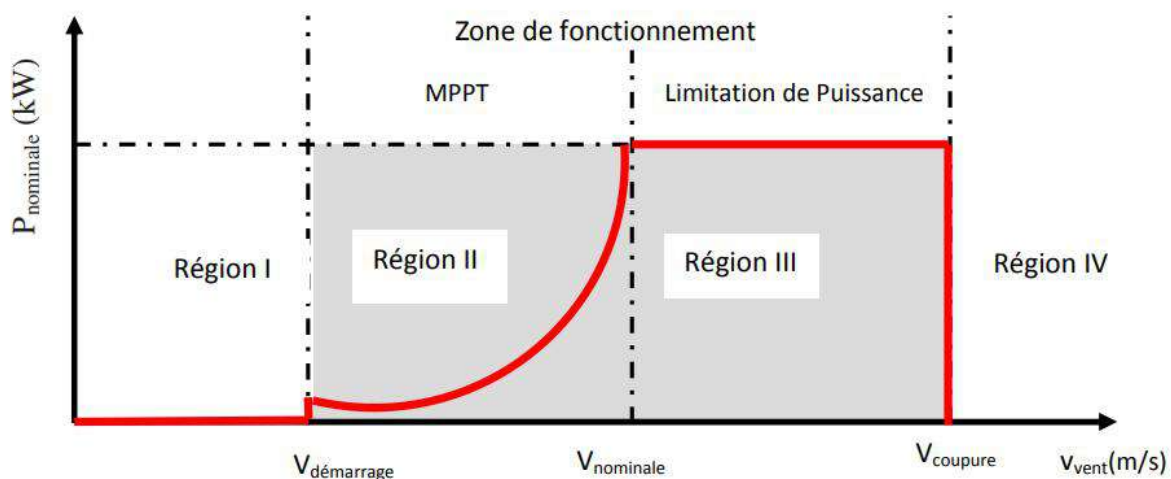


Figure.3.2. Régions de fonctionnement d'une éolienne

La courbe de puissance permet de définir quatre régions de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent, comme le montre la figure 3.2 :

- La région I : $V_{vent} < V_{démarrage}$ où $P = 0$: phase d'attente (vent insuffisant pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance).

- La région II : $V_{démarrage} < V_{vent} < V_{nominale}$: la vitesse du vent atteint une vitesse du démarrage minimale V_d à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie. La puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent, est appliquée tout en maintenant un angle de calage nul. Ce processus continu jusqu'à ce que le vent atteigne la

vitesse nominale V_{vn} correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n (production normale jusqu'à atteindre la puissance nominale).

➤ La région III : $V_{nominale} < V_{vent} < V_{coupure}$: la vitesse de rotation est maintenue constante (régulation de puissance à sa valeur nominale) ; la vitesse de rotation de la turbine est limitée à une valeur maximale pour limiter la puissance P fournie par l'éolienne égale à la puissance nominale P_n , en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Ceci est assuré par le système a calage ou a pas variable « Pitch control ».

➤ La région IV : $V_{vent} > V_{coupure}$: la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, afin de ne pas subir de dégâts dès que le vent a atteint sa valeur maximale V_n , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée pour que la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne ; les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta=90^\circ$).

3.3.2. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Il existe deux techniques principales pour cette régulation de puissance :

3.3.2.1. Système à décrochage aérodynamique « Stall »

Le comportement aérodynamique des pales évolue également d'une manière passive selon le rapport entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. En effet les pales peuvent être conçues de façon à ce qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la turbulence provoquée par le profil des pales entraîne un décrochage aérodynamique et par suite une décroissance du couple capté par chacune des pales. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales. Les pales sont fabriquées avec un pas variant suivant la position le long de la pale, permettant ainsi le décrochage aérodynamique qui se produit progressivement d'abord près du rayon moyen puis de plus en plus près de bout de la pale. Ce genre de contrôle passif de la puissance captée par les pales est appelé (stall-régulation) ou (régulation par décrochage aérodynamique) [62].

3.3.2.2. Régulation du système a calage « Pitch control »

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Ce système de régulation par variation de l'angle de calage « β » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la région III de vitesses. C'est la régulation par mise en drapeaux, soit augmenter l'angle de calage, ce qui diminue l'angle d'incidence. Ce système permet également de freiner la turbine si nécessaire [62].

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants [62] :

- ✓ Il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations du vent (bien sûr en dessous de la limite de sécurité).
- ✓ Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage stall pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- ✓ Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise de vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.

✓ Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grandes vitesses.

On développe une loi de régulation pour l'angle de calage est développée pour limiter la puissance P fournie par l'éolienne. L'angle du vent relatif par rapport au plan de rotation de l'hélice se calcule de la manière suivante [62] :

$$\delta = \arctan \frac{\Omega_t R}{V_v} \quad (3.1)$$

La relation qui permet d'obtenir l'angle d'incidence (α) du vent relatif qui attaque le profil de la pale s'exprime par :

$$\alpha = \delta + \beta \quad (3.2)$$

L'angle de calage des pales (β) est adapté en permanence afin de maximiser le rendement de l'hélice afin d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible. La figure 3.3 représente le schéma bloc de contrôle de (β) :

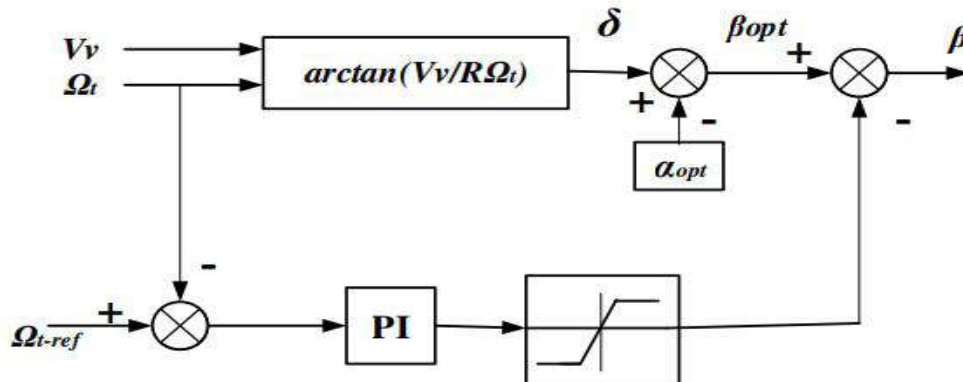


Figure.3.3. Schéma bloc du control du l'angle de calage

3.4. Optimisation de la conversion énergétique d'une éolienne à vitesse variable

L'utilisation de l'énergie éolienne est cruciale pour le développement énergétique mondial, en raison de sa durabilité et de son respect de l'environnement. Toutefois, la variabilité de cette source d'énergie nécessite une optimisation des turbines et de leurs contrôles pour extraire un maximum de puissance. Divers algorithmes ont été créés pour identifier les points de fonctionnement optimaux pour un transfert de puissance maximal. En règles générales, ces algorithmes gèrent le fonctionnement des turbines selon leurs caractéristiques internes. Le suivi du point de puissance maximale MPPT, un ensemble de techniques de conversion d'énergie éolienne. Diverses études sont menées pour obtenir de meilleures techniques MPPT plus rapides pour le système de conversion de l'énergie éolienne (SCEE).

3.4.1. Principe de la MPPT

Le principe de la stratégie du MPPT consiste, pour un angle de pale donné, à ajuster, en fonction de la vitesse du vent V_v , la vitesse de rotation de la turbine à une valeur de référence Ω_{mec}^* pour maintenir une vitesse relative optimale et donc un coefficient de puissance maximal C_{pmax} .

Avec,

$$\Omega_{mec}^* = \left(\frac{V_v \lambda_{opt}}{R} \right) \cdot G \quad (3.3)$$

C'est l'action sur le couple électromagnétique (et donc sur la puissance convertie par la génératrice) qui va permettre d'obtenir Ω_{mec}^* et ainsi maximiser la puissance extraite avec le maintien de C_{pmax} .

Dans ce travail, nous allons concentrer plus spécialement sur les points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la région 2. En réalité, dans cette région, nous considérerons que l'angle de calage des pales est constant et égale à deux (02). Pour contrôler le couple électromagnétique de la GADA dans cette région, il existe différentes stratégies de commande afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. Il existe deux familles de structures de commande [63] :

- ✓ La commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.
- ✓ La commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la GADA et le CCM sont idéaux : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la GADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

3.4.2. Stratégies de commande MPPT

La puissance de sortie d'un système éolien dépend de la vitesse du vent. En raison de la non-linéarité de l'éolienne, il est complexe de maintenir une puissance maximale constante. Cela a conduit au développement de plusieurs algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la production. Les turbines à vitesse variable permettent d'ajuster la vitesse de la génératrice pour maximiser la puissance dans la région où l'algorithme MPPT est appliqué. Cela optimise l'extraction d'énergie en ajustant la vitesse de la turbine tout en gardant un angle de calage 2. La sortie du système MPPT est une vitesse optimale Ω_{mec}^* donnée par l'expression 3.3 et variant selon la vitesse du vent capturé. Différentes techniques MPPT ont été explorées pour cet objectif, classées en trois familles selon les informations requises pour générer la référence de vitesse [64] :

- MPPT par contrôle du rapport de vitesse de pointe (TSR pour « Tip Speed Ratio ») ;
- MPPT par contrôle de couple optimal (OTC pour « Optimal Torque Control ») ;
- MPPT par contrôle de logique floue (FLC pour « Fuzzy logic controller »).

3.4.2.1. MPPT par contrôle du rapport de vitesse de pointe (RVP)

Dans ce cas, le constructeur de l'éolienne doit réaliser des essais en soufflerie pour caractériser le profil des pâles, ce qui implique de connaître le coefficient de puissance $C_p(\lambda)$. Cette caractérisation simplifie l'algorithme de recherche de la puissance maximale et permet d'utiliser des convertisseurs moins coûteux.

On mesure la vitesse du vent pour obtenir une vitesse de rotor optimale à partir du rapport de vitesse de pointe optimal (RVP), dérivé de la courbe de la turbine $C_p(\lambda)$. Pour un fonctionnement à puissance maximale, on cherche à maintenir la vitesse spécifique à sa valeur optimale λ_{opt} , c'est-à-dire celle pour laquelle le coefficient de puissance est à son maximum.

L'éolienne fonctionne constamment à (λ, C_{pmax}) . Il s'agit donc de faire varier la vitesse de rotation de la turbine $\Omega_{turbine}$ en fonction des variations de la vitesse du vent V_v . Pour cela, une boucle de régulation de vitesse est mise en œuvre et sa vitesse de référence est Ω_{mec}^* .

Le contrôle peut être effectué en agissant sur le couple sur l'arbre éolien. Il est donc supposé que le couple électromagnétique développé soit constant, indépendamment de la puissance générée. La méthode de contrôle RVP régule le rapport de vitesse de pointe à sa valeur optimale, garantissant ainsi une vitesse de rotation maximale et une extraction de puissance optimale. Cela nécessite la connaissance de la vitesse du vent, de la vitesse de la turbine et du point optimal qui peut être déterminé expérimentalement ou théoriquement.

La comparaison entre la référence et la valeur réelle est transmise au contrôleur pour donner la puissance de référence [65].

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine est :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (3.4)$$

$$P_t = C_t \Omega_t \quad (3.5)$$

Le couple électromagnétique est le suivant :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{R^2 \Omega_t^2 C_p}{\lambda^2 \lambda} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 \Omega_t^2 C_p}{\lambda^3} \quad (3.6)$$

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Cependant, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par l'anémomètre.

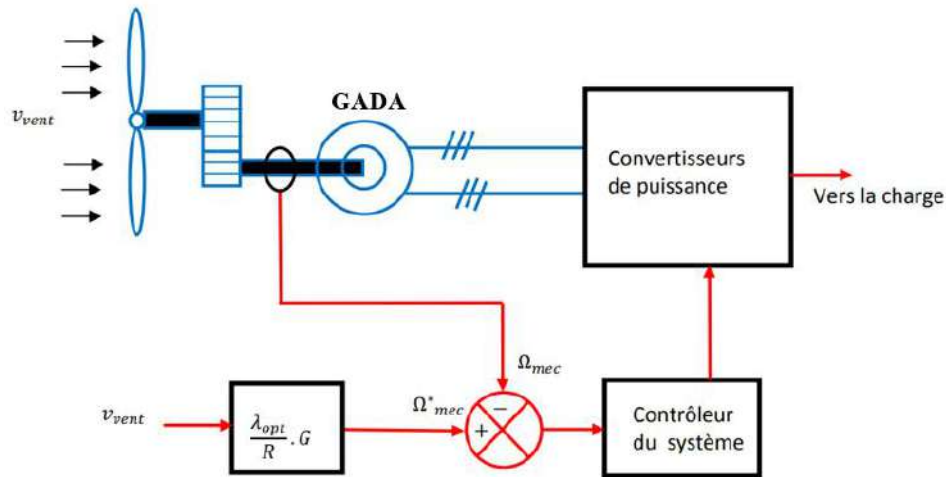


Figure.3.4. Principe de la méthode MPPT de (RVP)

3.4.2.2. MPPT par contrôle de couple optimal (CCO)

Le contrôle optimal du couple est une légère variante du contrôle CCO. Il ajuste le couple du générateur à son optimum à différentes vitesses de vent. Cependant, il nécessite la connaissance des caractéristiques de la turbine ($C_{p,max}$ et k_{opt}). C'est une méthode de contrôle de couple et l'expression de la courbe de couple optimale peut être donnée par l'expression (3.14). La figure 3.5 montre le couple de référence pour le contrôleur connecté à une éolienne [66].

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine est :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_v^3 = k \Omega_t^3 \quad (3.7)$$

Avec,

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(\lambda, \beta) \frac{R^5}{\lambda^3} \quad (3.8)$$

Pendant opération du l'algorithme MPPT compte tenu des conditions optimales, avec ;

$$\begin{cases} C_p = C_{p,max} \\ \lambda = \lambda_{opt} \\ \beta = \beta_{opt} \end{cases} \quad (3.9)$$

Par conséquent, on a :

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} C_{p,max} \quad (3.10)$$

Quand le rotor tourne à λ_{opt} , le coefficient de puissance est maximal $C_{p,max}$. On a donc :

$$P_{t,opt} = \frac{1}{2} C_{p,max}(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \rho \pi R^2 V_v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi \Omega_t^3 C_{p,max}(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) \frac{R^5}{\lambda^3} = k_{opt} \Omega_{t,opt}^3 \quad (3.11)$$

Avec,

$$P_{t,opt} = k_{opt} \Omega_{t,opt}^3 \quad (3.12)$$

D'après l'expression (3.10), on peut écrire :

$$P_{t_opt} = C_{t_opt} \Omega_{t_opt} \tag{3.13}$$

On déduit le couple optimal de la turbine :

$$C_{t_opt} = \frac{P_{t_opt}}{\Omega_{t_opt}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{R^2 \Omega_{t_opt}^2 C_{p_max}}{\lambda_{opt}^2 \lambda_{opt}} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^5 \Omega_{t_opt}^2 C_{p_max}}{\lambda_{opt}^3} \tag{3.14}$$

Donc, le couple aura la forme suivante :

$$C_{t_opt} = k_{opt} \Omega_t^2 \tag{3.15}$$

La relation entre K et la vitesse mécanique du rotor Ω_{mec} :

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(\lambda, \beta) R^2 \frac{(G.V_v)^3}{\Omega_{mec}^3} \tag{3.16}$$

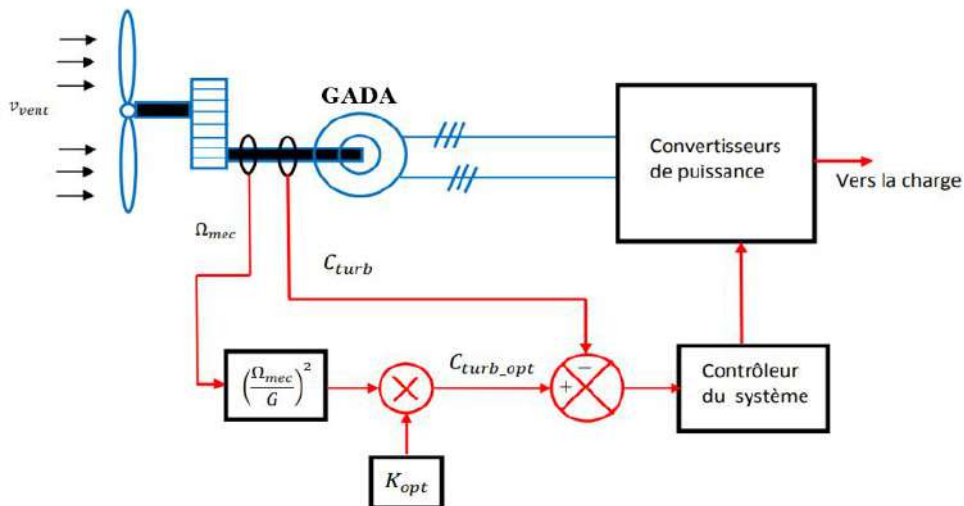


Figure.3.5. MPPT par contrôle de couple optimal (CCO)

En général, cette méthode est rapide. Cependant, l'efficacité est inférieure à celle des méthodes de contrôle TSR, car elle ne mesure pas directement la vitesse du vent.

3.4.2.3. MPPT par contrôle de logique floue (FLC)

Afin de suivre une référence de vitesse optimal du rotor , sans mesurer la vitesse du vent et sans la connaissance des caractéristiques de la turbine, un simple contrôleur MPPT basée sur la logique floue est proposé dans cette partie. Les règles floues sont basées sur la variation de la puissance éolienne (ΔP_m), et de la vitesse de rotation ($\Delta \Omega_m$). Les règles à respecter pour converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance éolienne (ΔP_t) et de variation de vitesse ($\Delta \omega_t$) qui donnent une consigne de couple (C_{ref}) et une consigne de vitesse (ω_{ref}) de l'éolienne [67].

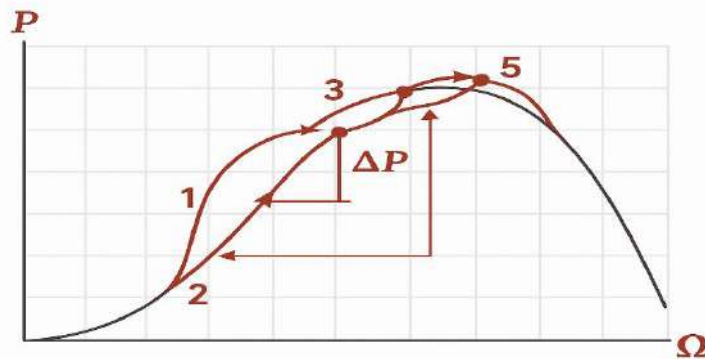


Figure.3.6. Principe de fonctionnement de MPPT

Le schéma de principe pour l'optimisation de la puissance par la logique floue est montré sur la figure 3.7.

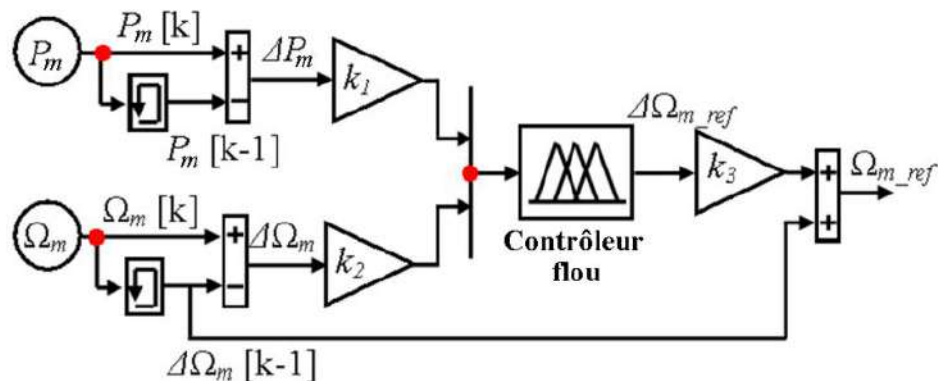


Figure .3.7. Schéma de principe pour l'optimisation de la puissance par la logique floue

D'après la figure 3.7 les variables (ΔP_m) et ($\Delta \Omega_m$) sont représentés comme des entrées, tandis que ($\Delta \Omega_{m_ref}$) représente la sortie. Cependant, la commande MPPT par logique floue est la plus efficace entre les méthodes mentionnées ci-dessus.

3.5. Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

En pratique, il est très difficile de mesurer la vitesse du vent car l'anémomètre est situé derrière le rotor de l'éolienne et le diamètre balayé par les pales de l'éolienne est très important. Dans ces conditions, on utilise un contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation qui est basé sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux C_f . Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [68] :

$$C_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{aer} - C_{em} - C_f \quad (3.17)$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux, par rapport au couple mécanique, on peut alors écrire :

$$C_{em} = C_{aer} \quad (3.18)$$

Alors, la référence du couple électromagnétique de la turbine est obtenue à partir d'une estimation du couple aérogénérateur :

$$C_{em}^* = \frac{C_{aer_estim}}{G} \quad (3.19)$$

Pour une valeur constante de l'angle d'orientation des pales et du rapport de vitesse égale à sa valeur maximale (λ_{opt}), la vitesse du vent peut être estimée :

$$V_{vent_estim} = \frac{\Omega_{turb_estim} \cdot R}{\lambda} \quad (3.20)$$

Le principe de la commande MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation est basé sur la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice, donc à partir de cette mesure on peut estimer la vitesse de rotation de la turbine comme suit :

$$\Omega_{turb_estim} = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (3.21)$$

Ce qui conduit que le couple aérogénérateur est lui-même estimé en fonction de la vitesse du vent et la vitesse de la turbine :

$$C_{aer_estim} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turb}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_{vent_estim}^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turb_estim}} \quad (3.22)$$

A partir de ces relations on a :

$$C_{em}^* = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{méc}^2}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda^3} \quad (3.23)$$

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

Le couple électromagnétique estimé doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em}^* = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{méc}^2}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \quad (3.24)$$

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 de la vitesse de rotation est illustrée par la figure suivante :

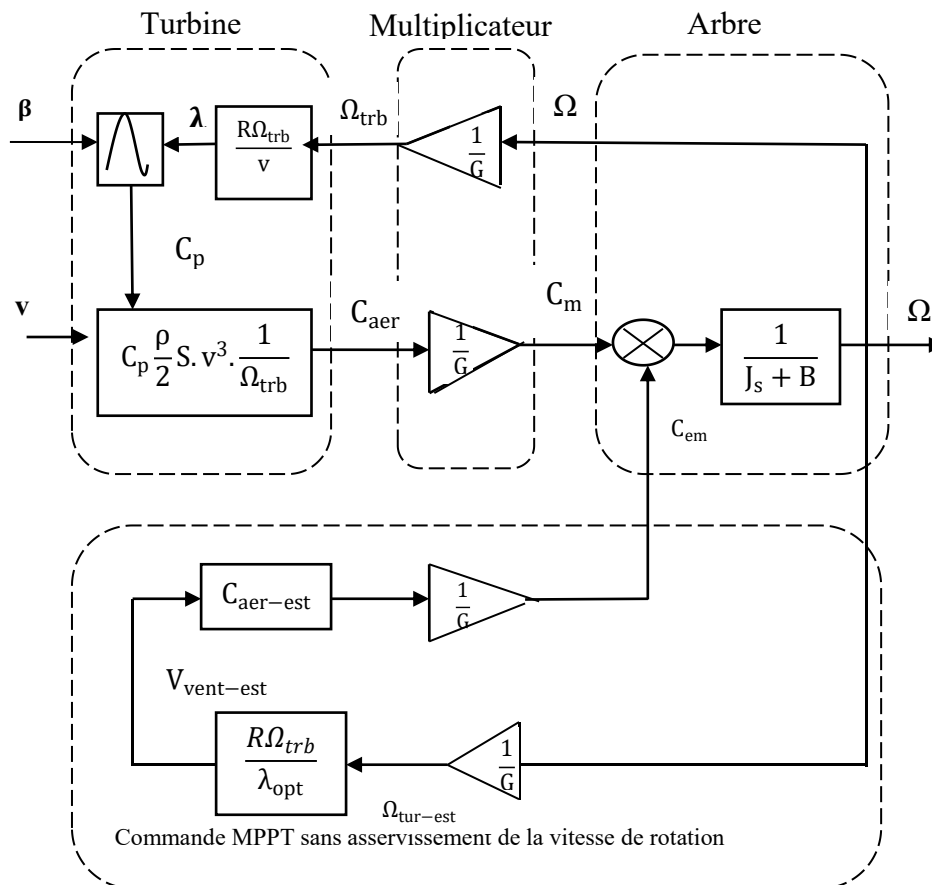


Figure.3.8. Schéma bloc de Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

3.6. Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien et crée donc des variations de puissance. Cet asservissement consiste à déterminer la vitesse de la turbine, qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Le correcteur de vitesse doit assurer deux (2) objectifs [69] :

- ✓ Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- ✓ Atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La stratégie de commande consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la GADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la GADA doit être effectué, comme le montre la figure 3.9, où la vitesse du vent mesurée V_v est utilisée pour produire la vitesse de référence du générateur Ω_{em}^* en fonction du rapport de vitesse optimale λ_{opt} . Celle-ci est obtenue si le coefficient C_p est égal à sa valeur optimale C_{pmax} (pour β constant et égal à 2°).

Dans ce cas, le couple est contrôlé pour imposer une vitesse de référence [70].

Quand le couple électromagnétique est égale à sa valeur de référence on a :

$$C_{mec} = C_{mec_ref} \tag{3.25}$$

On suppose que la génératrice et son variateur sont idéaux :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J_t} (C_{mec} - C_{em} - f_v \Omega_{mec}) \tag{3.26}$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{mec_ref} = C(p) \cdot \Omega_{mec_ref} - \Omega_{mec} \tag{3.27}$$

Avec,

$C(p)$: correcteur du système.

La vitesse mécanique de référence est exprimée par la relation suivante :

$$\Omega_{mec_ref} = G \cdot \Omega_{tur_ref} \tag{3.28}$$

Ω_{mec_ref} Correspond à celle correspondante à la valeur optimale du rapport de vitesse λ_{opt} . On fixe l'angle de calage β^0 à 0.

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \tag{3.29}$$

La vitesse de rotation de référence Ω_{mec}^* de la GADA est obtenue à partir des équations (3.28), (3.29) et elle est définie par :

$$\Omega_{mec}^* = \left(\frac{V_v \lambda_{opt}}{R} \right) \cdot G \tag{3.30}$$

Le schéma bloc de la commande de la vitesse mécanique est représenté par la figure ci-dessous :

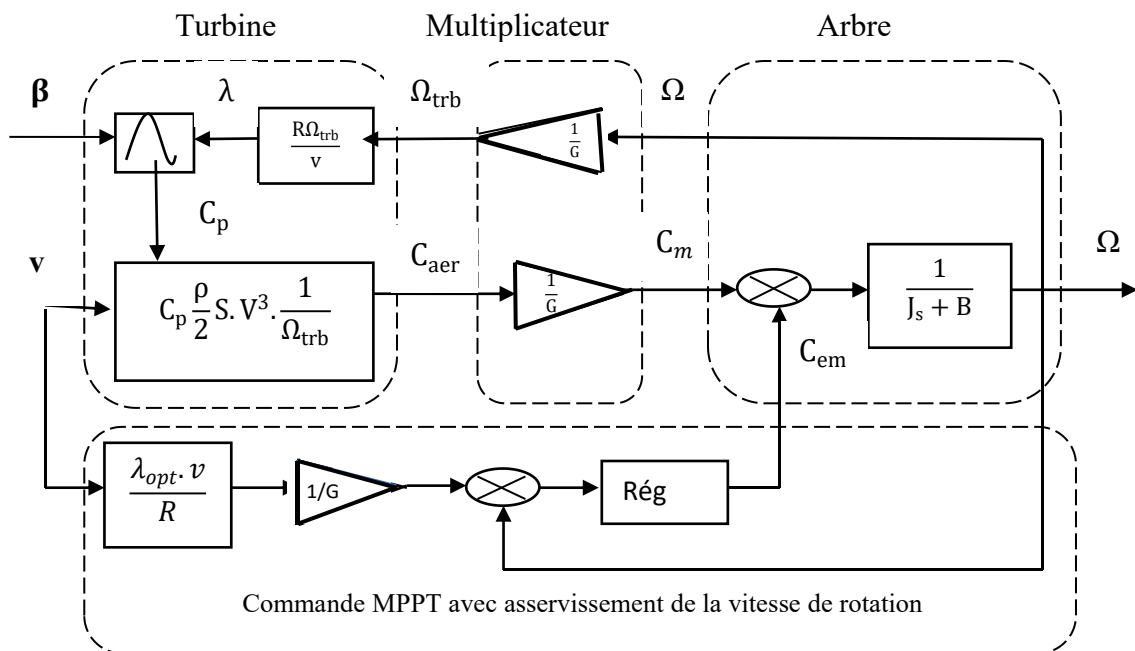


Figure.3.9. Schéma bloc de Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

3.6.1. Asservissement de la vitesse

Différentes technologies de correcteurs peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse. On considère quatre (4) types de régulation dans ce travail :

- ✓ Une régulation basée sur une loi linéaire de type PI.
- ✓ Une régulation basée sur la technique non linéaire par mode glissant MG.
- ✓ Une régulation basée sur la commande backstepping.
- ✓ Une régulation par logique floue.

En considérant, la boucle de contrôle, le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em}^* = Reg(\Omega_{em}^* - \Omega_{mec}) \quad (3.31)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondante à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{opt} (on fixe l'angle de calage $\beta = 2^\circ$)

Avec,

Rég : régulateur de vitesse ;

Ω_{mec}^* : vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse mécanique de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turb-ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{mec}^* = G \cdot \Omega_{turb}^* \quad (3.32)$$

$$\Omega_{turb}^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_{vent}}{R} \quad (3.33)$$

3.6.1.1. Régulateur proportionnel intégral (PI)

Dans l'industrie, les algorithmes de contrôle des processus les plus couramment utilisés sont à base de contrôleur PI, en raison de sa simplicité en termes de structure qui est facilement comprise et de sa mise en œuvre de manière pratique [71]. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale de système de génération éolien. Dans le cas d'un régulateur proportionnel intégral (PI), la boucle de régulation de vitesse sera définie par les paramètres (k_{pw} , k_{iw}) du contrôleur pour les actions proportionnelles et intégrales respectivement. Ils sont calculés sur la base des expressions de la fonction de transfert en boucle ouverte et fermée. Ce type de régulateur est une combinaison d'action proportionnelle et intégrale. Elle a pour effet d'améliorer simultanément les états stable et transitoire [71].

Ce contrôleur PI calcule une valeur "d'erreur" comme étant la différence entre une variable de processus mesurée et un point de consigne souhaité. La figure 3.10. montre le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse.

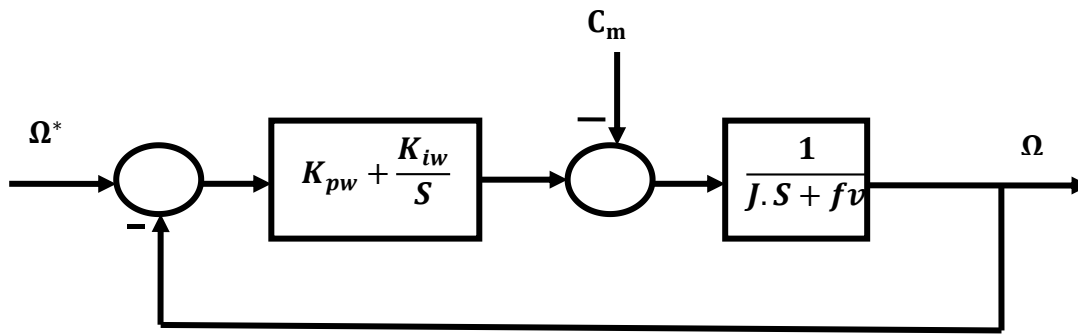


Figure.3.10. Boucle de régulation de la vitesse de rotation par un régulateur PI

Le rôle du contrôleur est de minimiser l'erreur entre la valeur de référence et la valeur mesurée de la vitesse mécanique en contrôlant le couple électromagnétique de la génératrice. Pour la synthèse du régulateur utilisé nous avons choisi la méthode de compensation des pôles. Il existe plusieurs méthodes pour synthétiser. En ce qui concerne, ce travail, on s'intéresse à la méthode de placement de pôle.

La fonction de transfert liant la vitesse aux couples est :

$$\frac{\Omega}{C_{em} - C_m} = \frac{1}{J \cdot s + f_v} \quad (3.34)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par :

$$G_{BO} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{k_{p\omega} \cdot s + k_{i\omega} \cdot J \cdot s}{J \cdot s^2 + f_v \cdot s} \quad (3.35)$$

En boucle fermée, on obtient une fonction de transfert du deuxième ordre :

$$G_{BF} = \frac{\Omega}{\Omega^*} = \frac{\frac{k_{p\omega} \cdot s + k_{i\omega}}{J}}{s^2 + \frac{k_{p\omega} + f_v}{J} \cdot s + \frac{k_{j\omega}}{J}} \quad (3.36)$$

Dont la forme standard est de la forme :

$$G(s) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (3.37)$$

Où, ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation propre.

La fonction de transfert (3.37) possède une dynamique de 2^{ème} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_n}\right) S + 1 \quad (3.38)$$

L'identification terme à terme permet d'écrire :

$$\begin{cases} 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{k_{p\omega} + f_v}{j} \\ \omega_n^2 = \frac{k_{i\omega}}{j} \end{cases} \quad (3.39)$$

Finalement, les relations suivantes donnent les expressions des paramètres $k_{p\omega}$ et $k_{i\omega}$:

$$\begin{cases} k_{p\omega} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J - f_v \\ k_{i\omega} = J \cdot \omega_n^2 \end{cases} \quad (3.40)$$

Pour optimiser les performances dynamiques et la stabilité du système, on opte pour un coefficient d'amortissement en boucle fermée ξ de valeur égale à 0,8 et un temps de réponse, $t_r = 5\%$.

La réponse optimale est obtenue pour un coefficient d'amortissement :

$$t_r = \frac{3}{\xi \omega_0} \quad (3.41)$$

$$\omega_n = \frac{3}{\xi (t_r/2)} \quad (3.42)$$

3.6.1.2. Régulateur par mode glissant

La commande par mode glissant (CMG) est une classe de la commande robuste à structure variable [72]. Cette dernière a connu un grand succès ces dernières années. Pour une large gamme de classes de systèmes non linéaires ; celle-ci présente un grand intérêt dans des domaines très variés tels que la mécanique, la robotique ou le génie électrique. La caractéristique principale de la commande par mode glissant est que la loi de commande varie d'une manière discontinue [72].

- **Principe de la commande**

C'est une commande insensible aux variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. La première phase, consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et en seconde phase, on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface à l'aide d'une logique de commutation pour atteindre l'origine du plan de phase « point d'équilibre », comme il est montré par la figure 3.11 où la trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes (mode d'accès, mode glissant et point d'équilibre).

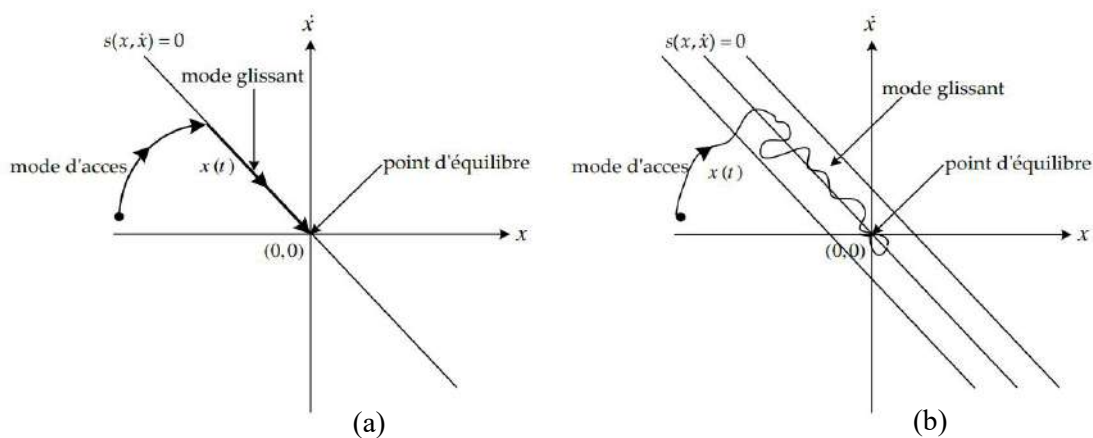


Figure.3.11. Différents modes de glissant dans le plan de phase : (a) glissement idéal, (b) glissement réel

Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en trois étapes [73], comme illustré sur la figure 3.11.a.

✓ **Le mode non glissant (reaching mode)** ou mode d'accès, ou encore mode de convergence (MC) : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase jusqu'à la surface de commutation.

✓ **Le mode glissant MG (sliding mode : SM)** : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement.

✓ **Le mode du régime permanent (MRP)** : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase). Il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre U_{max} , U_{min} instantanément (fréquence infinie), en fonction du signe de la surface de glissement (figure 3.12). Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées 'broutement' ou 'Chattering' apparaissent dans le mode de glissement [73].

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre U_{max} , U_{min} .

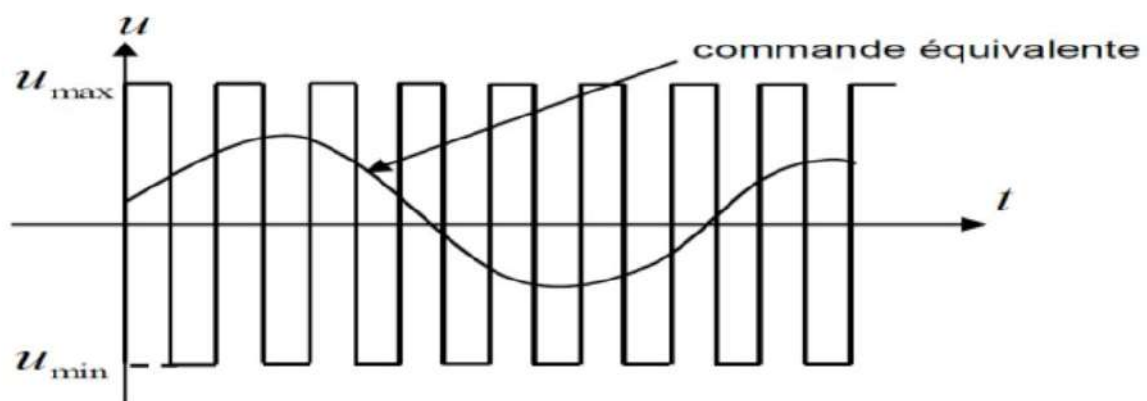


Figure.3.12. Commande équivalente

La structure d'un contrôleur comporte deux parties : une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante.

Nous posons donc :

$$U_t = U_{eq} + U_n \quad (3.43)$$

U_{eq} : Sert à maintenir l'état sur la surface de glissement $S(x, t) = 0$

U_n : Sert à déterminer le comportement dynamique du système durant le mode de convergence pour satisfaire leur condition $S(x, t). \dot{S}(x, t) < 0$. Alors, pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement, il faut que $U_n = S(\dot{x}, t)$.

• Conception de la commande par mode de glissement

La conception du contrôleur par mode glissant peut-être divisée en trois étapes principales très dépendantes. Ces étapes concernent [74] :

- ✓ Le choix de la surface ;
- ✓ L'établissement des conditions d'existence de la convergence ;
- ✓ Le calcul de la loi de commande.

➤ Choix de la surface

Le choix de la surface de glissement n'est pas unique, il dépend de l'application et de l'objectif visé. Pour un système défini par l'équation suivante, le vecteur de surface a la même dimension que le vecteur de commande u .

Pour un système non-linéaire présenté sous la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (3.44)$$

Où, $[x] \in R^n$ est le vecteur d'état, $[U] \in R^m$ le vecteur de commande, avec $n > m$. Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande $[U]$. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état X vers sa valeur de référence \dot{X} , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad (3.45)$$

Avec,

δ : gain positif,

$e(x)$: L'écart entre la variable à régler et sa référence $e(x) = \dot{X} - X$;

r : degré relatif. Il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

➤ Conditions d'existence et de convergence du régime glissant

Les conditions de convergences sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation : il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence [74].

➤ Fonction d'approche directe de commutation

Cette approche est proposée et étudiée par Utkin, et Emilyanov. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{S}(x, t) \geq 0 & \text{si } S(x, t) < 0 \\ \dot{S}(x, t) \leq 0 & \text{si } S(x, t) > 0 \end{cases} \quad (3.46)$$

Cette fonction peut être formulée par la condition suivante :

$$\dot{S}(x, t) \cdot S(x, t) < 0 \quad (3.47)$$

➤ Approche de Lyapunov

Il s'agit de considérer une fonction scalaire positive $V(x, t) > 0$ pour les variables d'état du système et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction $V(\dot{x}, t) < 0$. Cette approche est utilisée pour améliorer les performances de la commande et étudier la robustesse et la stabilité des systèmes non linéaires.

Nous définissons la fonction de Lyapunov par :

$$V(x, t) = \frac{1}{2} S^2(x, t) \quad (3.48)$$

L'équation (3.48) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimée par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant où la fréquence de commutation est infinie.

Et sa dérivée par :

$$V(x, t) = S(x, t) \dot{S}(x, t) \quad (3.49)$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci est vérifié si :

$$V(x, t) = S(x, t) \cdot \dot{S}(x, t) < 0 \quad (3.50)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de U_n doit être opposé à celui $S(x, t)$. Plusieurs choix pour la commande discontinue U_n peuvent être réalisés, parmi lesquelles la commande « sign » qui est la plus fréquente, et la plus simple pour exprimer la commande discontinue $U_n = [U_1, U_2, U_3, \dots, U_m]$ par cette fonction par rapport à $S_n = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_m]$ telle que :

$$\begin{cases} \text{sign}(s) = +1, \text{ si } S_i(x) > 0 \\ \text{sign}(s) = -1, \text{ si } S_i(x) < 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

Alors, dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$U_n = K \cdot \text{sign}(S(x, t)) \quad (3.52)$$

En remplaçant l'expression (3.52) dans (3.49), on obtient :

$$V(x, t) = S(x, t) \cdot K \cdot \text{sign}(S(x, t)) = S(x, t) \cdot \dot{S}(x, t) < 0 \quad (3.53)$$

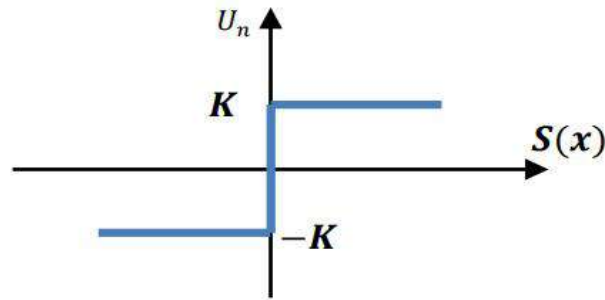


Figure.3.13. Fonction " Sign " (Commande de type relais)

Le gain K est choisi positif pour respecter la condition (3.53). Son influence est cruciale : le temps de réponse sera très long, et s'il est très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter des dynamiques négligées, provoquant le phénomène de chattering, ou même détériorer l'organe de commande [100]. En régime permanent, la commande type relais résiste souffre de ce broutement, caractérisé par des oscillations à haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe. Ce phénomène constitue un obstacle significatif pour les commandes par mode glissant, car il peut compromettre le fonctionnement du circuit de puissance. Des méthodes existent pour atténuer le broutement.

L'une des solutions envisagées consiste à introduire une bande d'arrêt autour de la surface de commutation remplacement de la fonction (Sign) par une fonction de saturation (Sat) adéquate. Une autre solution consiste à utiliser la fonction (Smooth).

✓ Fonction saturation (Sat)

Cette solution, consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface. L'expression mathématique de la fonction de la saturation est donnée par :

$$\begin{cases} Sat(S) = 1 & \text{si } S > \mu \\ Sat(S) = -1 & \text{si } S < -\mu \\ Sat(S) = \frac{S}{\mu} & \text{si } -\mu < S < \mu \end{cases} \quad (3.54)$$

Avec,

μ : largeur du seuil de la fonction de saturation : un paramètre petit et positif.

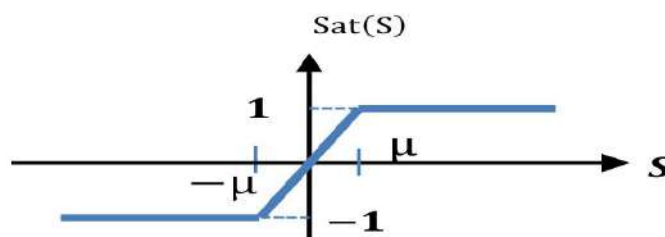


Figure.3.14 Fonction saturation

✓ Fonction Smooth

L'utilisation de cette fonction est l'une des meilleures solutions proposées. Elle diminue considérablement l'amplitude des oscillations de hautes fréquences. L'expression mathématique de la fonction Smooth est donnée par :

$$\text{Smooth}(S(x, t)) = \tanh \left(\frac{S(x, t)}{S(x, t) + \mu} \right) \quad (3.55)$$

Le système ne converge plus vers la valeur désirée, mais vers un voisinage de cette dernière. Dans ce cas, le système est dit en régime pseudo-glissant. Bien que cela permette d'atténuer le phénomène de Chattering, la précision par rapport à l'objectif fixé, la robustesse de la commande et le temps de réponse s'en trouvent dépréciés,

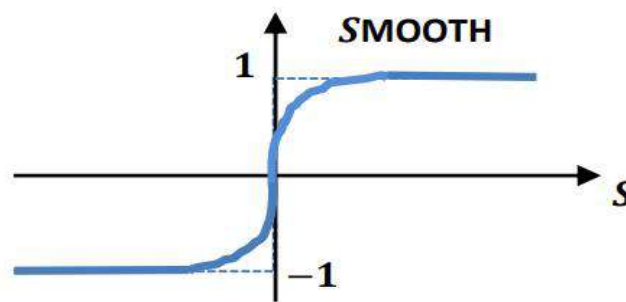


Figure.3.15 Fonction Smooth

➤ Synthèse de la loi de commande

Une fois que la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface, et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. Afin de synthétiser la commande par mode glissant de la vitesse, soit l'équation dynamique [75] :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_m - C_{em} - f_v \cdot \Omega) \quad (3.56)$$

Le degré relatif de la surface est égal à un « 1 » pour pouvoir apparaître la commande C_{em}^* dans la dérivée de la vitesse ($r = 1$). La surface de glissement est définie par :

$$S(\Omega) = \Omega^* - \Omega \quad (3.57)$$

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V(S(\Omega)) = \frac{1}{2} S(\Omega)^2 \quad (3.58)$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}(S(\Omega)) = S(\Omega) \cdot \dot{S}(\Omega) \quad (3.59)$$

Avec,

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \quad (3.60)$$

En remplaçant (3.56) Dans la dernière équation (3.60) on obtient :

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}(C_{em} + f_v \cdot \Omega - C_m) \quad (3.61)$$

En remplaçant l'expression de C_{em} par les commandes équivalente et discrète ($C_{emeq} + C_{emn}$) dans l'équation précédente, on trouve :

$$\dot{S}(\Omega) = \dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}((C_{emeq} + C_{emn}) + f_v \cdot \Omega - C_m) \quad (3.62)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent on a : $S(\Omega) = 0$, $\dot{S}(\Omega) = 0$ et $C_{emn} = 0$, d'où nous tirons l'expression de la commande équivalente C_{emeq} :

$$C_{emeq} = -J\dot{\Omega}^* - f_v \cdot \Omega + C_m \quad (3.63)$$

En remplaçant l'expression (3.63) dans (3.62) on obtient :

$$\dot{S}(\Omega) = \frac{1}{J}(C_{emn}) \quad (3.64)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, nous devons poser :

$$C_{emn} = -K \cdot \text{sign}(S(\Omega)) \quad (3.65)$$

Avec K constante positive.

3.6.1.3. Régulateur par méthode de Backstepping

La méthode de commande par backstepping est relativement récente dans la théorie de commande des systèmes non-linéaires. La technique du backstepping a été développée par Kanellakopoulos et al. (1991) et inspirée par les travaux de Feurer et Morse (1978) d'une part et Tsiniias (1989) et Kokotovii et Sussmann (1989) d'autre part. La méthode de backstepping est une méthodologie de synthèse récursive conjointe d'une fonction de Lyapunov et de la loi de commande associée. Il s'agit d'une technique de commande pour les systèmes non-linéaires permettant d'une manière séquentielle et systématique de construire des fonctions de Lyapunov stabilisantes [76]. Pour que cette technique puisse être appliquée, le système non-linéaire doit être sous forme « strict feedback ». La dérivée de chaque composante du vecteur d'état doit être une fonction des composantes précédentes et dépend additivement de la composante suivante.

• Principe de la commande

L'idée principale de cette stratégie de commande est de créer une loi de commande pour un système non-linéaire en utilisant des vecteurs d'états comme commandes virtuelles. Cela vise à assurer qu'une fonction de Lyapunov reste positive et que sa dérivée soit négative. La méthode de backstepping commence par définir une fonction d'énergie intégrant l'écart entre les sorties régulées et les objectifs de commande. À chaque étape, l'ordre du système augmente et la partie non stabilisée est traitée. On construit un écart entre l'état actuel et une

commande virtuelle, pour parvenir à une loi de commande garantissant la convergence des états vers zéro et l'équilibre des sorties autour des objectifs. Cela assure la stabilité globale du système en poursuite et en régulation [76]. Contrairement à la plupart des autres méthodes, le backstepping n'a aucune contrainte au niveau du type des non linéarités [77].

Considérons le système non-linéaire suivant [77] :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.66)$$

Avec,

u : entrée du système (la commande) ;

y : sortie du système ;

$h(x)$: fonction analytique de x ;

$f(x), g(x)$: champs de vecteurs supposés infiniment différentiables.

$x_1 = [x_1, \dots, x_n]^T \in R$: Vecteur d'état ;

Pour appliquer la commande backstepping sur (3.66), le système doit être sous forme strict feedback [78]. Cette condition peut être réalisée par le changement de variables suivant :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_2 \\ \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_3 \\ \dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{\varepsilon}_{i-1} = \varepsilon_i \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{\varepsilon}_{n-1} = \varepsilon_n \\ \dot{\varepsilon}_n = u \\ y = \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3.67)$$

$\varepsilon = [\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n]^T$: nouveau vecteur d'état.

Le backstepping consiste à trouver une fonction de Lyapunov qui garantit la stabilité asymptotique globale au système (3.66).

Le but de cette procédure est de commander tout d'abord la première équation par l'intermédiaire de la variable ε_2 , appelée commande virtuelle. La deuxième équation est commandée par sa commande virtuelle ε_3 , jusqu'à la $n^{\text{ème}}$ équation, puis de commander le système global par la commande u , cela étape par étape [78].

➤ Etape 1

La première étape consiste à donner la définition de la première erreur par :

$$\begin{cases} e_1 = y - y_d \\ e_1 = \varepsilon_1 - y_d \end{cases} \quad (3.68)$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \varepsilon_1 - \dot{y}_d \\ \dot{e}_2 = \varepsilon_2 - \dot{y}_d \end{cases} \quad (3.69)$$

y_d : La première référence désirée de la sortie y .

La première fonction de Lyapunov est choisie comme :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.70)$$

La fonction V_1 est une fonction de Lyapunov qui représente, en quelque sorte, l'énergie de l'erreur. Or, si cette fonction est toujours positive (ce qui est le cas présentement) et que son dérivé est toujours négatif, alors l'erreur va être stable et tendre vers zéro.

$$V_1 = e_1 e_1 = e_1 (\varepsilon_2 - \dot{y}_d) \quad (3.71)$$

Afin que la dérivée de la fonction soit toujours négative, il faut que la dérivée de V_1 prenne la forme $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2$, où k_1 est une constante positive, introduite par la méthode du backstepping, qui doit être toujours positive et non nulle afin de respecter les critères de stabilité de la fonction de Lyapunov.

Pour satisfaire les conditions mentionnées ci-dessus, il faut que :

$$\varepsilon_2 = -k_1 e_1^2 - \dot{y}_d \quad (3.72)$$

L'équation (3.72) indique la valeur que doit prendre l'état ε_2 pour que la fonction de Lyapunov soit stable. Cependant, il est impossible d'agir directement sur l'état. La notation ε_{2d} sera donc utilisée pour indiquer la valeur souhaitée de l'état ε_2 .

$$\alpha = \varepsilon_{2d} = -k_1 e_1^2 - \dot{y}_d \quad (3.73)$$

Cela conduit à :

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0 \quad (3.74)$$

➤ Etape 02

$y_{2d} = \alpha_1$: la nouvelle référence désirée

La nouvelle variable d'erreur est :

$$\begin{cases} e_1 = \varepsilon_2 - y_{2d} \\ e_1 = \varepsilon_2 - \alpha_1 \\ e_1 = \varepsilon_2 - k_1 e_1 \end{cases} \quad (3.75)$$

On introduit la fonction de Lyapunov suivante :

$$\begin{cases} V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \\ V_2 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \end{cases} \quad (3.76)$$

Avec,

$$e_1 = \varepsilon_2 - \dot{y}_d = e_2 - k_1 e_1 \quad (3.77)$$

La dérivée de V_2 est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2(e_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \alpha_1) \\ \ddot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_2((1 - k_1^2)e_1 + k_1 e_1 + \varepsilon_3 + \ddot{y}_d) \end{cases} \quad (3.78)$$

Pour garantir la condition de stabilité $\dot{V}_2 < 0$, la seconde commande virtuelle ε_3 est choisie comme :

$$\begin{cases} \alpha_2 = \varepsilon_{3d} \\ \alpha_2 = (k_1^2 - 1)e_1 - (k_1 + k_2)e_2 + \ddot{y}_d \end{cases} \quad (3.79)$$

Avec, $k_1, k_2 > 0$

Ce qui en résulte :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_1 e_2^2 \leq 0 \quad (3.80)$$

➤ Etape i :

On prend :

$$\begin{cases} e_i = \varepsilon_i - \alpha_{i-1} \\ V_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^i e_j^2 \end{cases} \quad (3.81)$$

Nous avons :

$$\begin{cases} \dot{e}_{i-1} = e_i - k_{i-1} e_{i-1} e_{i-2} \\ \dot{V}_i = -\sum_{j=1}^{i-1} k_j e_j^2 + e_i(e_{i-1} + \dot{\varepsilon}_i + \alpha_{i-1}) \end{cases} \quad (3.82)$$

La commande virtuelle est alors :

$$\begin{cases} e_i = \varepsilon_i - \alpha_i = (\varepsilon_{i-1})_d \\ e_i = k_i e_i - e_{i-1} - \alpha_{i-1} \end{cases} \quad (3.83)$$

Avec, $k_i > 0$

➤ Etape n

On définit :

$$\begin{cases} e_n = \varepsilon_n - \alpha_{n-1} \\ V_n = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n e_j^2 \end{cases} \quad (3.84)$$

Nous avons :

$$\begin{cases} \dot{e}_{n-1} = e_n - k_{n-1}e_{n-1}e_{n-2} \\ \dot{V}_n = -\sum_{j=1}^{n-1} k_j e_j^2 + e_n(e_{n-1} + \dot{\varepsilon}_n + \alpha_{n-1}) \end{cases} \quad (3.85)$$

La commande virtuelle dans ce cas est la commande réelle u :

$$\begin{cases} \alpha_n = \varepsilon_{n+1} = u \\ \alpha_n = k_n e_n - e_{n-1} - \alpha_{n-1} \end{cases} \quad (3.86)$$

Avec,

$$k_n > 0$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - \dots - k_n e_n^2 \leq 0 \quad (3.87)$$

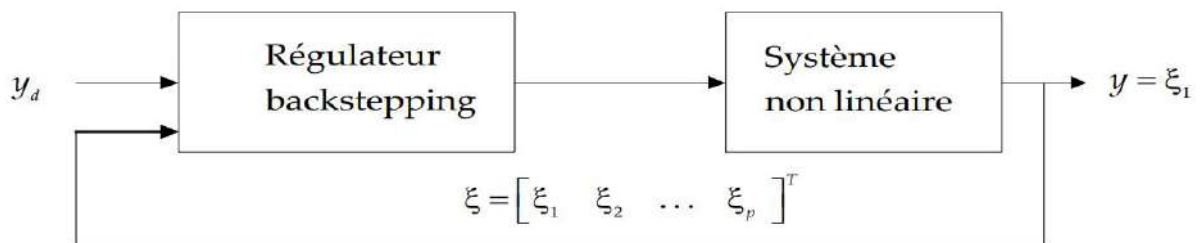


Figure.3.16. Schéma de principe du contrôle par backstepping

• Synthèse de la loi de commande

Pour concevoir une commande par mode backstepping de la vitesse, on considère que [79]:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_m - C_{em} - f_v \cdot \Omega) \quad (3.88)$$

Définir l'erreur de suivi de consigne :

$$e(\Omega) = \Omega^* - \Omega \quad (3.89)$$

Ω^* : vitesse de référence.

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V(e) = \frac{1}{2} e(\Omega)^2 \quad (3.90)$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}(e(\Omega)) = e(\Omega) \cdot \dot{e}(\Omega) \quad (3.91)$$

Avec,

$$\dot{e}(\Omega) = \dot{e}^* - \dot{e} \quad (3.92)$$

En remplaçant (3.89) Dans la dernière équation (3.92), on obtient :

$$\dot{e}(\Omega) = \dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}(C_{em} + f_v \Omega - C_m) \quad (3.93)$$

En remplaçant (3.93) dans l'équation (3.91), on obtient :

$$\dot{V}(e(\Omega)) = e(\Omega) \cdot (\dot{\Omega}^* + \frac{1}{J}(C_{em} + f_v \Omega - C_m)) \quad (3.94)$$

La commande stabilisante du backstepping est définie comme suit :

$$C_{em} = -J\dot{\Omega}^* - f_v \Omega + C_m - k_1 e(\Omega) \quad (3.95)$$

Avec : k_1 constante positive.

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, nous devons poser :

$$V(e) = e(\Omega) \cdot e(\Omega) = -k_1 e(\Omega)^2 < 0 \quad (4.96)$$

3.6.1.4. Régulateur par logique floue (RLF)

Lorsque le modèle mathématique d'un système est complexe, non linéaire ou difficile à établir, les contrôleurs flous constituent une solution efficace. Très répandus dans les processus industriels. Ils permettent d'élaborer une loi de réglage performante sans nécessiter une modélisation approfondie ni une connaissance précise des paramètres du système. Introduit en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh, le concept de sous-ensembles flous a suscité un intérêt considérable. Cette approche de commande est particulièrement avantageuse pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, notamment pour la machine asynchrone à double alimentation [80].

Dans ce contexte, nous présenterons les principes fondamentaux de la commande par logique floue, la méthodologie de conception d'un réglage, ainsi que ses principaux atouts et limites, en détaillant plus spécifiquement la conception d'un régulateur flou destiné à contrôler la vitesse d'une turbine.

➤ Principe de la commande

La figure suivante montre la configuration de base d'un RLF, qui comporte quatre blocs principaux [80] : Fuzzification, Base de connaissances, Moteur d'inférence et la Défuzzification.

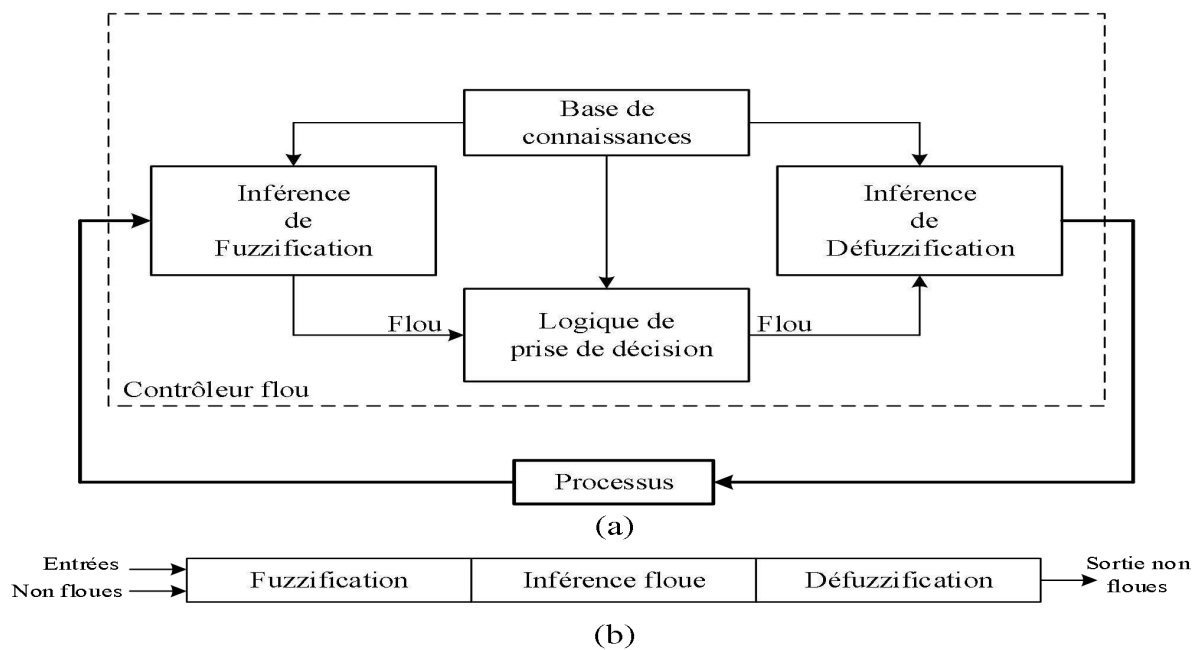


Figure.3.17. (a) : Schéma synoptique d'un contrôleur flou (b) : configuration d'un contrôleur flou

Comme le système à commander ne reçoit que des grandeurs physiques, un RLF devrait convertir les valeurs numériques à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertir le signal de commande de valeurs floues en valeurs physiques pour les appliquer au système. Les rôles de chaque bloc peuvent être résumés comme suit [81] :

➤ **Inférence de Fuzzification**

Cette première partie associe un sous-ensemble flou à la valeur d'une variable (vitesse, couple, courant, tension, etc.). On utilise des variables linguistiques représentées par des fonctions d'appartenance, la forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. La fuzzification affecte à chaque entrée un degré d'appartenance à chaque sous-ensemble flou, permettant ainsi la transition du numérique (grandeurs physiques) au symbolique (variables floues) [81]. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;
- Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous.

➤ **Base de connaissance**

La base de connaissance est composée de deux blocs [81] :

- D'une base de données : effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un RLF.

- La base de règle : représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques. Les règles floues sont exprimées en utilisant le terme conditionnel SI et le terme déductif ALORS. Elles permettent de lier des conditions à la conclusion.

➤ **Règles d'inférence floue**

Les règles d'inférence peuvent être décrites de plusieurs façons : linguistiquement, symboliquement ou bien par matrice d'inférence. Pour le dernier cas, une matrice dite d'inférence rassemble dans un tableau toutes les règles d'inférence. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrées. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle, le tableau 3.1 présente la matrice d'inférence à sept règles.

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani) ;
- Méthode d'inférence max-produit (Larsen) ;
- Méthode d'inférence somme-produit (Sugeno).

La première méthode est la plus utilisée à cause de sa simplicité. Le tableau suivant résume la façon utilisée par ces trois méthodes d'inférence pour représenter les trois opérateurs de la logique floue 'ET, OU, et ALORS.

Tableau.3.1. Méthode usuelle de l'inférence floue

Opérateurs flous Méthodes d'inférence	ET	OU	ALORS
Max-Min	Minimum	Maximum	Minimum
Max-Produit	Minimum	Maximum	Produit
Somme-Produit	Produit	Moyenne	Produit

D'après le tableau, elle réalise l'opérateur "ET" par la fonction "Min", la conclusion "ALORS" de chaque règle par la fonction "Min" et la liaison entre toutes les règles (opérateur «OU») par la fonction Max, [82, 83].

➤ **Inférence de défuzzification**

La Défuzzification est la dernière étape dans la commande floue [83]. Elle consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou, autrement dit, elle consiste à transformer les informations floues établies par le mécanisme d'inférence en une grandeur physique ou numérique pour définir la loi de commande du processus [83].

Elle effectuée les fonctions suivantes :

- Établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables de sortie ; c'est-à-dire de calculer à partir de la fonction d'appartenance résultante, la valeur réelle de la variable de sortie à appliquer au processus.

- Effectue une défuzzification qui fournit un signal de commande non-flou à partir du signal flou déduit.

Cette étape de défuzzification peut être envisagée avec différentes méthodes, parmi eux :

- Méthode par valeur maximum ;
- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode de la moyenne des maximums.

La méthode de défuzzification la plus couramment utilisée est celle qui détermine le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante, Elle génère l'abscisse du centre de gravité de l'espace flou comme commande de sortie, l'abscisse de centre de gravité (Δ_{u_n}).

Cette dernière méthode est considérée dans la suite de travail.

La commande par logique floue a comme les autres commandes un certain nombre d'avantages et de désavantages. Ces avantages essentiels sont [84] :

- ❖ La non-nécessite d'une modélisation.
- ❖ La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus, en outre la maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-Linéaire et difficile à modéliser.
- ❖ Réduction du temps de développement et de la maintenance.
- ❖ Simplicité de définition et de conception.

Les inconvénients de la commande par logique floue sont [84] :

- ❖ Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification) ;
- ❖ Implémentation des connaissances des opérateurs souvent difficile ;
- ❖ L'absence d'un modèle valable pour démontrer la stabilité du circuit de réglage en toute généralité ;
- ❖ La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non linéaire ;
- ❖ La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible) ;
- ❖ Ignorance de la détermination la plus efficace du processus flou.

➤ Synthèse de la loi de commande

• Description du contrôleur

Les éoliennes nécessitent des systèmes de contrôle pour garantir une énergie éolienne maximale et une adaptation constante de la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent [84]. Cette section décrit comment l'éolienne est commandée par une commande à logique floue

(FLC), comme le montre le bloc de commande de la figure 3.18. La fuzzification, l'inférence floue et la défuzzification sont les trois éléments structurels du FLC. Ce contrôleur utilise le schéma proposé par mamdani, et il est composé de :

- Des facteurs de normalisation associés à l'erreur e , à sa variation (Δe) et à la variation de la commande (Δu_n).
- D'un bloc de fuzzification de l'erreur et sa variation ;
- Des règles de contrôle flou.
- La stratégie de commande est présentée par une matrice d'inférence du même type que celle présentée dans le tableau 3.1.
- D'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique.
- D'un intégrateur.

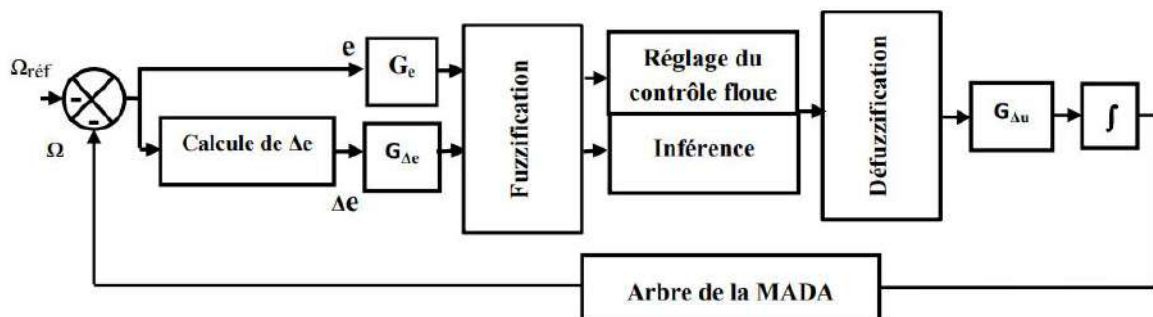


Figure.3.18. Schéma bloc d'un contrôleur flou

Le contrôleur flou considéré utilise [85] :

- Les fonctions d'appartenances de type triangulaires et trapézoïdales.
- Un univers de discours normalisé.
- L'univers de discours est découpé en sept (réglage fin) pour les variables d'entrées et de sortie ; une subdivision très fine de l'univers de discours sur plus de sept ensembles flous n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du système à réguler [85].
 - L'implication de Mamdani pour l'inférence.
 - La méthode du centre de gravité.

Fuzzification : Pour illustrer le mécanisme de la fuzzification, il existe plusieurs fonctions d'apparence, mais nous avons utilisé l'appartenance triangle dans notre étude, comme le montre la figure 3.19 représente les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

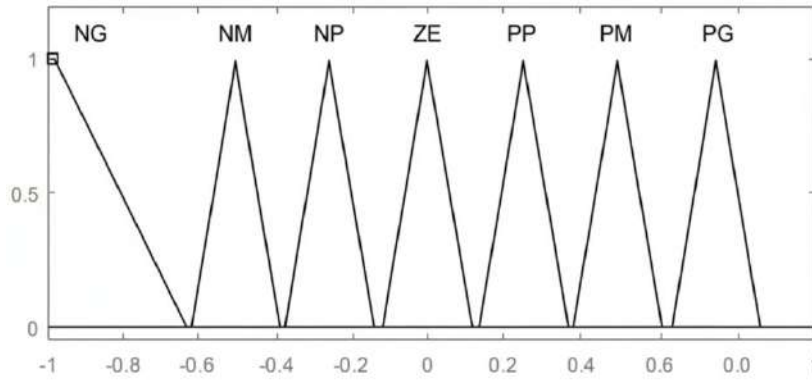


Figure.3.19. Fonctions d'appartenance (e , Δ_e et Δ_{u_n}) utilisées par le contrôleur

Règles d'inférence floue : le tableau 3.2 présente la matrice d'inférence à sept règles.

Tableau.3.2. Matrice d'inférence

e Δ_e	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZE
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZE	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZE	PP	PM
ZE	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZE	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Défuzzification :

➤ **Loi de commande**

La méthode du centre de gravité Δ_{u_n} est donnée par [86] :

$$\Delta_{u_n} = \frac{\int x\mu(x).dx}{\int \mu(x).dx} \tag{3.97}$$

Avec,

Δ_{u_n} : l'abscisse du centre de gravité,

$\mu(x)$: fonction d'appartenance, et

x : variable dans l'univers de discours.

Règle de contrôle : l'erreur et sa dérivation sont des fonctions de la loi de contrôle ($u = f(e, \Delta_e)$). Elle est donnée par :

$$u_{k+1} = u_k + G\Delta_u\Delta_{u_{k+1}} \tag{3.98}$$

L'erreur (e) et la variation de l'erreur (Δ_e) sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} x_e = G_e \cdot e \\ x_{\Delta_e} = G_{\Delta_e} \cdot \Delta_e \end{cases} \quad (3.99)$$

Avec,

e : l'erreur ;

Δ_e : dérivation de l'erreur ;

x_e, x_{Δ_e} : normalisation de l'erreur et sa dérivation ;

Δ_u : dérivation du contrôle ;

G_{Δ_u} : gain associé à la commande u_{k+1} ;

$\Delta_{u_{k+1}}$: dérivation de la commande u_{k+1} ;

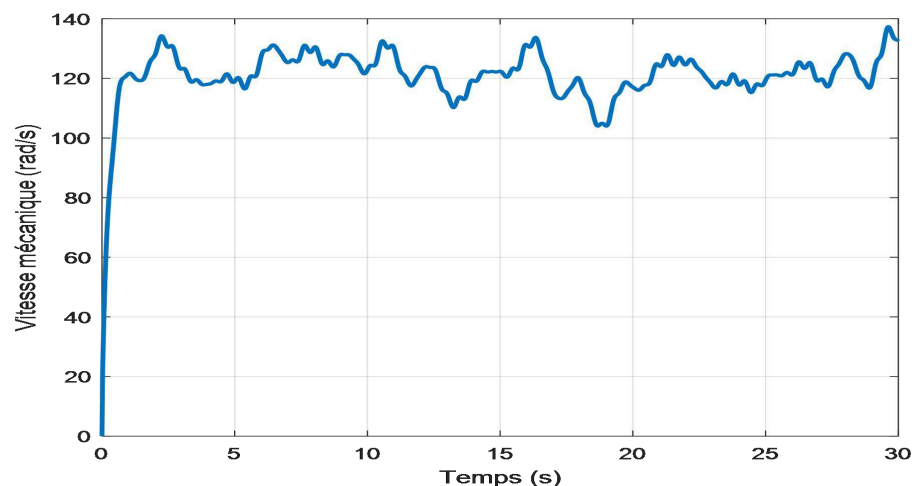
G_e, G_{Δ_e} : facteurs d'échelle (normalisation). On ajuste ces facteurs jusqu'à ce qu'on ait un régime transitoire souhaité.

3.7. Résultats de simulation

Pour vérifier la validité du système, un fonctionnement du système complet a été simulé sous environnement MATLAB/Simulink. Nous considérons que le système éolien est en régime permanent et qu'il fonctionne dans la zone de fonctionnement optimal c'est-à-dire qu'il produit le maximum de puissance en fonction de la vitesse de vent. Les résultats de simulation que nous allons présenter ont été faits pour un système éolien (voir l'annexe).

3.7.1. Résultats obtenus sans la structure de MPPT sans asservissement de vitesse

La figure 3.20 représente respectivement la simulation de la vitesse mécanique et vitesse relative.



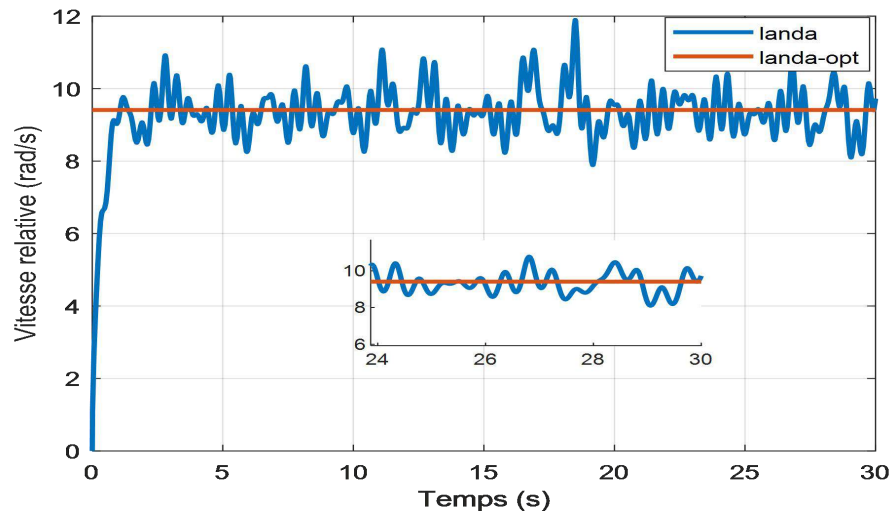
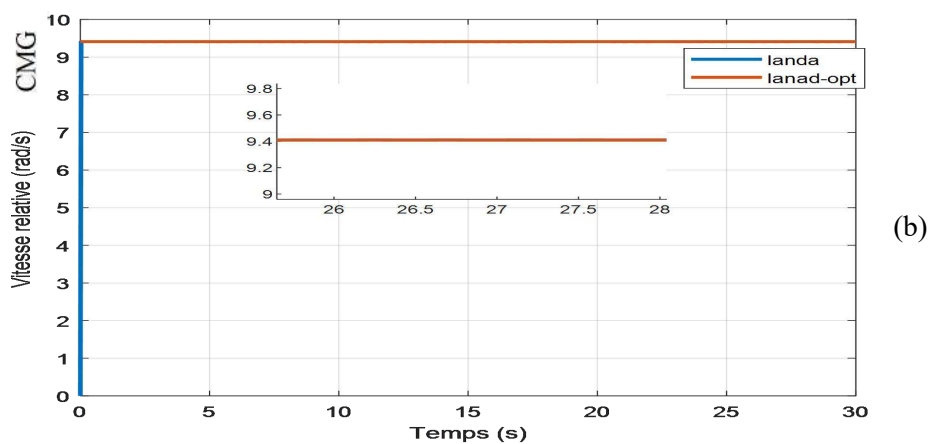
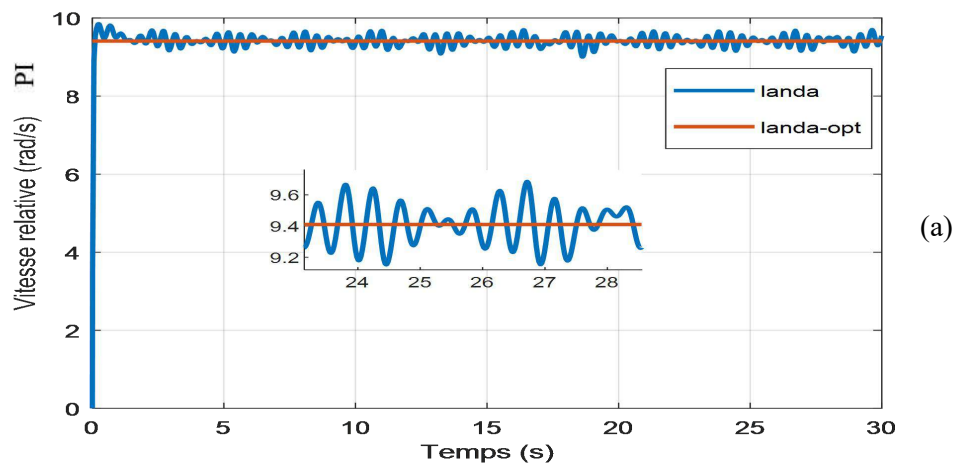


Figure.3.20. Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse mécanique

3.7.2. Résultats obtenus avec la structure de MPPT sans asservissement de vitesse

Les résultats de simulations obtenus par les 4 régulateurs ont présenté ci-dessous : PI, CMG, Bak, FLC. La figure 3.21 représente la simulation de vitesse relative. La figure 3.22 représente la simulation de vitesse mécanique. La figure 3.23 représente la simulation de l'erreur de la vitesse mécanique vitesse relative.



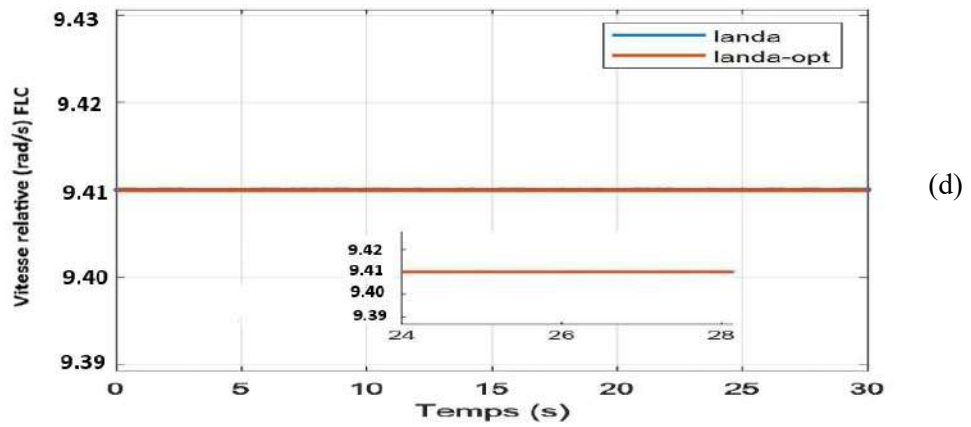
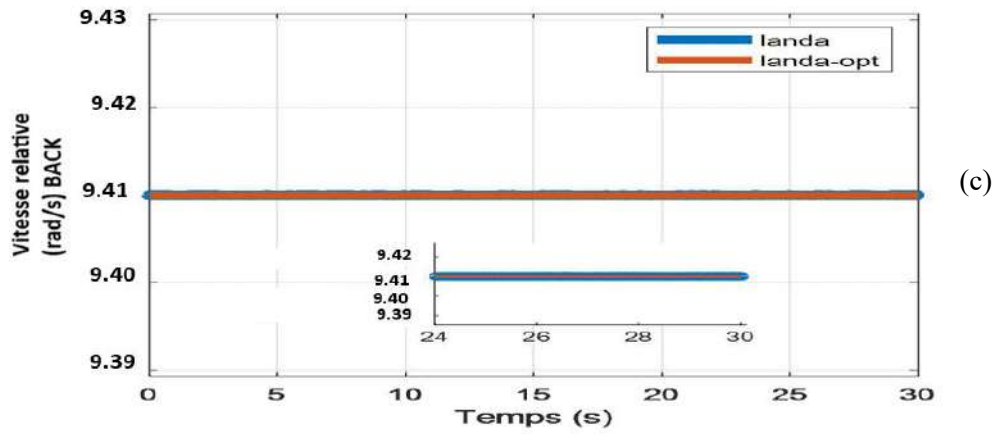
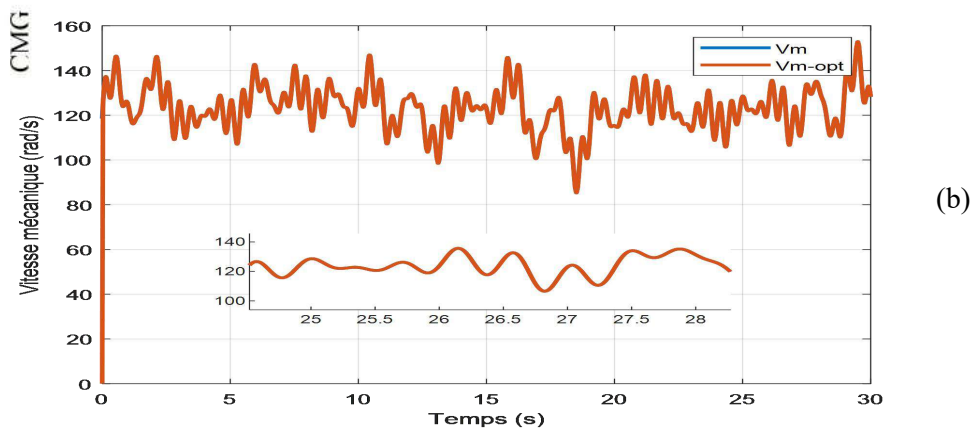
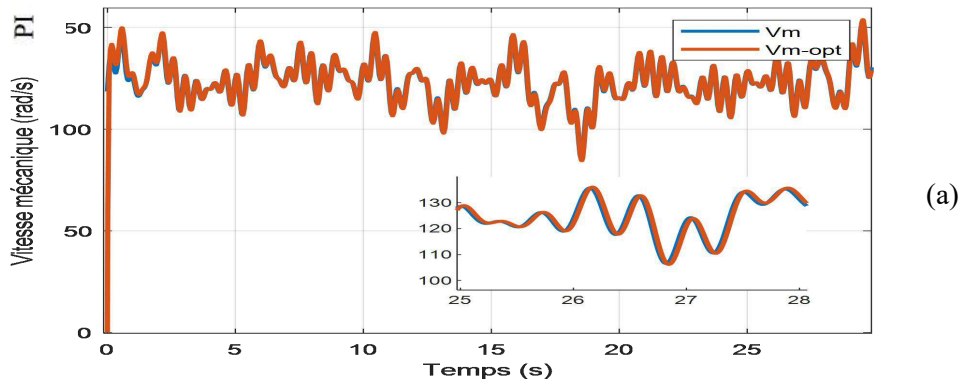


Figure.3.21. Résultat de simulation de la vitesse relative avec asservissement de la vitesse mécanique



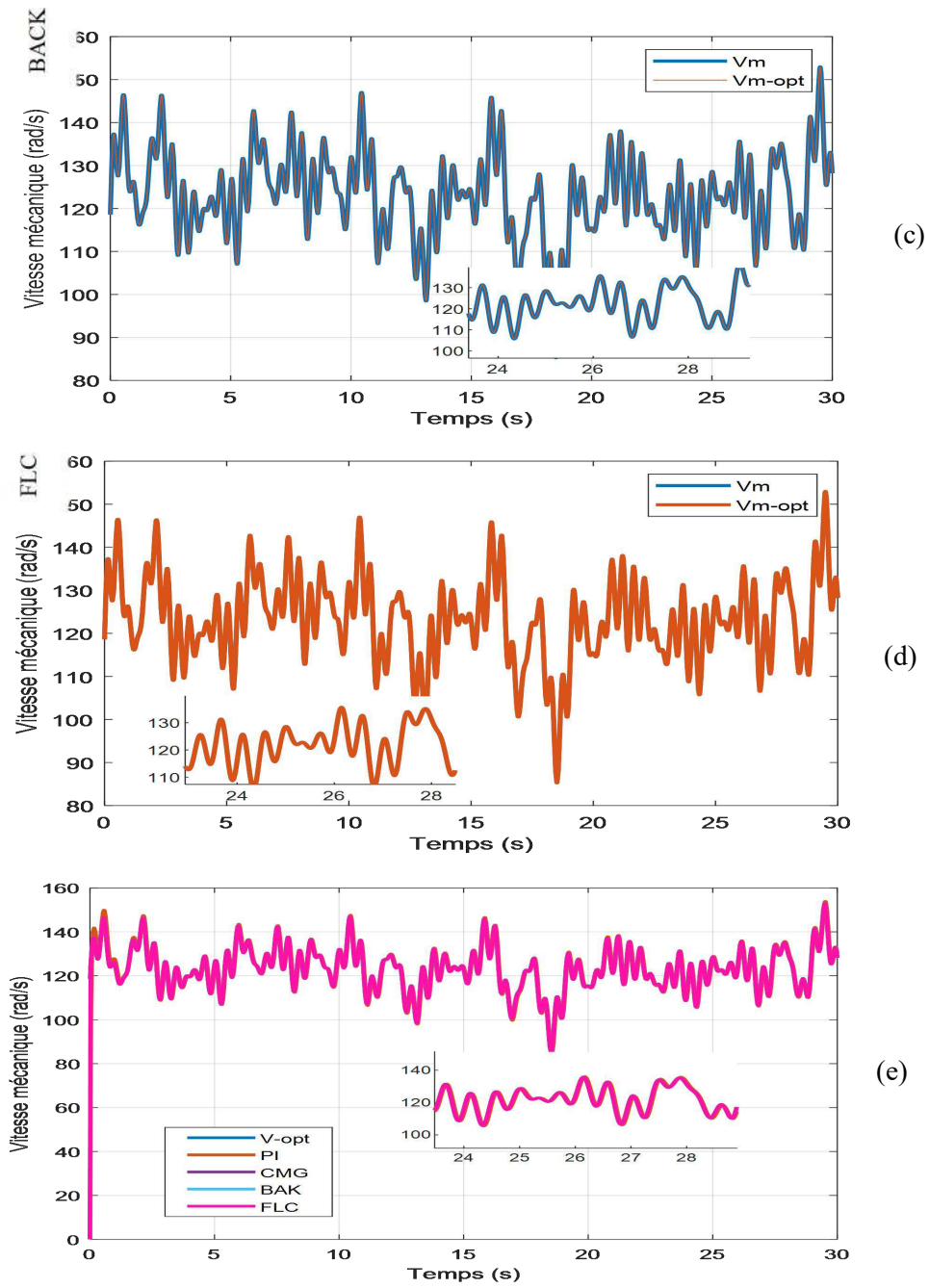
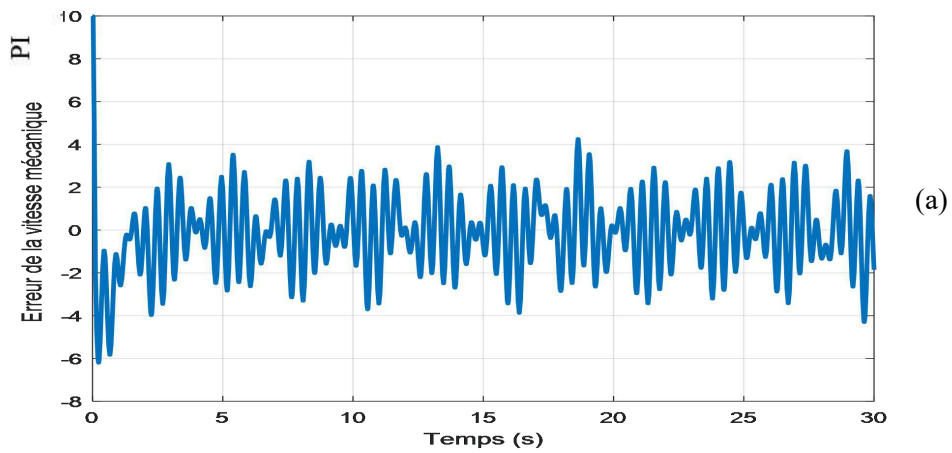


Figure.3.22. Résultat de simulation de la vitesse mécanique avec asservissement



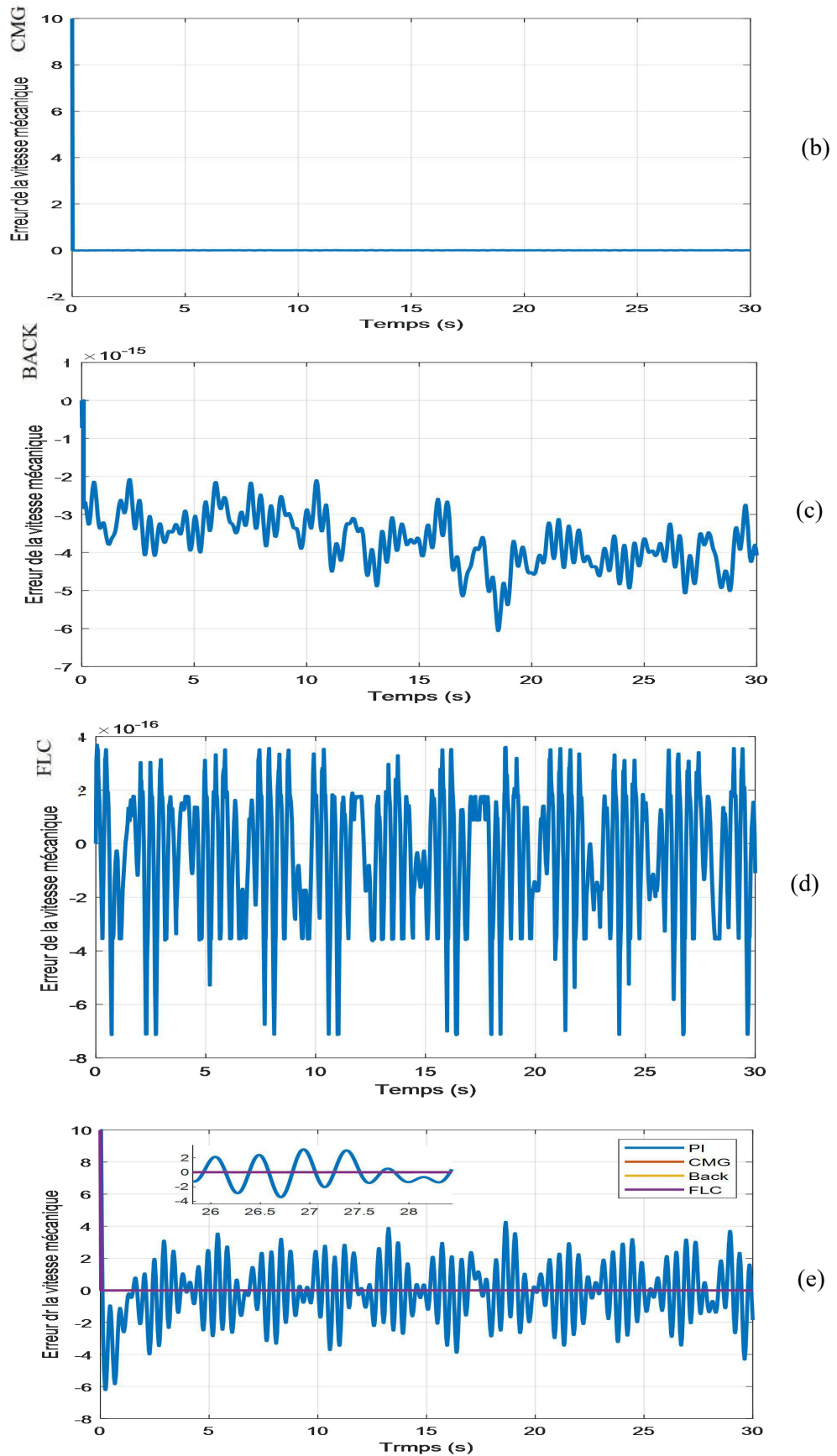


Figure.3.23. Résultat de simulation de l'erreur de la vitesse mécanique avec asservissement

3.7.3. Interprétation des résultats

La figure 3.20 montre l'étude de la partie mécanique de la chaîne éolienne commandée avec la commande MPPT sans asservissement. On observe la vitesse relative suivre sa référence, avec un temps de réponse important au démarrage et une erreur statique non nulle en régime permanent. Cela est dû à l'absence de régulation de la vitesse de l'aérogénérateur, ce qui nous a poussé à penser de mettre un régulateur et donc à utiliser une structure de commande MPPT avec asservissement. Dans la deuxième partie, une analyse comparative des performances de quatre techniques de commandes : PI, mode glissant, backstepping et logique floue a été réalisée sur un système éolien simulé. Les résultats montrent que la commande PI, bien que simple et efficace dans des conditions nominales, présente des limitations notables face aux perturbations et aux variations rapides des conditions de vent. En revanche, la commande par mode glissant s'est révélée extrêmement robuste, avec un temps de réponse très rapide et une erreur statique nulle, malgré la présence du phénomène de chattering. La stratégie backstepping a offert une performance équilibrée, combinant stabilité, précision et rapidité, à condition que le modèle du système soit bien identifié avec une erreur de 10^{-15} . Enfin, la commande par logique floue a démontré une adaptabilité remarquable, permettant de réguler efficacement le système avec une erreur de $4 \cdot 10^{-16}$. Aussi, bien que chaque régulateur présente ses avantages spécifiques, les techniques avancées comme la logique floue et le backstepping s'avèrent plus adaptées pour les systèmes éoliens soumis à des conditions variables et incertaines.

Les figures 3.21, 3.22 et 3.23 montrent l'analyse de la partie mécanique de la chaîne éolienne raccordée avec la commande MPPT avec asservissement. L'utilisation des autres régulateurs PI CMG, Backstepping et FLC, pour les mêmes valeurs du C_p et β le maximum de la puissance est obtenus sans aucun dépassement et la consigne de référence est suivie parfaitement dans les deux régimes (transitoire et permanent), avec une légère fluctuation.

La figure 3.21 représente la variation de la vitesse relative des quatre (4) régulateurs utilisés. La figure 3.22 représente la variation de la vitesse mécanique et la figure 3.23 représente la variation de l'erreur statique de la vitesse mécanique.

On remarque que lorsqu'on ajoute le régulateur PI, la vitesse suit la vitesse de référence et le système devient rapide mais avec une erreur importante (figure 3.22.a). On remarque que lorsque l'utilisation de CMG, montre une erreur négligeable et le système est plus rapide, la vitesse relative permet une valeur maximale $\lambda=9.41$ avec une erreur nulle dans ce cas la puissance obtenue maximale et sans déplacement, mais l'utilisation du régulateur backstepping a donné un résultat meilleur par rapport aux deux précédents. Nous remarquons que la variation de l'erreur de la vitesse mécanique est une erreur très négligeable et que le système est plus rapide (temps de réponse élevé), le $\lambda = 9.41$ avec une erreur nulle, dans ce cas la puissance obtenue est au maximum et sans variation.

On conclut que, les performances obtenues avec le contrôle flou sont nettement meilleures aux autres. Dans ce cas la vitesse relative améliorée se rapproche de la valeur optimale, ce qui donne une erreur $4 \cdot 10^{-6}$ rad/s avec un excellent temps de réponse.

3.8. Conclusion

Le contrôleur requis par le contrôle MPPT est conçu pour réguler la vitesse de l'éolienne à la valeur de référence. Différentes stratégies de maximisation de la puissance extraite de la turbine ont été explicitées (sans asservissement de la vitesse, avec asservissement de la vitesse). Pour se faire, On a utiliser un mode de contrôle par un PI classique, par mode glissant MG, par un backstepping et par logique floue. Ces algorithmes ont été validés par des simulations sur le logiciel Matlab/Simulink. L'observation des différents résultats obtenus montrent que la stratégie, par logique floue présente une bonne dynamique par rapport à la variation de vent et une meilleure maximisation de la puissance électrique générée en comparaison avec la technique sans asservissement de la vitesse mécanique. Le chapitre suivant sera consacré au découplage des puissances active et réactive par la commande vectorielle directe et indirecte basée sur la technique d'orientation du flux statorique, qui permettent un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

Chapitre 4

Stratégies de Commande d'un Système Connecté au Réseau

4.1. Introduction

Pour avoir une bonne qualité d'énergie électrique produite par un système éolien basé sur une GADA, il faut appliquer des techniques de commandes adéquates permettant le contrôle des puissances générées par le stator de la machine à savoir : la puissance active qui sera réglée à celle de référence générée par la turbine pour assurer un meilleur rendement du système éolien, et la puissance réactive qui sera maintenue nulle de façon à garder un facteur de puissance unitaire du côté stator.

En fait, à travers ce chapitre la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisées seront présentés dans la première partie. Dans une deuxième fois, on présentera une étude détaillée sur commande vectorielle à flux orienté de la GADA, son principe de fonctionnement avec l'orientation du flux magnétique, ses différents types de commande (directe, indirecte). A la fin de ce chapitre, nous proposons trois commandes : une commande vectorielle à base de régulateurs PI, une commande par mode glissant, une commande backstepping.

Ces trois commandes permettent de contrôler indépendamment les puissances active et réactive de la génératrice asynchrone double alimentation avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Toutes ces commandes sont validées par des résultats de simulation.

4.2. Système de conversion de l'énergie éolienne

Le système le plus utilisé pour la conversion de l'énergie éolienne est le SCEE basé sur la GADA à vitesse variable. Le circuit du stator est directement connecté au réseau, mais le circuit du rotor de la GADA est couplé au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de source de tension dos à dos qui minimise les harmoniques de niveau supérieur. Le système étudié est présenté par la figure 4.1. L'avantage principal de cette topologie est qu'elle découple les deux convertisseurs, ce qui permet de les réguler de manière indépendante. Pour maximiser la production de l'énergie éolienne et prévoir les performances des générateurs, il est nécessaire d'avoir une compréhension approfondie de la modélisation, du contrôle et de l'analyse en régime permanent [87]. La figure 4.1 représente la structure du système.

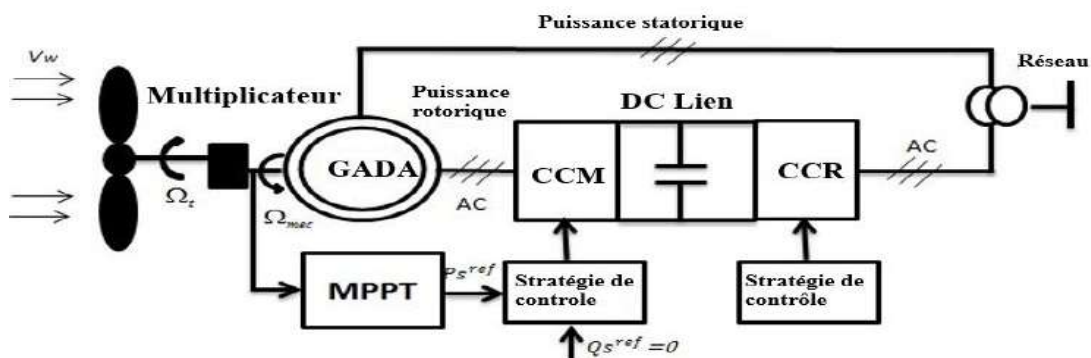


Figure.4.1. Construction de systèmes éoliens basés sur le GADA

4.3. Contrôle des performances du GADA

Pour extraire de manière optimale la puissance du vent et prédire avec précision ses performances, il est nécessaire d'avoir une vision complète de la modélisation, du contrôle et de l'analyse régime permanent (ARP) de la GADA. La GADA est reliée à un réseau électrique à fréquence continue avec une tension constante et le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour construire le cadre de contrôle du générateur. Pour atteindre la tension V_{bus} en tant que tension constante, on supprime le côté réseau (CCR) et on fixe le courant du bus CC car cette étude vise à gérer les performances du GADA. La commande du convertisseur coté machine (CCM) a été effectuée par la commande vectorielle à flux statorique orientée (FOC), car c'est la plus robuste et la plus éprouvée. L'objectif de la commande vectorielle est de permettre à la machine à courant alternatif de se comporter comme une machine à courant continu, ce qui implique d'effectuer un découplage entre les composantes du flux et du couple [88]. Dans la GADA, le FOC permet de découpler efficacement les puissances active et réactive, et il est donc utilisé pour analyser la GADA en régime permanent (RP). De nombreuses tentatives ont été faites pour réaliser la ARP de la GADA en raison de sa popularité croissante [89]. C'est dans cette optique que le présent travail a été réalisé et que la littérature pertinente est présentée. Ce travail traite de la modélisation mathématique de la GADA en RP en utilisant le contrôle vectoriel orienté sur le flux du stator.

Les méthodes suivantes sont proposées pour le contrôle en régime permanent de la GADA d'une éolienne :

- Comparaison de deux stratégies de magnétisation pour le contrôle du GADA en régime permanent.
- Utilisation de modèles Matlab/Simulink pour contrôler les performances de la GADA.

4.4. Contrôle des performances du GADA en régime permanent par deux stratégies de magnétisation

Dans ce travail, le fonctionnement du système peut être assuré en appliquant une commande en régime permanent [89]. L'analyse en régime permanent à l'aide d'équations mathématiques est devenue de plus en plus populaire ces dernières années, car elle offre de meilleures performances que les résultats obtenus avec Simulink [90].

Dans ce travail, on utilise une nouvelle stratégie de commande modifiée avec une approche de magnétisation pour étudier les performances en régime permanent de la GADA. Initialement, on a mis en œuvre la méthode de magnétisation du rotor appliquée dans [91], une approche modifiée.

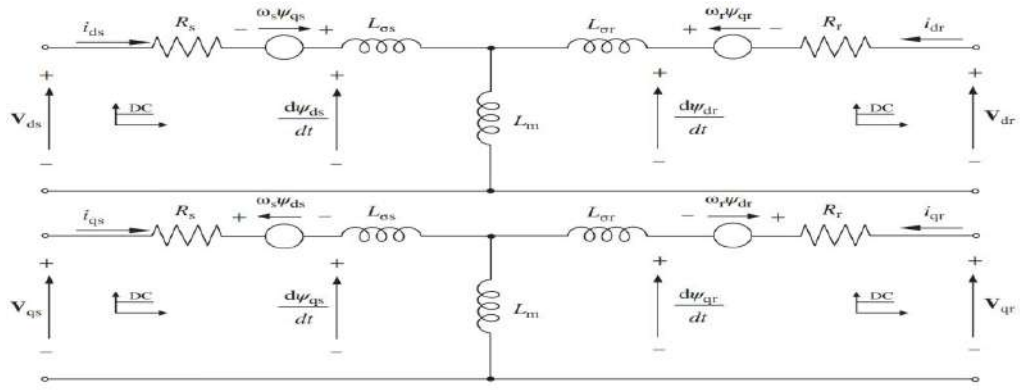


Figure.4.2. Circuit équivalent en régime permanent dans le repère dq de la GADA

a) Magnétisation de la GADA par le rotor : $i_{dr} = 0$

L'analyse en régime permanent de la GADA avec magnétisation du rotor $i_{dr} = 0$ est réalisée à l'aide des équations résumées dans les équations suivantes [92]:

- Flux du stator :

$$|\vec{\psi}_s| = \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \tag{4.1}$$

Avec,

$$A = \left[\frac{R_s}{L_s} \right]^2 + \omega_s^2 ; \quad B = \frac{4}{3} \frac{R_s T_{em} \omega_s}{p} - |\vec{V}_s|^2 ; \quad C = \left[\frac{2}{3} \frac{R_s T_{em}}{p L_m} \right]^2 \tag{4.2}$$

- Courants du rotor :

$$|\vec{i}_r|^2 = i_{dr}^2 + i_{qr}^2 \tag{4.3}$$

Avec,

$$i_{dr} = 0 \quad i_{qr} = -\frac{T_{em}}{\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} |\vec{\psi}_s|} \tag{4.4}$$

- Courants du stator :

$$|\vec{i}_s|^2 = i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \tag{4.5}$$

Avec,

$$i_{ds} = \frac{|\vec{\psi}_s|}{L_s} \quad i_{qs} = -i_{qr} \frac{L_m}{L_s} \tag{4.6}$$

b) Magnétisation de la GADA par le stator : $Q_s = 0$

En utilisant les formules suivantes, on détermine les valeurs en régime permanent de la GADA en utilisant le stator pour magnétiser le générateur $Q_s = 0$ [92].

- Couple :

$$T_{em} = -\frac{3}{2}p \frac{L_m}{L_s} |\vec{\psi}_s| \quad (4.7)$$

- Flux du stator :

$$|\vec{\psi}_s| = \sqrt{\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (4.8)$$

Avec

$$A = \omega_s^2 \quad ; \quad B = \frac{4}{3}R_s T_{em} \omega_s - |\vec{V}_S|^2 \quad ; \quad C = \left[\frac{2}{3} \frac{R_s}{L_m} \right]^2 \left[\frac{Q_s}{\omega_s} \right]^2 + \left[\frac{T_{em}}{p} \right]^2 \quad (4.9)$$

- Flux du rotor

$$|\vec{\psi}_r|^2 = \psi_{dr}^2 + \psi_{qr}^2 \quad (4.10)$$

Avec

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad \text{et} \quad \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (4.11)$$

- Glissement

$$\omega_r = S \omega_s \quad (4.12)$$

Avec,

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \quad (4.13)$$

- Courants du rotor :

$$|\vec{i}_r|^2 = i_{dr}^2 + i_{qr}^2 \quad (4.14)$$

Avec

$$i_{dr} = \frac{|\vec{\psi}_s| - L_s i_{ds}}{L_m} \quad \text{et} \quad i_{qr} = -i_{qs} \frac{L_s}{L_m} \quad (4.15)$$

- Courants du stator :

$$|\vec{i}_s|^2 = i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \quad (4.16)$$

Avec,

$$i_{ds} = \frac{Q_s}{\omega_s |\vec{\psi}_s|} \quad \text{et} \quad i_{qs} = \frac{T_{em}}{\frac{3}{2}p |\vec{\psi}_s|} \quad (4.17)$$

- Tension du rotor

$$\left| \vec{V}_r \right|^2 = V_{dr}^2 + V_{qr}^2 \quad (4.18)$$

Avec,

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - L_r \omega_r i_{qr} + L_m \omega_r i_{qs} \quad \text{et} \quad V_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \omega_r i_{dr} + L_m \omega_r i_{ds} \quad (4.19)$$

- Tension du stator

$$\left| \vec{V}_s \right|^2 = V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \quad (4.20)$$

Avec,

$$V_{ds} = R_s i_{ds} \quad \text{et} \quad V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \left| \vec{\psi}_s \right| \quad (4.21)$$

- Puissance du stator

$$S_p = P_s^2 + Q_s^2 \quad (4.22)$$

Avec,

$$P_s = \frac{3}{2} (R_s i_{ds}^2 + R_s i_{qs}^2 + \omega_s \left| \vec{\psi}_s \right| i_{qs}) \quad \text{et} \quad Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \quad (4.23)$$

- Puissance du rotor

$$R_p = P_r^2 + Q_r^2 \quad (4.24)$$

Avec,

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \quad \text{et} \quad Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}) \quad (4.25)$$

- Puissance mécanique

$$P_{mec} = \frac{T_{em} \omega_m}{p} \quad (4.26)$$

- Rendement

$$\eta = \frac{P_r + P_s}{P_{mec}} \quad \text{Si} \quad P_{mec} < 0 \quad (4.27)$$

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_r + P_s} \quad \text{Si} \quad P_{mec} > 0 \quad (4.28)$$

Où,

p : le nombre de paires de pôles, L_m, L_s : les inductances propres et mutuelles, ψ_s : l'amplitude du flux statorique, ω_s : la vitesse du stator, ω_m : la vitesse mécanique, R_s : la

résistance du stator, V_s : la tension statorique, ω_r : la vitesse du rotor, R_r : la résistance du rotor, S_p : la puissance apparente du stator, P_s : la puissance active du stator, Q_s : la puissance réactive du stator, S le glissement, R_p la puissance apparente du rotor, P_r : la puissance active du rotor, Q_r : la puissance réactive du rotor, ψ_{ds} : le flux statorique selon l'axe d, ψ_{qs} : le flux statorique selon l'axe q, ψ_{qr} : le flux rotorique selon l'axe q, ψ_r : l'amplitude du flux rotorique, ψ_{dr} : le flux rotorique selon l'axe d, i_{qr} : le courant rotorique selon l'axe q, V_{qs} : la tension statorique selon l'axe q, i_{qs} : le courant statorique selon l'axe q, V_{qr} : la tension rotorique selon l'axe q, i_{dr} : le courant rotorique selon l'axe d, V_{dr} : la tension rotorique selon l'axe d, i_{ds} : le courant statorique selon l'axe d, V_{ds} : la tension statorique selon l'axe d.

Les performances de la stratégie $Q_s = 0$ de commande de la GADA en régime permanent peuvent être évaluées en suivant les étapes de programmation ci-dessous. L'organigramme, présenté dans la figure 4.3, décrit le processus de programmation appliqué à l'analyse des performances de la GADA dans des conditions de fonctionnement en régime permanent, en supposant une magnétisation statorique avec $Q_s = 0$.

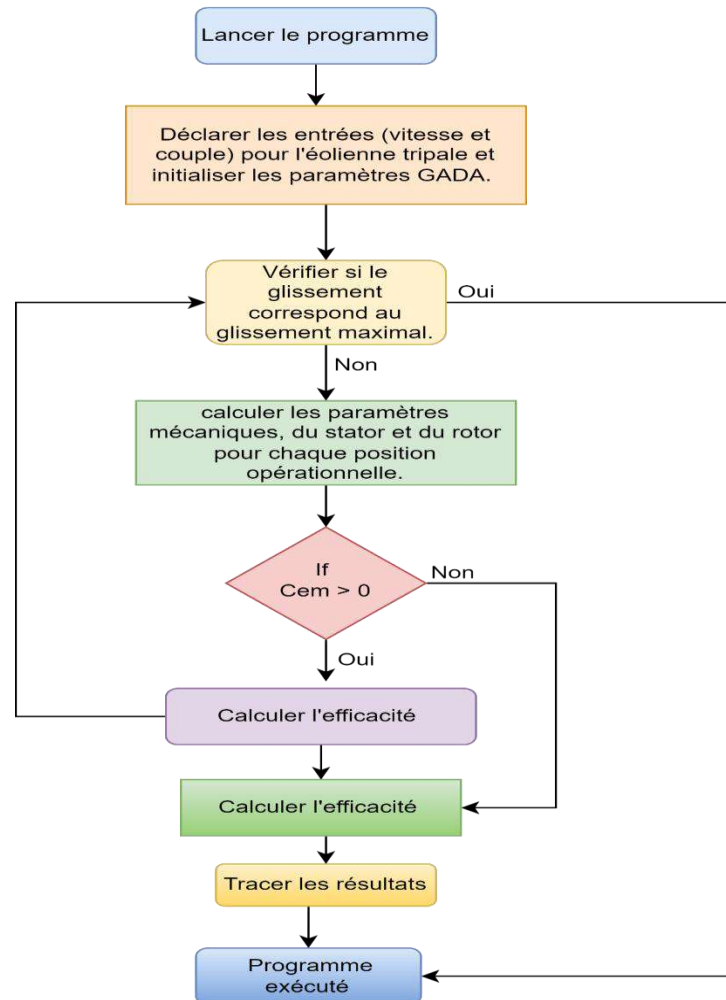


Figure.4.3. Organigramme du processus de programmation appliqué à l'analyse des performances de la GADA avec $Q_s = 0$

La stratégie de fonctionnement en régime permanent peut être examinée en effectuant les étapes de programmation suivantes :

- **Étape 1** : Exécuter le logiciel.
- **Étape 2** : Initialiser les paramètres de la GADA et déclarer les entrées de l'éolienne à trois pales (vitesse et couple).
- **Étape 3** : Vérifier si le glissement est égal au pourcentage maximal de glissement.
- **Étape 4** : Passer directement à l'étape 10 si c'est le cas. Sinon, passer à l'étape 5.
- **Étape 5** : Déterminer les paramètres mécaniques, statoriques et rotoriques à chaque opération.
- **Étape 6** : Identifier le mode de fonctionnement en fonction de la valeur du couple mécanique.
 - Si le couple est positif, passer à l'étape 7.
 - Si le couple est négatif, passer à l'étape 8.
- **Étape 7** : Déterminer le rendement de la machine, puis revenir à l'étape 3.
- **Étape 8** : Calculer l'efficacité du GADA, puis revenir à l'étape 3.
- **Étape 9** : Visualiser les résultats des variables suivantes :
 - Courants rotoriques (i_s, i_r),
 - Vitesse (ω),
 - Rendement (η)
 - Puissances statorique et rotorique (P_s, Q_s, Q_r)
 - Couple électromagnétique (C_{em}).
- **Étape 10** : Le programme s'exécute avec succès.

4.5. Contrôle des performances de la GADA par l'utilisation de modèles Matlab/Simulink

Le modèle de simulation présenté dans la figure 4.4 représente un système de conversion d'énergie éolienne (SCEE) basé sur une GADA. Une machine asynchrone avec un convertisseur coté rotor (CCM) reliant le rotor à une source d'alimentation triphasée constitue la base de la représentation du modèle de la GADA [92]. Afin de simplifier le système, on a utilisé un générateur de modulation de largeur d'impulsion (MLI) à 2 niveaux pour piloter le CCR et on a remplacé le convertisseur coté réseau (CCR) par une source de tension continue. À l'entrée du bloc de commande, un échantillonnage à bloqueur d'ordre zéro a été utilisé pour que le système fonctionne aussi correctement que possible à la réalité en fonction des paramètres suivants : angle du rotor (θ), tension statorique (V_s), vitesse du rotor (ω_m), courant rotorique (I_r). La tension du bus était égale à celle de la source de tension continue. Le bloc de commande du CCM est basé sur une commande vectorielle orientée (FOC) pour les boucles de courant qui contrôlent le CCM.

L'intérieur du bloc de commande du CCM dans le référentiel synchrone est montré par la figure 4.5. Trois régulateurs proportionnels-intégraux (PI) sont utilisés pour assurer le contrôle vectoriel du CCM :

- Un régulateur de courant selon l'axe d soit le courant I_{dr} pour le rotor ;
- Un régulateur de vitesse ;
- Un régulateur de courant selon l'axe q soit le courant I_{qr} pour le rotor ;

- Deux boucles internes de commande du courant qui utilisent les blocs de transformation nécessaires.

Un bloc d'injection de la 3^{ème} harmonique augmente la tension de sortie de 15 % au niveau de la commande. Pour éliminer les termes de couplage croisé, un bloc d'annulation DC est utilisé. La sortie du régulateur PI de vitesse est multiplié par un gain pour obtenir I_{qr_ref} , tandis que I_{dr_ref} est maintenu à zéro. L'angle du rotor (θ_r) peut être calculé à partir de la tension statorique (V_s) et de l'angle du rotor θ . Pour rejeter les petites fluctuations ou harmoniques, le bloc d'angle est utilisé pour synchroniser la tension statorique. Le bloc de mesure triphasé et les signaux de mesure de sortie du modèle de la GADA ont été utilisés pour obtenir les valeurs de courant et de tension nécessaires. Dans le générateur MLI, une approche de prélèvement symétrique régulier est employée, en utilisant un signal triangulaire calibré entre -1 et 1.

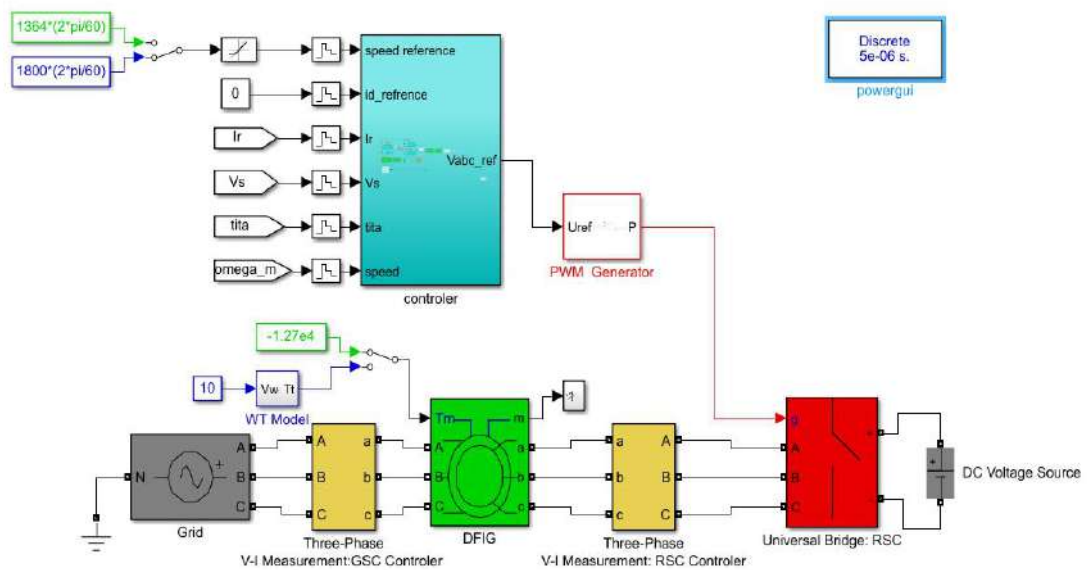


Figure.4.4. Modèle de simulation du système éolien

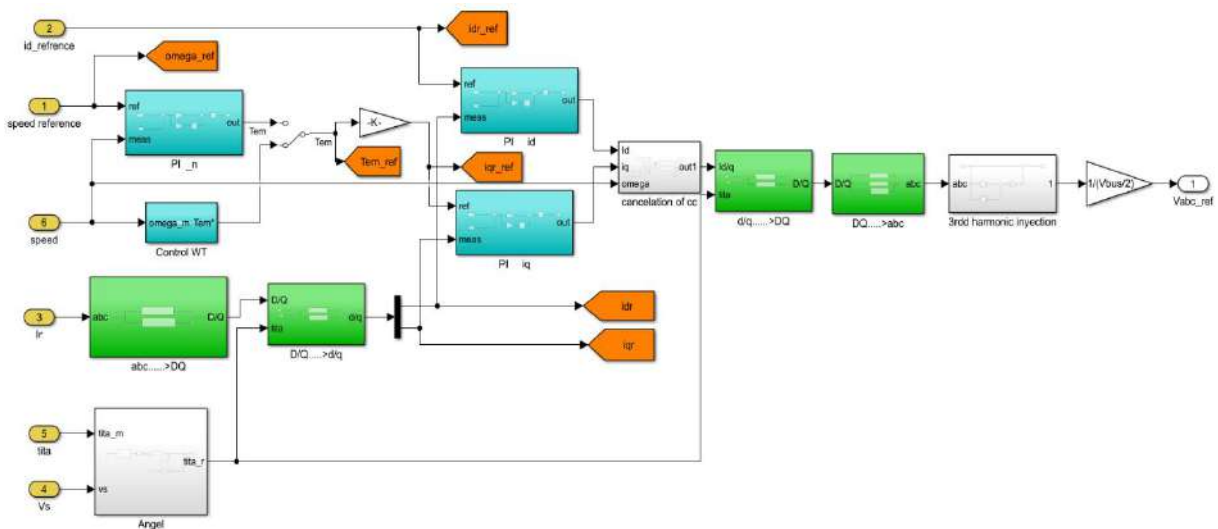
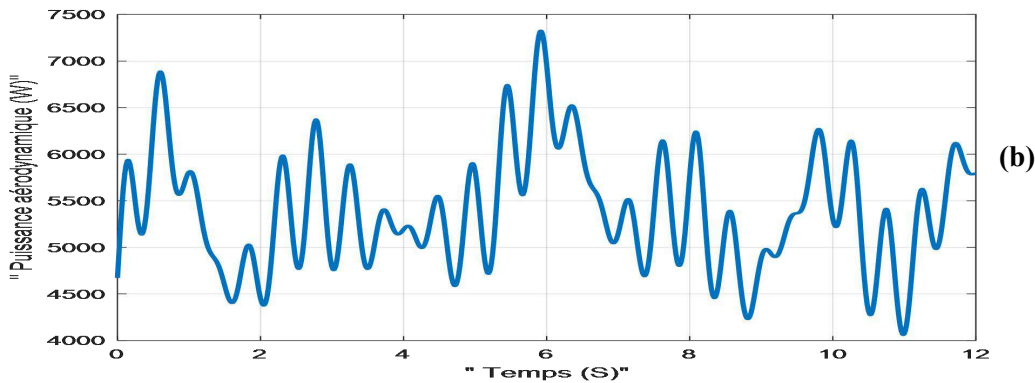
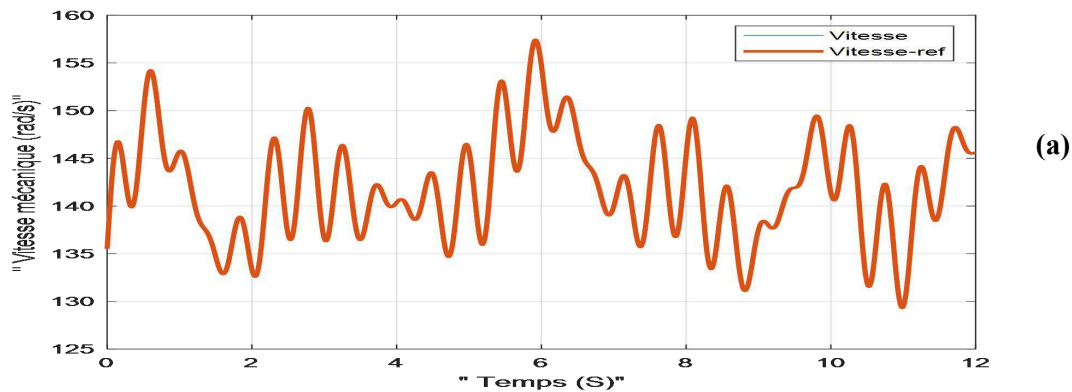


Figure.4.5. Référentiel synchrone et son modèle de commande vectorielle

4.6. Résultats et Discussion

4.6.1. Résultats de simulation de l'éolienne

La plateforme Matlab/Simulink a été utilisée pour présenter les résultats de simulation. La figure 4.6 présente les résultats de simulation de l'éolienne. D'après la figure 4.6.a, on observe que la vitesse suit parfaitement sa référence. On remarque que les deux courbes sont pratiquement superposées, ce qui traduit une excellente précision du suivi de la consigne. Les fluctuations présentes dans le signal de référence sont bien reproduites par la vitesse réelle, ce qui témoigne d'un bon comportement dynamique du système de régulation. La figure 4.6.b montre la variation de la puissance aérodynamique, on observe des fluctuations importantes autour d'une valeur moyenne située entre 5000 et 6000 W. Cette instabilité peut être liée à des conditions environnementales variables ou à une réponse dynamique du système étudié. D'après la figure 4.6.c, la turbine dispose d'un contrôle de suivi de référence suffisant et d'une robustesse adéquate. La figure 4.6.c, représente l'erreur de la vitesse mécanique. On observe que cette erreur oscille autour de zéro avec une amplitude très faible, de l'ordre de 10^{-16} rad/s, ce qui est extrêmement proche de zéro. Cette précision quasi parfaite indique que le système de commande est très performant, avec une réponse dynamique fidèle à la consigne. En pratique, ces erreurs sont négligeables et confirment que le suivi de la vitesse de référence est excellent. Les résultats de simulation prouvent la robustesse du contrôle proposé ainsi que ses excellentes performances dynamiques.



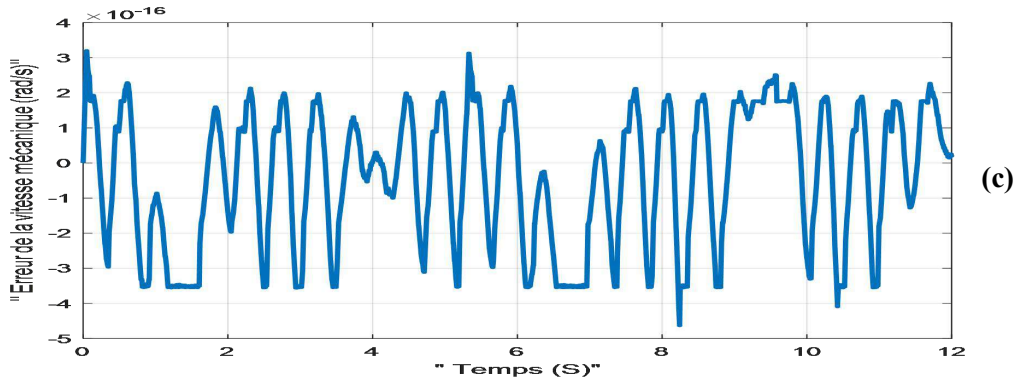
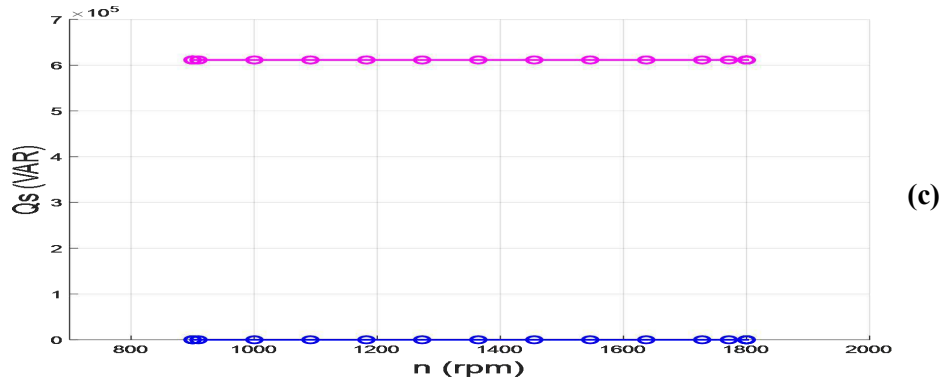
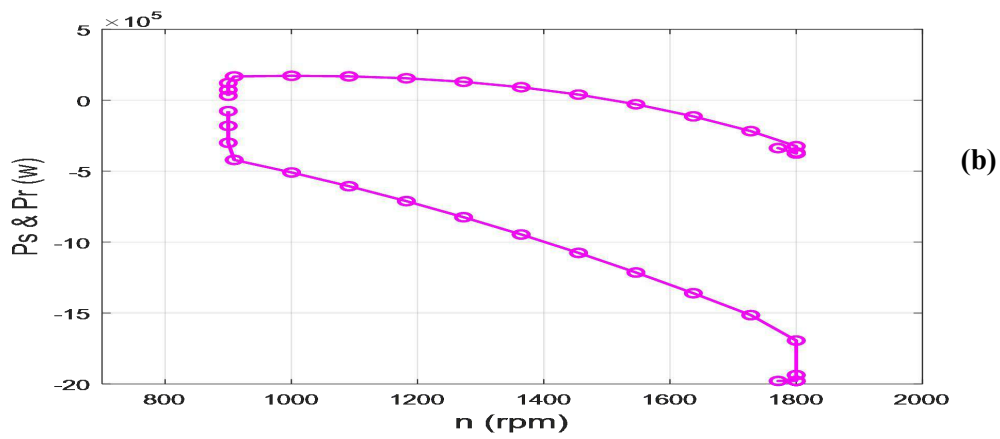
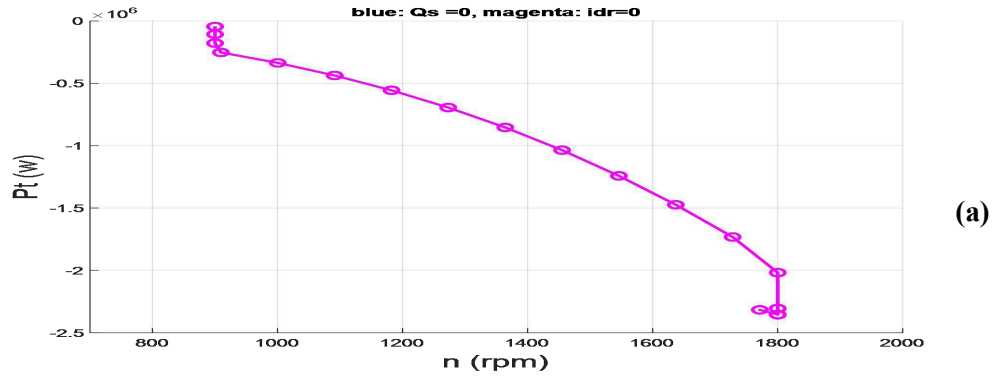


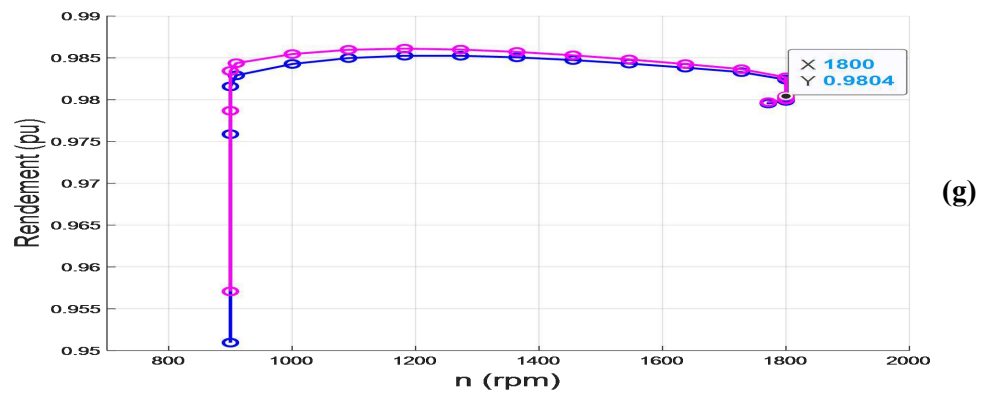
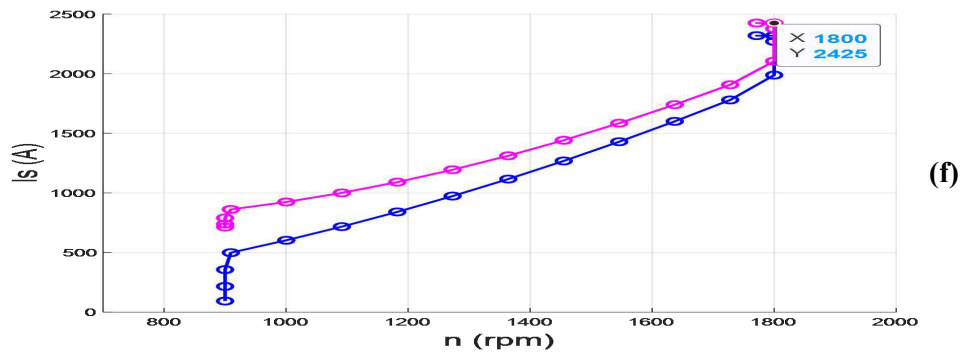
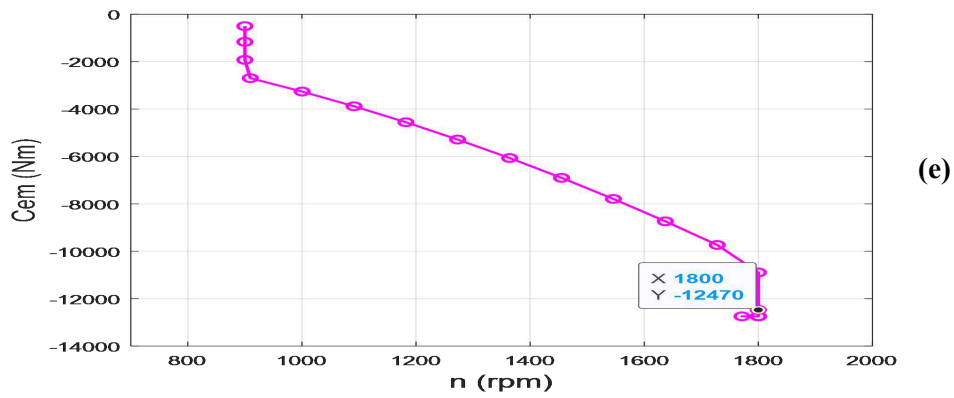
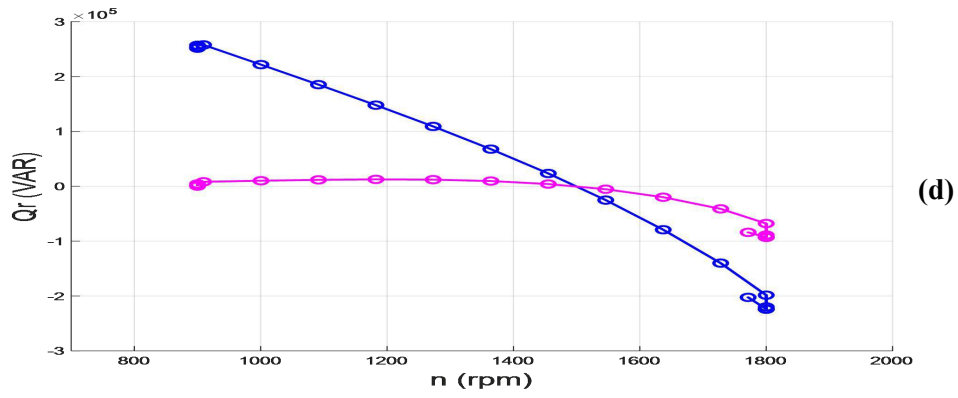
Figure.4.6. Simulation de la commande MPPT avec contrôle de la vitesse mécanique utilisant un FLC

4.6.2. Résultats de la comparaison des deux stratégies de magnétisation pour le contrôle en régime permanent de la GADA

Dans cette section, on compare la méthode utilisée dans [91] et la nouvelle stratégie modifiée proposée. Les résultats comparatifs sont présentés dans la figure 4.7. La méthode utilisée dans [91] est représentée en mauve avec $i_{dr} = 0$, tandis que la nouvelle stratégie modifiée $Q_s = 0$ est représentée en bleu. Selon les résultats présentés dans [91], à une vitesse de 1800 tr/min, une erreur globale inférieure à 10 % est observée lors du calcul de l'écart entre les valeurs calculées et simulées, alors que dans cette étude, l'erreur est de 1,99 %. Nous validons ainsi que la stratégie de magnétisation dans le stator est la meilleure et la plus robuste par rapport à la magnétisation $i_{dr} = 0$. En utilisant le logiciel Matlab avec des vitesses de rotor variant entre 1800 tr/min (vitesse maximale) et 900 tr/min (vitesse minimale), on appliqué la technique de magnétisation du stator afin de déterminer les variables les plus représentatives de la GADA en RP. Les figures 4.7.e, 4.7.a et 4.7.i montrent que le couple, la puissance et les tensions du stator et du rotor sont identiques quelle que soit la méthode utilisée. D'après les figures 4.7.e et 4.7.a, il existe une relation proportionnelle entre la vitesse et le couple, ainsi qu'entre la vitesse et la puissance. Étant donné que la puissance mécanique P_t est le produit du couple et de la vitesse, la Figure 4.7.a montre que sa forme suit celle du couple (figure 4.7.e). La figure 4.7.b présente la puissance active du stator et du rotor (P_s, P_r) avec une puissance active maximale d'environ 2 MW. La figure 4.7.c montre clairement que la puissance réactive résultant de la magnétisation avec $i_{dr} = 0$ constante avec l'augmentation de la vitesse de la machine, tandis que la puissance réactive résultant de la magnétisation par le stator est nulle lorsque $Q_s = 0$. D'après la Figure 9.d, la puissance réactive du rotor dépend de la vitesse de la machine. En revanche, durant la phase de magnétisation du stator, la puissance réactive du stator est nulle. Les tensions du stator (V_s) et du rotor (V_r) sont présentés par la figure 4.7.i. Comme le stator est directement connecté au réseau électrique, l'amplitude de la tension du stator reste constante. En revanche, la tension du rotor varie et dépend de la vitesse du rotor. La Figure 4.7.f montre que la valeur maximale du courant statorique lors de la magnétisation $Q_s = 0$ est inférieure à celle obtenue avec la magnétisation $i_{dr} = 0$, alors que la figure 4.7.h montre que la valeur maximale du courant rotorique est plus élevée avec la magnétisation $Q_s = 0$ qu'avec la magnétisation $i_{dr} = 0$. Les figures 4.7.f et 4.7.h représentent une relation proportionnelle avec la vitesse du rotor et les courants statoriques et rotoriques. L'efficacité est le critère le plus représentatif pour

déterminer la technique optimale. La figure 4.7.g montre que la magnétisation $Q_s = 0$ évolue plus rapidement que la magnétisation $i_{dr} = 0$. D'après les résultats présentés, le comportement en RP de la machine avec magnétisation du stator s'avère plus efficace et plus robuste que la méthode utilisée dans [91].





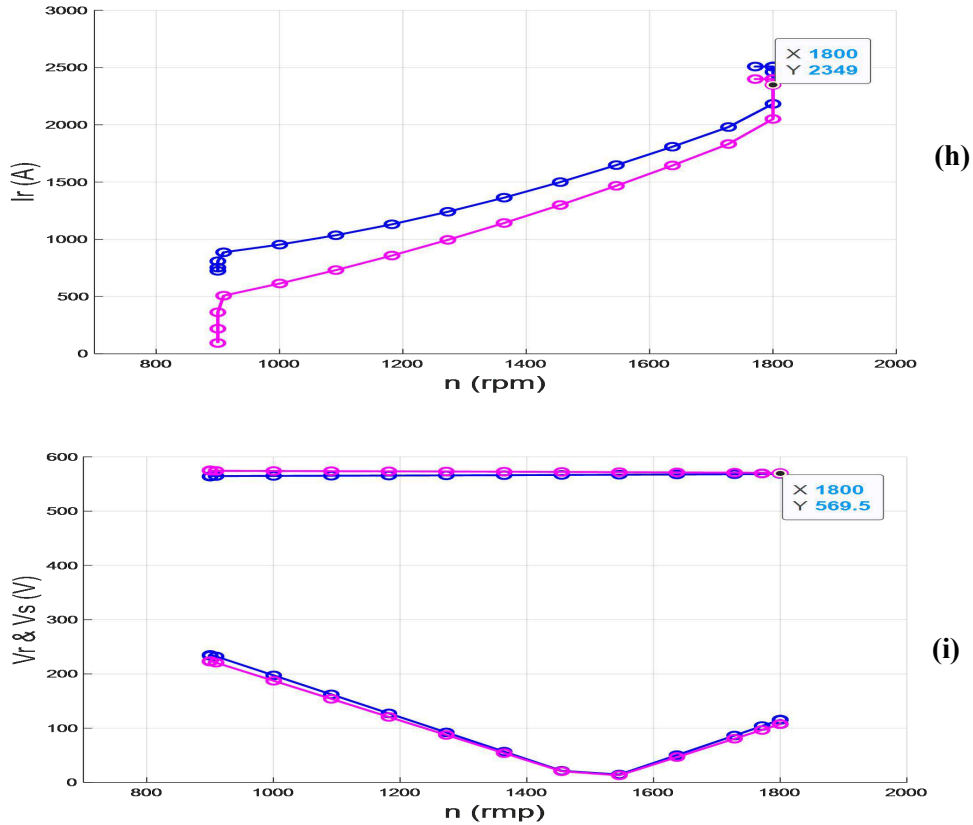
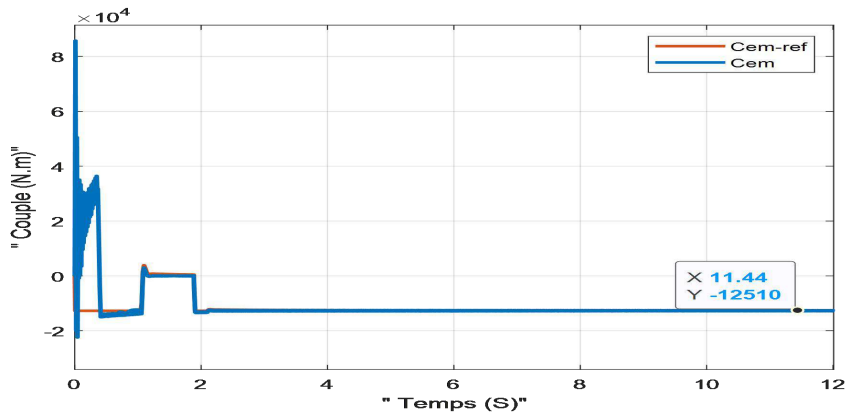


Figure.4.7. Résultats de simulation du contrôle en régime permanent de la GADA dans une éolienne à vitesse variable avec les deux techniques de magnétisation $Q_s = 0$ et $i_{dr} = 0$.

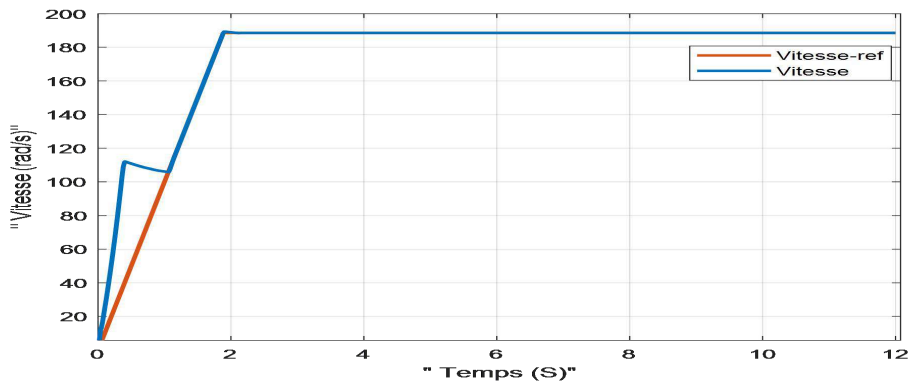
4.6.3. Résultats de simulation des performances de la GADA utilisant Matlab/Simulink

La figure 4.8 présente une simulation du comportement de la structure d'une éolienne basée sur une GADA en utilisant Matlab/Simulink. Elle illustre respectivement le couple, la vitesse de rotation, la tension du stator, le courant du stator, le courant du rotor, le courant du rotor selon l'axe d, la tension du rotor selon l'axe d, la tension du rotor selon l'axe q et celle du courant du rotor selon l'axe q. Étant donné que le couple électromagnétique est en fonction de i_{qr} , la figure 4.8.a, montre que le couple suit exactement sa référence et présente la même forme que i_{qr} . Comme on peut le voir dans la figure 4.8.b, la vitesse optimale est atteinte le régime permanent lorsque le régime transitoire se stabilise progressivement pour se superposer à la vitesse de référence. La figure 4.8.c montre que la tension du stator, d'une amplitude de 562,4 V, reste constante. La figure 4.8.d illustre que les courants triphasés du stator produits par la GADA sont parfaitement sinusoïdaux. De même, la figure 4.8.e montre que les courants triphasés du rotor de la GADA sont également parfaitement sinusoïdaux. Les courants du rotor selon les axes q et d suivent précisément leurs références, comme illustré dans les figures 4.8.j et 4.8.i, le courant i_{dr} est nul en tant que valeur de référence, et i_{qr} conserve la même forme que le couple. Étant donné que le rotor est référencé au stator, les figures 4.8.f et 4.8.h montrent que les valeurs des tensions du rotor selon les axes d et q sont

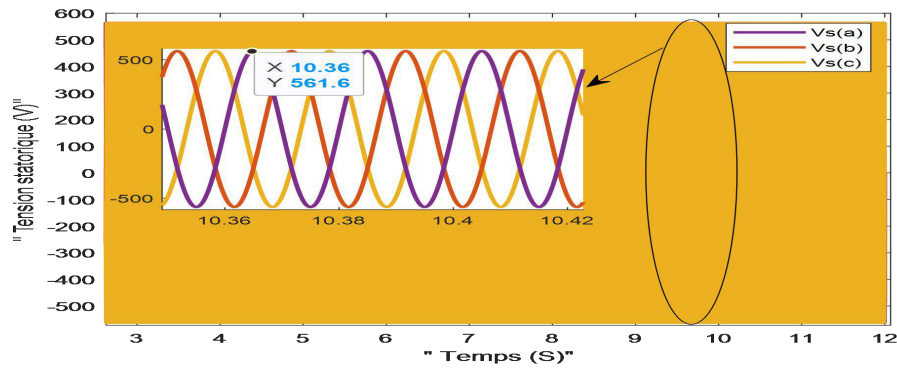
plus faibles. La tension du rotor selon l'axe q fluctue avec i_{qr} et, comme $i_{dr} = 0$, la tension V_r selon l'axe d est égale à zéro. Pour l'analyse en RP, nous avons utilisé la commande vectorielle du flux du stator sous le modèle dq de la GADA [91].



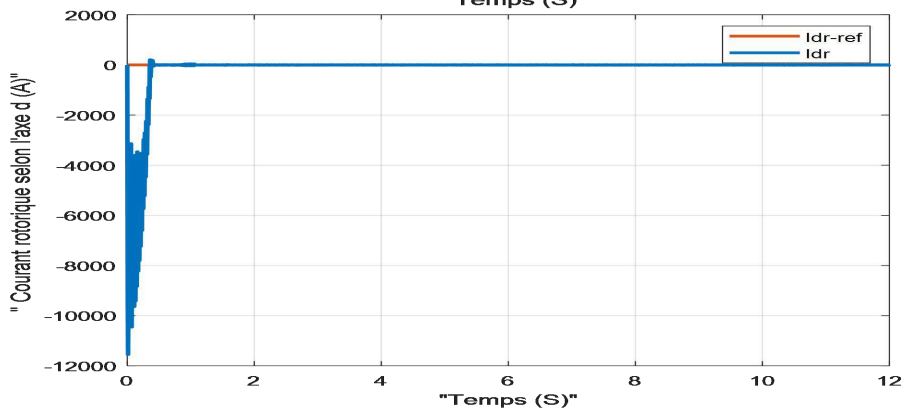
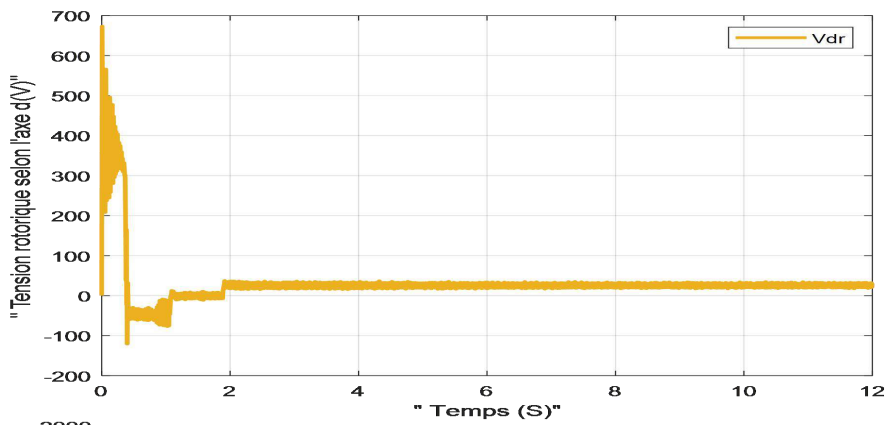
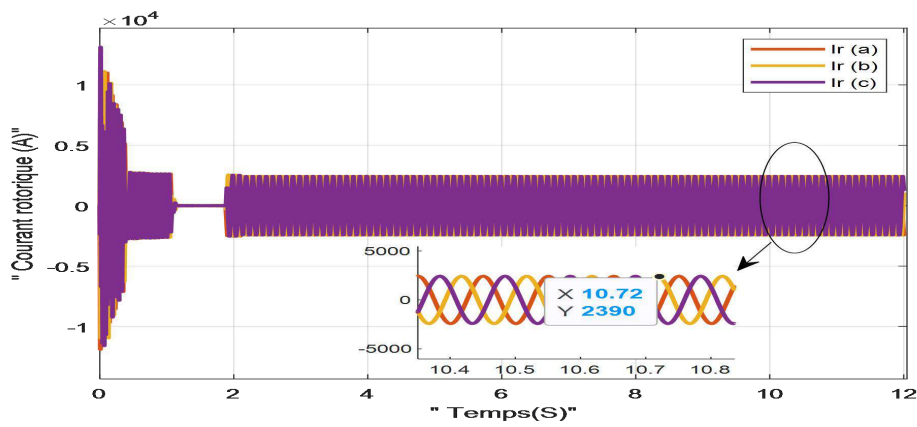
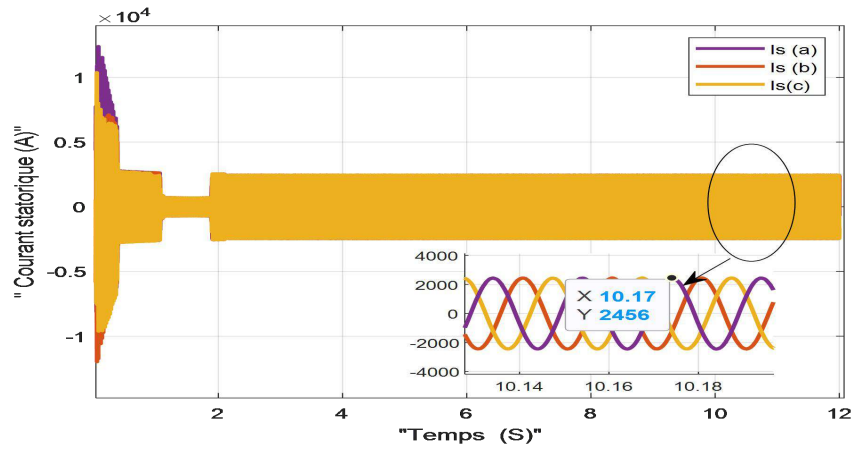
(a)



(b)



(c)



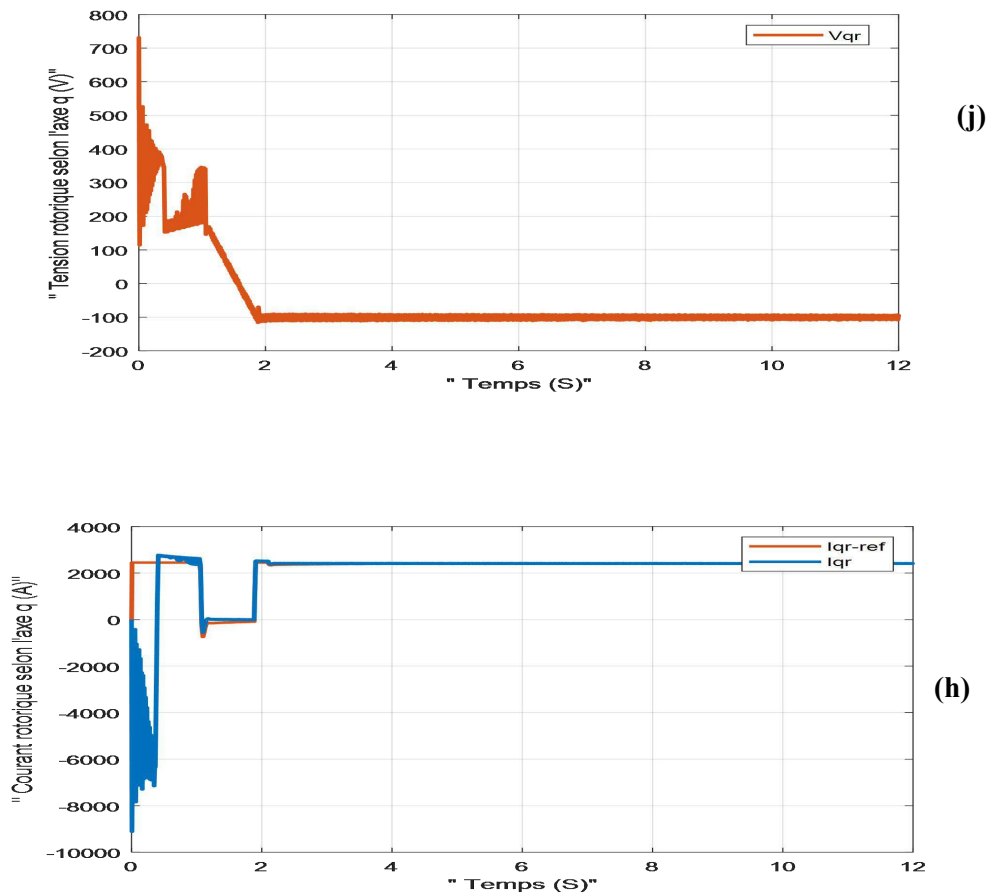


Figure.4.8. Résultats de la simulation de l'étude des performances de la GADA avec les modèles Matlab/Simulink

4.6.4. Comparaison du contrôle et discussion

Cette section compare la méthode proposée avec le modèle Simulink pour les grandeurs les plus courantes de la GADA. La figure 4.7.e affiche le couple obtenu par le contrôle en régime permanent, qui est de -12 510 N.m, tandis que la figure 4.8.a montrée le couple calculé à l'aide du modèle Simulink, qui est de -12 790 N.m. Les figures 4.7.i et 4.8.c montrent que la tension du stator reste constante pendant toute la durée de fonctionnement. La tension du stator déterminée à l'aide du modèle Simulink est de 563,4 V, tandis que l'analyse en régime permanent donne une valeur de 561,6 V. Cette proximité rend les comparaisons pertinentes.

La valeur du courant statorique calculée par le système dans les figures 4.7.f et 4.8.d est de 2418A, tandis que la valeur dérivée des équations est de 2456A ; ces deux valeurs restent dans des limites similaires. Une comparaison équitable des niveaux de courant rotorique est illustrée dans les figures 4.7.h et 4.7.e. La valeur obtenue avec Matlab/programmation est de 2390A, tandis que la valeur calculée avec Matlab/Simulink est de 2389 A pour le courant du rotor. Les valeurs obtenues par calcul et simulation sont présentées dans le tableau 4.1 au point de fonctionnement, en régime permanent, avec $n=1800$ tr/min (la diminution en pourcentage par rapport à la valeur calculée est indiquée par $\downarrow\downarrow$, et l'augmentation en

pourcentage par $\uparrow\uparrow$). L'erreur totale, qui est de 1,99 %, correspond à la différence entre les valeurs simulées et calculées. En conséquence, les résultats confirment que le système fonctionne correctement tel que conçu et qu'il peut être utilisé pour une surveillance plus approfondie en cas de dysfonctionnement.

Tableau.4.1. Comparaison des valeurs en régime permanent en utilisant les deux méthodes « Point de fonctionnement : 1800 tr/min »

Variables en régime permanent	Valeurs calculées	Valeurs simulées	Erreur (%)
Courant du rotor (A)	2390	2389	0.04 $\uparrow\uparrow$
Courant du stator (A)	2456	2418	1.56 $\downarrow\downarrow$
Tension du stator (V)	561.6	563.4	0.32 $\downarrow\downarrow$
Couple (N.m)	-12 510	-12 520	0.07 $\uparrow\uparrow$
Erreur totale			1.99

4.7. Stratégie de contrôle de la GADA

En utilisant le modèle de la turbine qui est étroitement associé au modèle de la GADA, il est possible de déterminer avec précision la puissance que doit générer la GADA à chaque vitesse de vent spécifique qui permet à l'éolienne de tourner à une vitesse optimale. Par conséquent, pour assurer que la machine fonctionne à la vitesse optimale, pour une vitesse de vent donnée, la turbine doit disposer d'un couple mécanique précis ; cela signifie qu'elle doit fournir une puissance active, débitée par la GADA. C'est en se basant sur cette référence de puissance que le système peut ensuite être commandé de manière efficace [93]. La figure 4.9 illustre de manière concise la classification des différentes stratégies de contrôle des entraînements à fréquence variable qui sont de nos jours largement adoptées dans l'industrie. Ces stratégies sont cruciales pour maximiser l'efficacité énergétique et optimiser les performances de l'éolienne.

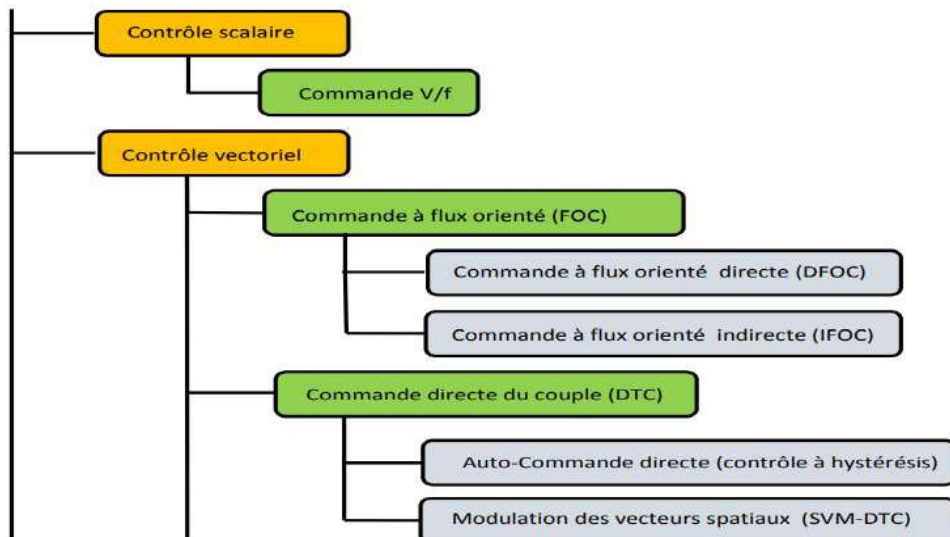


Figure.4.9. Classifications des stratégies de contrôle des entraînements à fréquence variable

4.8. Commande vectorielle à flux orienté de la GADA

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

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone doublement alimentée et également en fonctionnement générateur que moteur [93]. Le principe de la commande par orientation du flux consiste à orienter une des composantes du flux statorique ou rotorique ou d'entrefer sur un axe du référentiel tournant à la vitesse synchrone. En effet, elle permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit. La commande à flux orienté permet de piloter la machine suivant deux axes : un axe pour le flux et un autre pour le couple. La figure 4.10 illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une GADA. En effet, dans une machine à courant continu le courant d'induit I_a contrôle le couple et le courant inducteur I_f contrôle le flux. L'expression du couple électromagnétique de la MCC est donnée par :

$$C_{em} = k\varphi I_a = k' I_a I_f \quad (4.29)$$

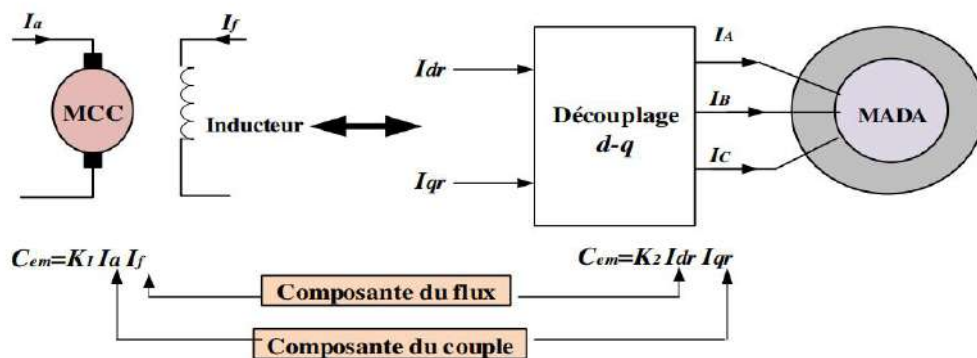


Figure.4.10. Principe de la commande vectorielle à flux orienté

Avec :

φ : Flux imposé par le courant d'excitation I_f ;

I_a : Courant d'induit ;

k, k' : Constantes.

Le développement des nouvelles technologies de semi-conducteurs et de convertisseurs d'électroniques de puissance a facilité l'application de nouveaux algorithmes de commande pour les machines à courant alternatif. Cela permet de découpler les grandeurs internes en régime transitoire et permanent, améliorant ainsi leur performance en tant que moteurs ou générateurs avec un contrôle indépendant du flux, du couple et des puissances active et réactive [94].

La relation du couple électromagnétique est donnée par l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{PM}{L_s} (i_{dr}\varphi_{qs} - i_{qr}\varphi_{ds}) \tag{4.30}$$

En partant de l'équation 4.30, on peut réaliser un découplage de telle façon que le couple sera commandé uniquement par le courant i_{qr} et ainsi donc le flux par le courant i_{dr} . La relation finale du couple est :

$$C_{em} = -\frac{3PM}{2L_s} i_{qr}\varphi_{ds} \tag{4.31}$$

On remarque que cette relation est similaire à celle d'une machine à courant continu (MCC) à excitation séparée. A l'examen de ces dernières relations, on note que :

- La composante i_{dr} joue le rôle du courant d'excitation qui génère et contrôle le flux d'excitation φ_r .
- La composante i_{qr} joue le rôle du courant induit qui, à flux d'excitation donné, contrôle le couple C_{em} .

Rappelons que la synthèse de la commande vectorielle sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la figure 4.11 (c'est à dire celui établi en négligeant la résistance d'une phase statorique avec orientation du flux statorique) et non pas sur le modèle réel de la machine. On a fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques [95]. Ce qui a permis de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe "q" rotorique et la puissance réactive pour l'axe "d" rotorique. La consigne de puissance réactive peut être maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal. La commande vectorielle de la GADA revient alors à contrôler les deux puissances P_s et Q_s par les composantes V_{rd} et V_{rq} .

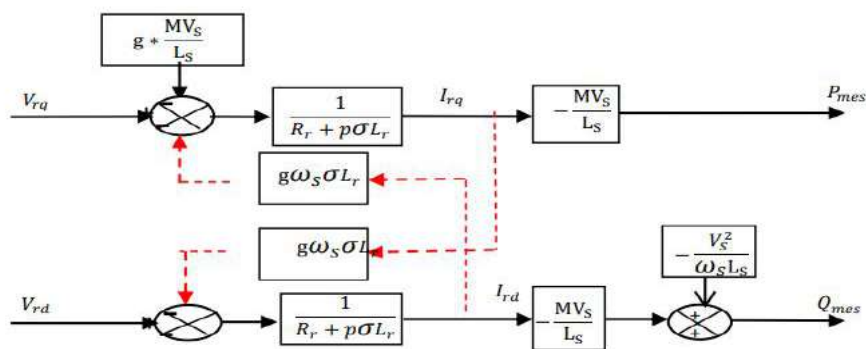


Figure.4.11. Schéma bloc du système à réguler

Ainsi, il est apparu deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [95, 96] :

La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe afin de contrôler indépendamment les puissances

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

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette stratégie de contrôle est appelée méthode indirecte. L'intérêt que présente la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la GADA comme filtre actif, mais elle est complexe à mettre en œuvre.

4.8.2. Commande vectorielle directe basée sur l'orientation du flux statorique (CVD)

Cette partie traite de la régulation indépendante des puissances actives et réactives produites par la GADA, utilisant des boucles de régulation distinctes. Le terme commande directe indique que les régulateurs contrôlent les tensions rotoriques de la machine. Un lien a été établi entre la puissance active et la tension, ainsi qu'entre la puissance réactive et la tension. En supposant une tension réseau stable, chaque puissance peut être gérée avec une boucle de régulation unique. Les couplages entre les axes "d" et "q" sont négligés en raison du faible glissement, tout en compensant les perturbations des f.e.m's. Cela permet un découplage complet des axes de régulation, illustré dans la figure 4.12.

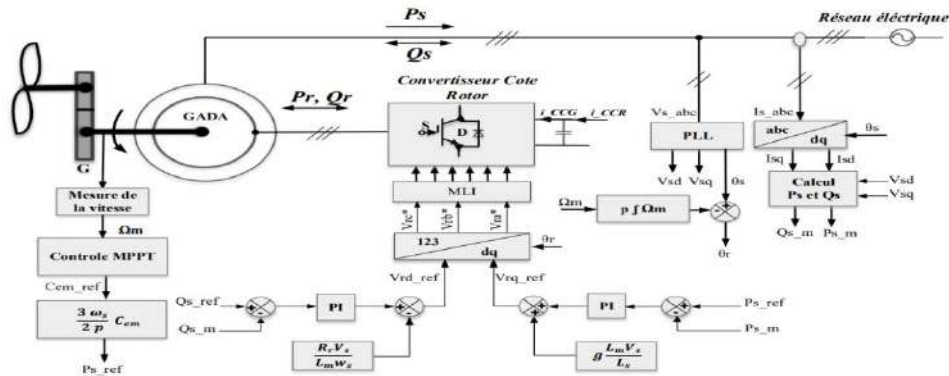


Figure 4.12. Schéma du principe de la Commande vectorielle directe basée sur l'orientation du flux statorique

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_{qr} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{dr} . Pour simplifier la commande de la GADA, la tension du réseau est supposée stable ($\frac{d\varphi_s}{dt} = 0$). Et en régime permanent, les dérivées des courants rotoriques biphasés sont nulles, ce qui nous donne :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m \varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (4.32)$$

Avec,

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

Les courants biphasés rotoriques peuvent être calculés à partir des puissances statoriques comme suit :

$$\begin{cases} i_{rq} = -\frac{2}{3} \frac{L_s}{V_s L_m} P_s \\ i_{rd} = \frac{V_s}{L_m \omega_s} - \frac{2}{3} \frac{L_s}{V_s L_m} Q_s \end{cases} \quad (4.33)$$

Si on néglige les termes de couplage qui apparaissent dans le système d'équations (4.32), à cause du faible glissement, et on remplace les courants biphasés rotoriques par leurs expressions (équation 4.33), on obtient :

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{V_s R_r}{L_m \omega_s} - \frac{2 L_s R_r}{3 L_m} Q_s \\ V_{qr} = -\frac{2 L_s R_r}{3 V_s L_m} P_s + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (4.34)$$

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 4.13. Les régulateurs utilisés sont des correcteurs de type PI.

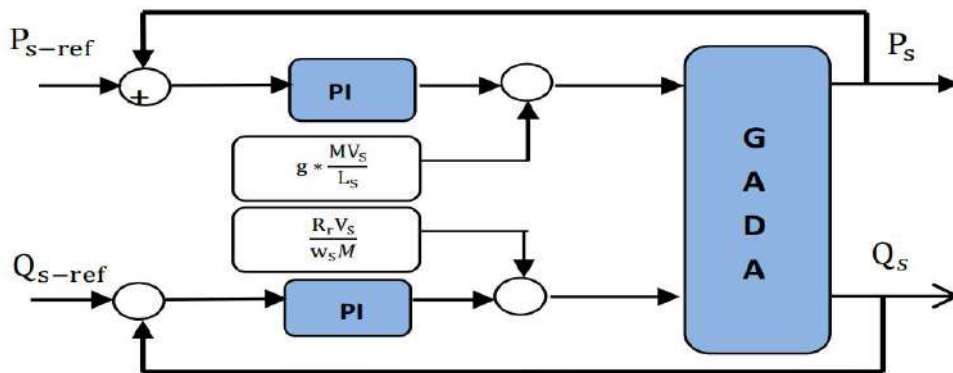


Figure.4.13. Schéma bloc du principe du contrôle des puissances statoriques de la GADA (commande directe)

4.8.3. Commande vectorielle indirecte basée sur l'orientation du flux statorique (CVI)

Dans le but d'améliorer la commande mise en place dans la séquence précédente, une boucle supplémentaire de régulation a été intégrée spécifiquement pour les courants rotoriques. Cette nouvelle boucle a été ajoutée au niveau des puissances afin d'éliminer efficacement l'erreur statique tout en s'assurant de préserver la dynamique essentielle du système dans son ensemble [97]. Il existe deux structures pour construire cette commande :

- Commande indirecte sans boucle de puissance.
- Commande indirecte avec boucle de puissance.

4.8.3.1. Commande indirecte sans boucle de puissance

Dans cette commande et afin de garantir une bonne stabilité du système, on introduit une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la génératrice. Les courants rotoriques

I_{rq} et I_{rd} , sont respectivement les images de la puissance active statorique P_s et la puissance réactive statorique Q_s . Ils doivent poursuivre leurs courants de références [98].

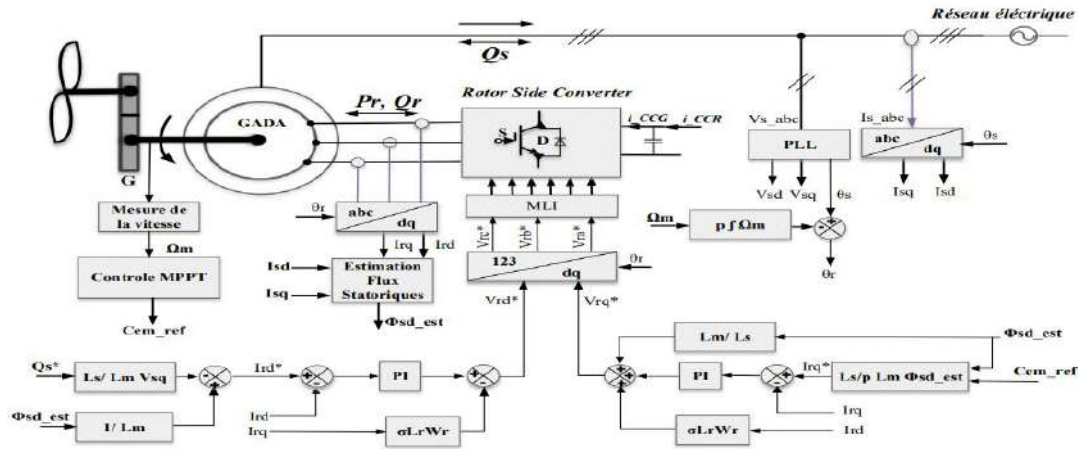


Figure.4.14. Principe de contrôle vectoriel sans boucle de puissance

Les courants de références peuvent être calculés à partir des puissances souhaitées comme suit :

$$\begin{cases} i_{rq_ref} = -\frac{L_s}{V_s L_m} P_{s_ref} \\ i_{rd_ref} = \frac{V_s^2}{L_m \omega_s} - \frac{L_s}{V_s L_m} Q_{s_ref} \end{cases} \quad (4.35)$$

Ensuite, des boucles de contrôle sont utilisées pour s'assurer que les courants réels suivent leurs références. Les tensions calculées par cette méthode sont appelées les tensions de références. L'onduleur nécessite que la tension de chacune de ces trois phases soit calculée à partir de V_{rd_ref} et V_{rq_ref} au moyen de la transformation inverse de Park. En plus les courants i_{rd} et i_{rq} sont calculés en fonction des courants triphasés rotoriques en utilisant la transformation de Park. Les deux fonctions nécessitent de connaître l'angle entre l'axe d et les phases de rotor. Par conséquent, la position des phases du rotor, c'est-à-dire la position angulaire du rotor doit être connue.

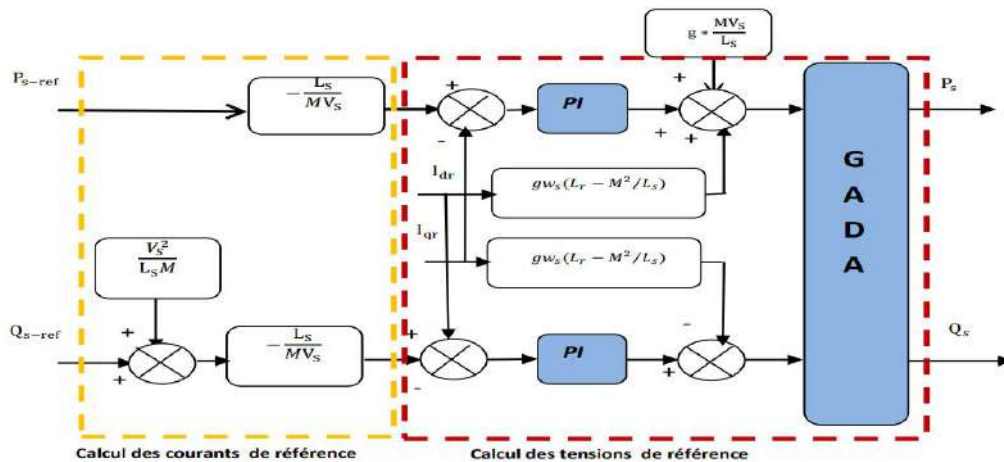


Figure.4.15. Schéma de la commande indirecte sans boucles de puissances

pouvant être utilisés pour la boucle de contrôle. Le plus utilisé est le contrôleur proportionnel intégral (PI) en raison de sa simplicité [100].

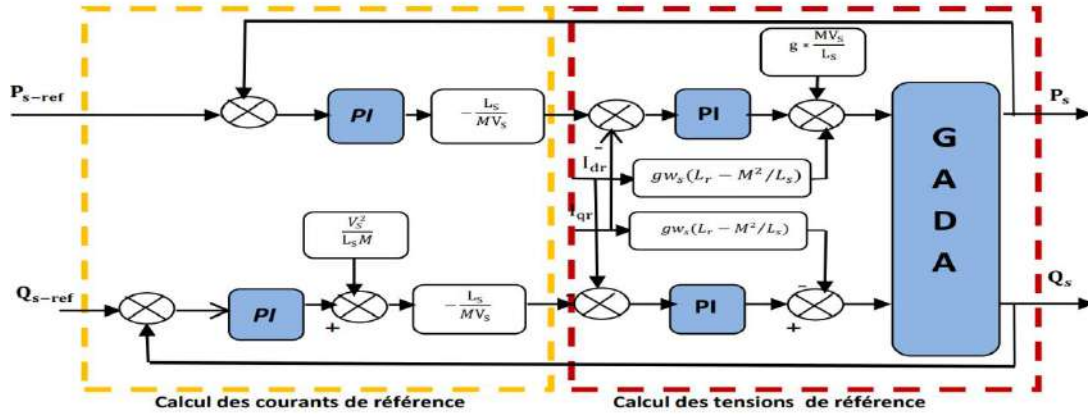


Figure.4.17. Schéma bloc du principe du contrôle des courants rotoriques de la GADA (commande indirecte)

4.9. Synthèse du régulateur PI

La rapidité et la simplicité du régulateur PI constituent ses principales performances pour lesquelles on l'utilise dans la commande de la GADA [100]. La figure 4.18 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI.

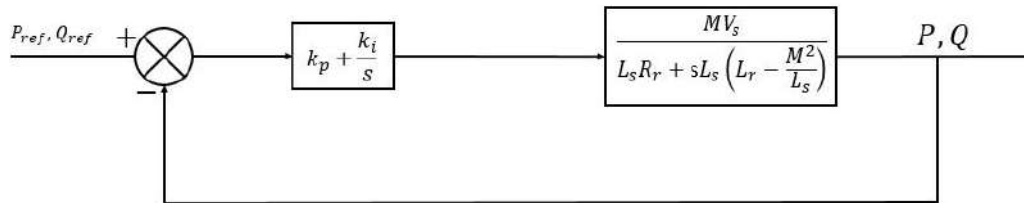


Figure.4.18. Système régulé par un PI

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est donnée par :

$$G_{BO}(s) = \frac{P_S}{P_S^*} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \cdot \left(\frac{M_{sr}V_s}{R_r L_s + s L_s L_r}\right) \quad (4.37)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r L_s}{\sigma L_s L_r} \quad (4.38)$$

Notons toutefois que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante [139]. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$G_{BO}(s) = \frac{(k_p \cdot s + k_i) \cdot M_{sr} V_s}{s \cdot R_r L_s + s^2 \cdot L_s \cdot L_r \cdot \sigma} \quad (4.39)$$

En boucle fermée, on obtient la fonction de transfert suivante :

$$G_{BF}(s) = \frac{P_S}{P_S^*} = \frac{\frac{(k_p s + k_i) M_{SR} V_S}{L_S L_R \sigma}}{s^2 + s \frac{R_r L_S + k_p M_{SR} V_S + k_i M_{SR} V_S}{L_S L_R \sigma} + \frac{k_i M_{SR} V_S}{L_S L_R \sigma}} \quad (4.40)$$

Ce système est de la forme canonique d'une fonction de transfert du deuxième ordre :

$$G(s) = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.41)$$

Où, ξ représente le coefficient d'amortissement et ω_n la pulsation de coupure.

L'identification terme à terme permet d'écrire :

$$\begin{cases} 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{R_r L_S + k_p M_{SR} V_S}{\sigma L_r L_S} \\ \omega_n^2 = \frac{k_i M_{SR} V_S}{\sigma L_r L_S} \end{cases} \quad (4.42)$$

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

$$\begin{cases} k_p = \frac{\sigma L_r L_S 2 \cdot \xi \cdot \omega_n - R_r L_S}{M_{SR} V_S} \\ k_i = \frac{\sigma L_r L_S \omega_n^2}{M_{SR} V_S} \end{cases} \quad (4.43)$$

Pour optimiser les performances dynamiques et la stabilité du système, on opte pour un coefficient d'amortissement en boucle fermée ξ de valeur égale à 0,7. Dans ce cas, on utilise le mode de compensation des pôles pour sa rapidité.

4.10. Résultats et discussion obtenus en utilisant un régulateur PI

La figure 4.19 montre l'association de la partie mécanique, électrique de la machine par régulateur PI. Les résultats obtenus sont présentés par la figure 4.19: (a) puissance réactive, (b) puissance active, (c) couple. On peut remarquer que les échelons de puissances sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. La figure 4.19 présente les résultats obtenus pour le test de suivi de consigne. Dans le cas de la stratégie de commande par régulateur PI, on remarque : un découplage parfait et une bonne poursuite au niveau des puissances active et réactive statorique, avec une petite erreur statique en régime permanent. On constate que les puissances active et réactive suivent parfaitement les références. Le signe négatif de la puissance active caractérise que le stator génère la puissance, quel que soit le régime de fonctionnement.

Le facteur de puissance unitaire à cause de la puissance réactive nulle obtenue après la fin de son régime transitoire. Les deux puissances sont parfaitement découplées. Dans les prochaines étapes, nous étudierons d'autres commandes, et nous montrerons que celles-ci ne sont pas parfaitement constantes en régime permanent, mais elles fluctuent autour des références.

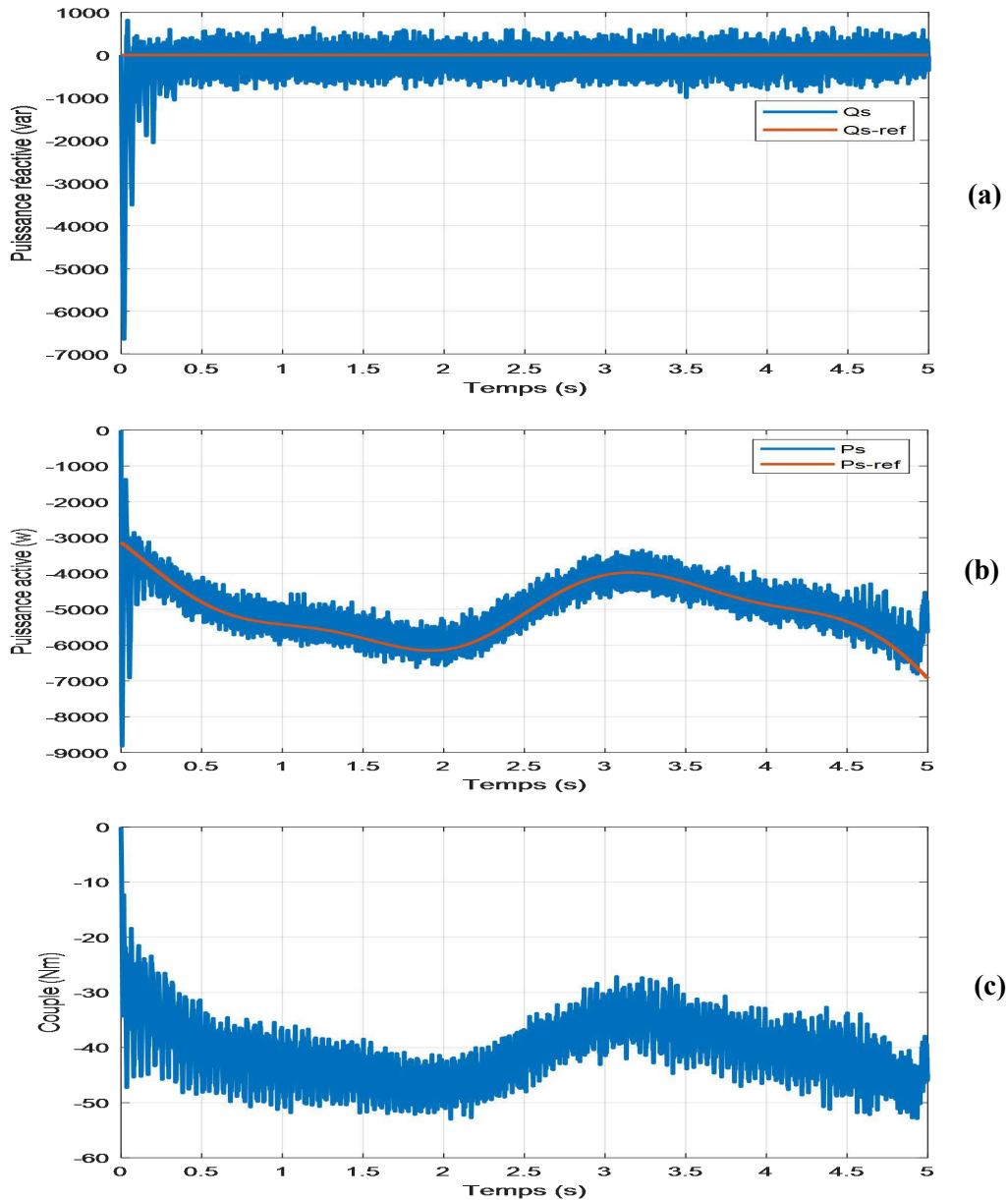


Figure.4.19. Résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec Réglage des puissances par régulateur PI

4.11. Application de la commande par mode glissant à la GADA pour le contrôle de la puissance active et réactive

L'objectif de l'application du CMG pour le système éolien est de contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la GADA à flux orienté et de valider l'approche présentée par des résultats de simulation.

Sur la base de ce qu'il a été développé au deuxième chapitre, on déduit le système d'équations d'état de la GADA suivant [101] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_a \cdot \varphi_s \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (4.44)$$

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (4.45)$$

Les courants rotoriques I_{qr} et I_{dr} sont respectivement les images des puissances statoriques active P_s et réactive Q_s , qui doivent poursuivre leurs courants de références. Les références des courants rotoriques de la GADA dans le repère de Park peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} i_{rqref} = -\frac{L_s}{V_s L_m} P_{s_ref} \\ i_{rdref} = \frac{V_s}{L_s M} - \frac{L_s}{M V_s} Q_{s_ref} \end{cases} \quad (4.46)$$

Les expressions des dérivées de courants rotoriques peuvent être exprimées comme suit:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{dr} = -\frac{R_r}{L_r \sigma} i_{dr} + \omega_r i_{qr} + \frac{1}{L_r \sigma} V_{dr} \\ \frac{d}{dt} i_{qr} = \omega_r i_{dr} - \frac{R_r}{L_r \sigma} i_{qr} - \frac{L_m}{L_r \sigma} \omega_r \varphi_s + \frac{1}{L_r \sigma} V_{qr} \end{cases} \quad (4.47)$$

Sous forme matricielle, on obtient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{L_r \sigma} & \omega_r \\ \omega_r & -\frac{R_r}{L_r \sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_r \sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_r \sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L_m}{L_r \sigma} \omega_r \varphi_s \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

La mise en œuvre de la CMG nécessite principalement trois étapes :

- Choix de la surface de glissement ;
- Établissement des conditions d'existence de la convergence ;
- Détermination de la loi de commande.

4.11.1. Contrôle de la puissance active

Le degré relatif de la surface est égal à un ($r=1$). Puisque la commande réelle V_{qr} apparaît dans la dérivée première de la puissance active [102].

La variable de glissement est définie par [102] :

$$S_{ps} = P_{s_ref} - P_{s_mes} \quad (4.49)$$

On considère la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V(S_{ps}) = \frac{1}{2} S_{ps}^2 \quad (4.50)$$

La dérivée de la fonction candidate de Lyapunov :

$$\dot{V}(S_{ps}) = S_{ps} \cdot \dot{S}_{ps} \quad (4.51)$$

Avec,

$$\begin{cases} \dot{S}_{ps} = \dot{P}_{s-ref} - \dot{P}_{s-mes} \\ \dot{S}_{ps} = \dot{P}_{s-ref} - \left(-\frac{V_s M}{L_s} \frac{di_{qr}}{dt} \right) \end{cases} \quad (4.52)$$

En remplaçant l'expression de la dérivée du courant i_{rq} dans l'équation de (4.52), on obtient :

$$\dot{S}_{ps} = \dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} (V_{rq} - R_r i_{rq}) \quad (4.53)$$

On prend :

$$V_{qr} = V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n \quad (4.54)$$

$$\dot{S}_{ps} = \dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} ((V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) - R_r i_{rq}) \quad (4.55)$$

Pendant le mode glissant et en régime permanent, on a :

$$\dot{S}_{ps} = 0, S_{ps} = 0, V_{rq}^n = 0 \quad (4.56)$$

$$0 = \dot{P}_{s-ref} + V_s \frac{M}{\sigma \cdot L_r \cdot L_s} (V_{qr}^{eq} - R_r i_{rq}) \quad (4.57)$$

Alors,

$$-\frac{\sigma \cdot L_r \cdot L_s}{V_s M} \dot{P}_{s-ref} = (V_{qr}^{eq} - R_r i_{rq}) \quad (4.58)$$

Donc, la commande équivalente est donnée par :

$$V_{rq}^{eq} = -\dot{P}_{s-ref} \frac{L_s L_r \sigma}{M V_s} + R_r I_{rq} \quad (4.59)$$

Pendant le mode de convergence, la condition de puissance $S_{ps} \cdot \dot{S}_{ps} \leq 0$ est vérifié, donc :

$$\dot{S}_{ps} = -V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{rq}^n \quad (4.60)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, nous devons poser :

$$V_{rq}^n = K_1 \text{sign}(S(P_s)) \quad (4.61)$$

K_1 constante positive.

Pour réduire le dépassement de la tension de référence V_{qr} , il est souvent utile d'ajouter un limiteur de tension. La figure 4.20 montre structure de contrôle de mode glissant de la puissance active

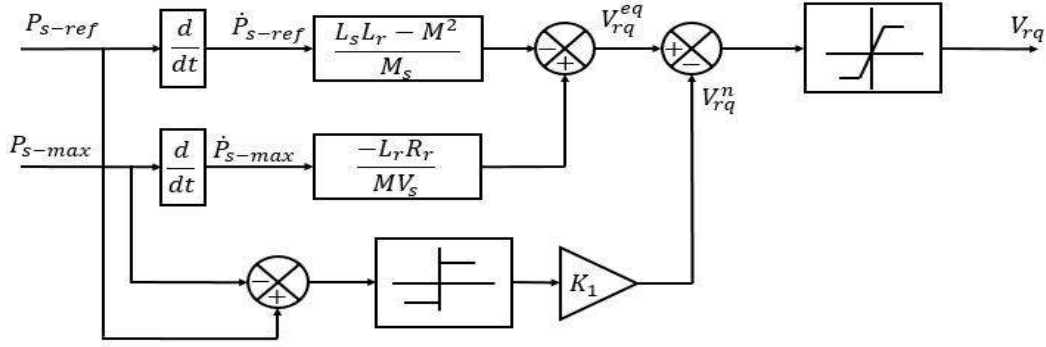


Figure.4.20. Structure du contrôleur en mode glissant pour la puissance active

4.11.2. Contrôle de la puissance réactive

Pour $r = 1$, l'expression de la surface de commande de la puissance réactive a pour forme [102]:

$$S_{Q_s} = P_{Q_ref} - P_{Q_mes} \quad (4.62)$$

On considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(S_{Q_s}) = \frac{1}{2} S_{Q_s}^2 \quad (4.63)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov :

$$\dot{V}(S_{Q_s}) = S_{Q_s} \cdot \dot{S}_{Q_s} \quad (4.64)$$

Avec,

$$\begin{cases} \dot{S}_{Q_s} = \dot{Q}_{s-ref} - \dot{Q}_{s-mes} \\ \dot{S}_{Q_s} = \dot{Q}_{s-ref} - V_s \frac{M}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad (4.65)$$

En remplaçant l'expression de la dérivée du courant i_{rd} dans l'équation de (4.65), on obtient :

$$\dot{S}_{Q_s} = \dot{Q}_{s-ref} - V_s \frac{M}{\sigma.L_r.L_s} (V_{rd} - R_r i_{rd}) \quad (4.66)$$

On prend :

$$V_{dr} = V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n \quad (4.67)$$

$$\dot{S}_{Q_s} = \dot{Q}_{s-ref} - V_s \frac{M}{\sigma.L_r.L_s} ((V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n) - R_r i_{rd})$$

Pendant le mode glissant et en régime permanent, on a :

$$\dot{S}_{Q_s} = 0, S_{Q_s} = 0, V_{rd}^n = 0 \quad (4.68)$$

$$0 = \dot{Q}_{s-ref} - V_s \frac{M}{\sigma.L_r.L_s} (V_{dr}^{eq} - R_r i_{rd}) \quad (4.69)$$

Alors,

$$- \dot{Q}_{s-ref} \frac{\sigma.L_r.L_s}{M V_s} = V_{dr}^{eq} - R_r i_{rd} \quad (4.70)$$

Donc, la commande équivalente est donnée par:

$$V_{rd}^{eq} = -\dot{Q}_{s-ref} \frac{L_s L_r \sigma}{M V_s} + R_r I_{rd} \quad (4.71)$$

Pendant le mode de convergence, la condition de puissance $S_{Q_s} \cdot \dot{S}_{Q_s} \leq 0$ est vérifié, donc :

$$\dot{S}_{Q_s} = -V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} V_{rd}^n \quad (4.72)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, on pose :

$$V_{rd}^n = K_2 \text{sign}(S_{Q_s}) \quad (4.73)$$

Ou, K_2 constante positive

Pour atténuer le dépassement de la tension de référence V_{rd} , il est souvent utile d'ajouter un limiteur de tension. La figure 4.21 montre la structure de contrôle de mode glissant de la puissance réactive.

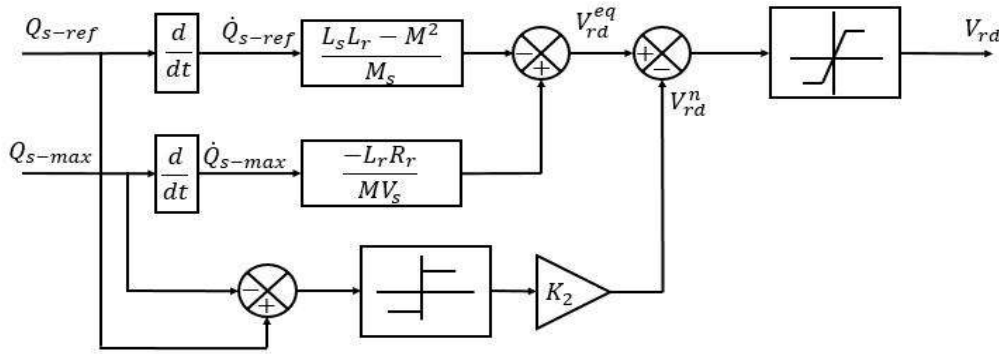


Figure.4.21. Structure du contrôleur en mode glissant pour la puissance réactive

4.11.3. Surface de régulation du courant rotorique quadrature

L'erreur du courant rotorique quadrature i_{qr} est définie par :

$$e = i_{qr_ref} - i_{qr} \quad (4.74)$$

La surface de glissement du courant rotorique quadrature est définie comme suit :

$$S(i_{qr}) = e = i_{qr_ref} - i_{qr} \quad (4.75)$$

Sa dérivée :

$$\dot{S}(i_{qr}) = \dot{i}_{qr_ref} - \dot{i}_{qr} \quad (4.76)$$

En substituant l'expression de \dot{i}_{qr} dans l'équation 4.76, on obtient :

$$\dot{S}(i_{qr}) = \dot{i}_{qr_ref} - \left(-\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{qr} - g \omega_s i_{dr} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr} \right) \quad (4.77)$$

On prend,

$$V_{qr} = V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n \quad (4.78)$$

$$\dot{S}(i_{qr}) = \dot{i}_{qr_{ref}} - \left(-\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{qr} - g \omega_s i_{dr} + \frac{1}{\sigma T_r} (V_{qr}^{eq} + V_{qr}^n) \right) \quad (4.79)$$

Pendant le mode glissant et dans le régime permanent, on a :

$$\dot{S}(i_{qr}) = 0, S(i_{qr}) = 0, V_{rq}^n = 0 \quad (4.80)$$

$$0 = \dot{i}_{qr_{ref}} - \left(-\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{qr} - g \omega_s i_{dr} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr}^{eq} \right) \quad (4.81)$$

Alors,

$$\dot{i}_{qr_{ref}} = -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{qr} - g \omega_s i_{dr} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{qr}^{eq} \quad (4.82)$$

Donc, la commande équivalente est donnée par :

$$V_{qr}^{eq} = \sigma L_r \left(\dot{i}_{qr_{ref}} + \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s T_s L_r} \right) i_{qr} + g \omega_s i_{dr} \right) \quad (4.83)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, on pose :

$$V_{rd}^n = K_3 \text{sign}(S(i_{qr})) \quad (4.84)$$

K_3 : Constante positive.

4.11.4. Surface de régulation du courant rotorique directe

L'erreur du courant rotorique quadrature i_{qr} est définie par :

$$e = i_{dr_{ref}} - i_{dr} \quad (4.85)$$

La surface de glissement du courant rotorique quadrature est définie comme suit :

$$S(i_{dr}) = e = i_{dr_{ref}} - i_{dr} \quad (4.86)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{S}(i_{dr}) = \dot{i}_{dr_{ref}} - \dot{i}_{dr} \quad (4.87)$$

En substituant l'expression de \dot{i}_{dr} dans l'équation (4.87), on obtient :

$$\dot{S}(i_{dr}) = \dot{i}_{dr_{ref}} - \left(-\frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + g \omega_s i_{qr} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr} \right) \quad (4.88)$$

On prend :

$$V_{dr} = V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n \quad (4.89)$$

$$\dot{S}(i_{dr}) = \dot{i}_{dr_{ref}} - \left(-\frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + g \omega_s i_{qr} + \frac{1}{\sigma L_r} (V_{dr}^{eq} + V_{dr}^n) \right) \quad (4.90)$$

Pendant le mode glissant et dans le régime permanent, on a :

$$\dot{S}(i_{dr}) = 0, S(i_{dr}) = 0, V_{rd}^n = 0 \quad (4.91)$$

$$0 = i_{dr_ref} - \left(-\frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + g\omega_s i_{qr} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr}^{eq} \right) \quad (4.92)$$

Alors,

$$i_{dr_ref} = -\frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} + g\omega_s i_{qr} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{dr}^{eq} \quad (4.93)$$

Donc, la commande équivalente est donnée par :

$$V_{dr}^{eq} = \sigma L_r \left(i_{dr_ref} + \frac{1}{\sigma T_r} i_{dr} - g\omega_s i_{qr} \right) \quad (4.94)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, on pose :

$$V_{rd}^n = K_4 \text{sign}(S(i_{dr})) \quad (4.95)$$

Ou, K_4 ; constante positive.

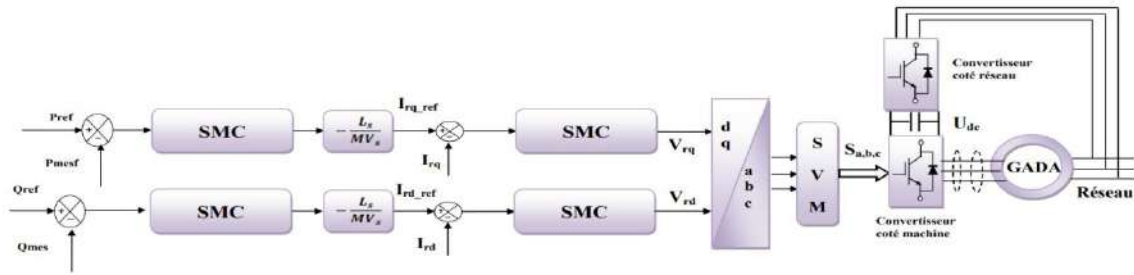


Figure.4.22. Schéma bloc de réglage par mode glissant

4.12. Résultats et discussion obtenus en utilisant un régulateur CMG

La figure 4.23 montre l'association de la partie mécanique, et la partie électrique de la machine par mode glissant. On constate que les grandeurs définies précédemment gardent les mêmes allures des figures 4.23. Le temps réponse est plus court et les oscillations sont moins importantes. Selon la figure 4.23, la régulation par mode glissant montre : de meilleures performances de poursuite ; une réponse rapide en régime transitoire et lors du changement des consignes ; une minimisation maximale d'erreur entre les valeurs de consignes et celles mesurées ; une réduction importante des oscillations des puissances.

Selon la figure 4.23, on remarque que les puissances actives et réactives statorique suivent bien les allures de références. Aussi, selon les résultats obtenus, on remarque : moins d'oscillations et de perturbations des valeurs de puissances active et réactive ; un dépassement minimum des allures des puissances.

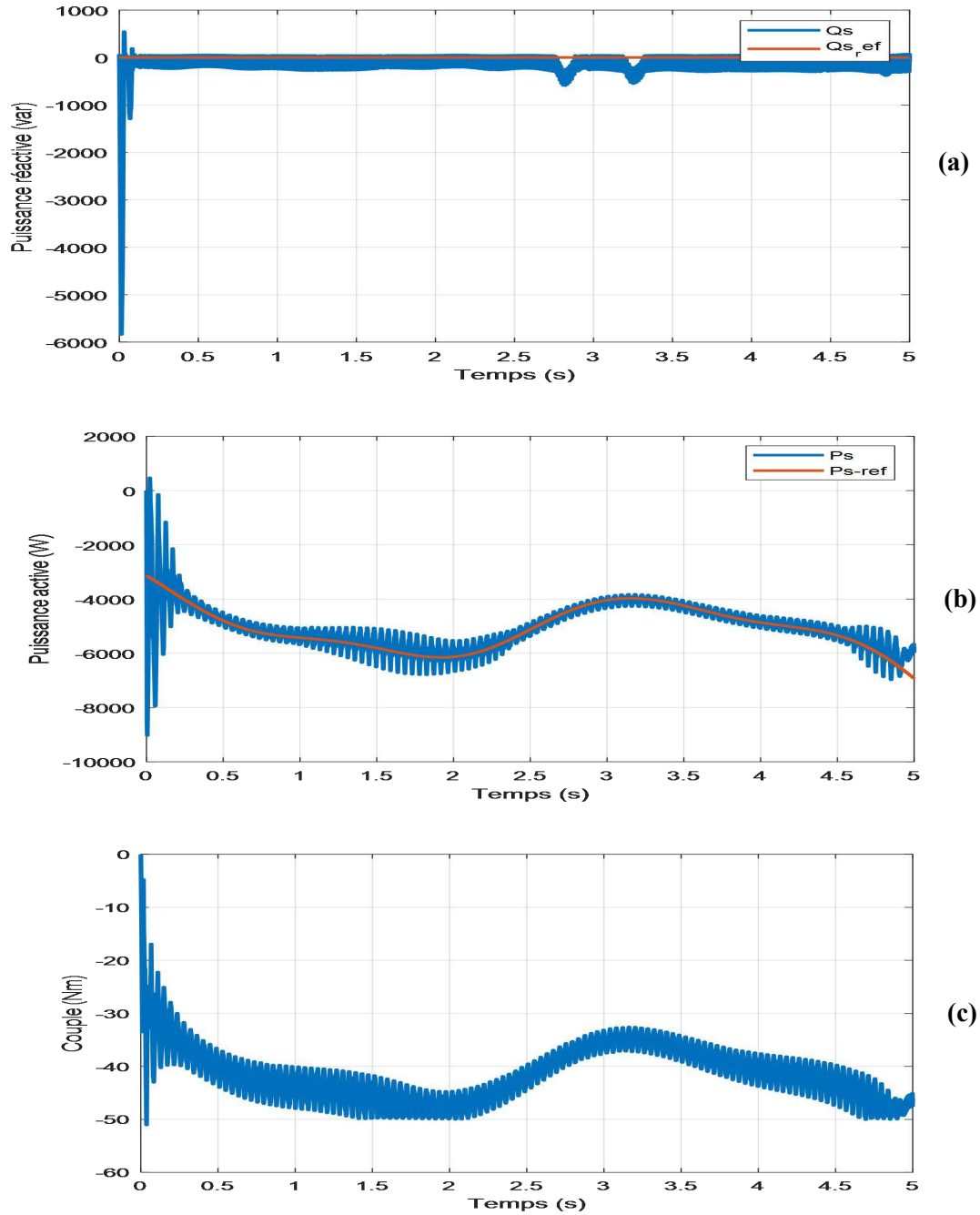


Figure.4.23. Résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec réglage des puissances par régulateur de mode glissant

4.13. Application de la commande backstepping à la GADA pour le contrôle de la puissance active et réactive

Dans cette partie nous contenterons d'appliquer la méthode du backstepping à la génératrice asynchrone à double alimentation où nous établirons les expressions des valeurs de la commande en s'appuyant sur le modèle établi au chapitre deux. Cette approche nous permet de déterminer les composantes des tensions de commande d'alimentation de la machine en assurant la stabilité globale par la théorie de Lyapunov.

La commande ainsi obtenue permet d'assurer le suivi et le contrôle indépendamment des puissances active et réactive générées, en assurant à chaque fois des dynamiques stables pour les erreurs entre les grandeurs de références et celles réelles des puissances [103].

Le modèle de la GADA, peut être présenté sous forme d'équations différentielles des puissances active et réactive et des courants de rotor, comme suit :

$$\begin{cases} \dot{P}_s = -V_s \frac{M}{\alpha L_s} (V_{rq} + R_r i_{qr} + g \omega_s (L_r \frac{M^2}{L_s}) i_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s}) \\ \dot{i}_{qr} = -\frac{1}{\alpha} (V_{qr} - R_r i_{qr} + g \omega_s \alpha i_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s}) \\ y_1 = P_s \end{cases} \quad (4.96)$$

En outre,

$$\begin{cases} \dot{Q}_s = -V_s \frac{M}{\alpha L_s} (V_{rd} + R_r i_{qr} - g \omega_s \alpha i_{qr}) \\ \dot{i}_{dr} = -\frac{1}{\alpha} (V_{dr} - R_r i_{qr} - g \omega_s \alpha i_{qr}) \\ y_2 = Q_s \end{cases} \quad (4.97)$$

Avec,

$$\alpha = L_r \delta = L_r (1 - \frac{M^2}{L_s L_r}) \quad (4.98)$$

• Étape 1 : Calcul de la référence de courants (Contrôle de la puissance active et réactive)

On sélectionne les deux premiers sous-système (4.99) et (4.100). La sortie du premier sous-système P_s doit tendre à P_{s-ref} et la sortie du deuxième sous système, Q_s doit tendre vers Q_{s-ref} . On définit (e_1 et e_3) représentant les erreurs variables : l'erreur de poursuite de la puissance active et réactive est [103] :

$$\begin{cases} e_1 = P_{s-ref} - P_s \\ \dot{e}_1 = \dot{P}_{s-ref} - \dot{P}_s \end{cases} \quad (4.99)$$

$$\begin{cases} e_3 = Q_{s-ref} - Q_s \\ \dot{e}_3 = \dot{Q}_{s-ref} - \dot{Q}_s \end{cases} \quad (4.100)$$

Les variables de contrôle virtuelles sont i_{dr} et i_{qr} .

La première fonction de Lyapunov est définie par :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \\ V_3 = \frac{1}{2} e_3^2 \end{cases} \quad (4.101)$$

La dérivé l'équation (4.101) :

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left\{ \dot{P}_{s\text{-ref}} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} (V_{rq} + R_r I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} - g \frac{MV}{L_s}) \right\} \\ \dot{V}_3 = e_3 \dot{e}_3 = e_3 \left\{ \dot{Q}_{s\text{-ref}} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} (V_{rd} + R_r I_{rd} - g \omega_s \alpha I_{rq}) \right\} \end{cases} \quad (4.102)$$

Pour garantir un suivi stable de la dérivée de V_1 et V_3 qui doit être négative (deuxième théorie de Lyapunov). k_1 et k_3 sont des constantes positives garantissant la condition de stabilité de Lyapunov. La dérivée des erreurs de puissance devient telle que :

$$\begin{cases} \left\{ \dot{P}_{s\text{-ref}} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} (V_{rq} + R_r I_{rq} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} - g \frac{MV}{L_s}) \right\} = -K_1 e_1 \\ \left\{ \dot{Q}_{s\text{-ref}} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} (V_{rd} + R_r I_{rd} - g \omega_s \alpha I_{rq}) \right\} = -K_3 e_3 \end{cases} \quad (4.103)$$

Cela permet de trouver l'état de contrôle actuel souhaité, soit :

$$\begin{cases} I_{rq\text{-ref}} = \frac{\alpha L_s}{V_s M R_r} \left[\dot{P}_{\text{ref}} + k_1 e_1 \right] + \frac{1}{R_r} (V_{rq} - g \omega_s \alpha I_{rd} - g \frac{MV}{L_s}) \\ I_{rd\text{-ref}} = \frac{\alpha L_s}{V_s M R_r} \left[\dot{Q}_{s\text{-ref}} + k_3 e_3 \right] - \frac{1}{R_r} (V_{rd} - g \omega_s \alpha I_{rq}) \end{cases} \quad (4.104)$$

Par conséquent, les variables de contrôle sont asymptotiquement stables.

• Étape 2 : Calcul des tensions de contrôle

Les courants déterminés précédemment, sont les variables souhaitées pour cette étape, on définit les erreurs e_2 et e_4 , comme suit :

$$\begin{cases} e_2 = I_{rq\text{-ref}} - I_{rq} \\ \dot{e}_2 = \dot{I}_{rq\text{-ref}} - \dot{I}_{rq} \end{cases} \quad (4.105)$$

$$\begin{cases} e_4 = I_{rd\text{-ref}} - I_{rd} \\ \dot{e}_4 = \dot{I}_{rd\text{-ref}} - \dot{I}_{rd} \end{cases} \quad (4.106)$$

V_{rq} et V_{rd} sont maintenant les vrais signaux de contrôle. La nouvelle fonction de Lyapunov est choisie comme :

$$\begin{cases} V_2 = \frac{1}{2} (e_1^2 - e_2^2) \\ V_4 = \frac{1}{2} (e_3^2 - e_4^2) \end{cases} \quad (4.107)$$

La dérivée de l'expression (4.107)

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_2 = e_1 \left\{ P_{s-ref} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} \left(V_{rq} + R_r (I_{rq-ref} - e_2) + g \omega_s \alpha I_{rd} - g \frac{MV}{L_s} \right) \right\} \\ \quad + e_2 \left\{ I_{rq-ref} - \frac{1}{\alpha} \left(V_{rq} + R_r (I_{rq-ref} - e_2) + g \omega_s \alpha I_{rd} - g \frac{MV}{L_s} \right) \right\} \\ \dot{V}_4 = e_3 \left\{ Q_{s-ref} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} \left(V_{rd} + R_r (I_{rd-ref} - e_2) - g \omega_s \alpha I_{rq} \right) \right\} \\ \quad + e_4 \left\{ I_{rd-ref} - V_s \frac{M}{\alpha L_s} \left(V_{rd} + R_r (I_{rd-ref} - e_2) - g \omega_s \alpha I_{rq} \right) \right\} \end{array} \right. \quad (4.108)$$

Avec,

$$\alpha = L_r \delta = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) \quad (4.109)$$

Afin de garantir un suivi stable des tensions de commande, V_{rq} et V_{rd} se déduisent comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{rq-c} = \left(-k_2 e_2 - I_{rq-ref} - \frac{V_s M R_r}{\alpha L_s} e_1 \right) \alpha - \left(R_r I_{rq} + g \omega_s \alpha I_{rd} + g \frac{MV}{L_s} \right) \\ V_{rd-c} = \left(-k_4 e_4 - I_{rd-ref} - \frac{V_s M R_r}{\alpha L_s} e_3 \right) \alpha - \left(R_r I_{rq} - g \omega_s \alpha I_{rd} \right) \end{array} \right. \quad (4.110)$$

Le schéma bloc de la commande des puissances de la GADA par la méthode backstepping appliquée au convertisseur côté machine est représenté sur la figure 4.24.

Le contrôleur PI est remplacé par quatre blocs qui représentent l'approche du Backstepping. Les courants I_{rq-c} et I_{rd-c} fournissent respectivement les courants du rotor des composantes de référence I_{rq-ref} , I_{rd-ref} (variables de contrôle virtuelles) via les variables active et réactive des commandes de retour de puissance de l'équation (4.108). De plus, les commandes de tension, V_{rq-c} ; V_{rd-c} sont générées via l'asservissement des courants rotoriques selon (4.110).

La dérivée de l'équation est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 < 0 \\ \dot{V}_4 = -k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 < 0 \end{array} \right. \quad (4.111)$$

Cela permet de conclure que le système est globalement asymptotiquement stable. k_1 , k_2 , k_3 , k_4 sont des constantes positives, le bon choix de ces paramètres garantit la stabilité, et une réponse dynamique rapide.

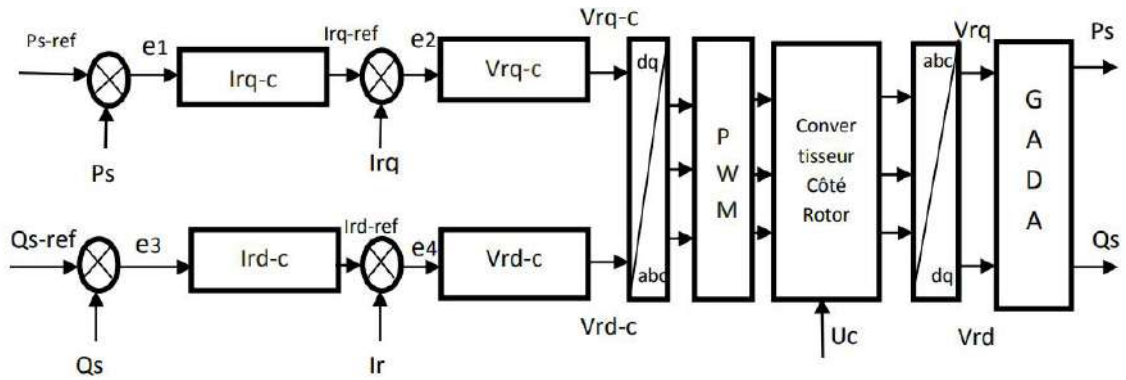
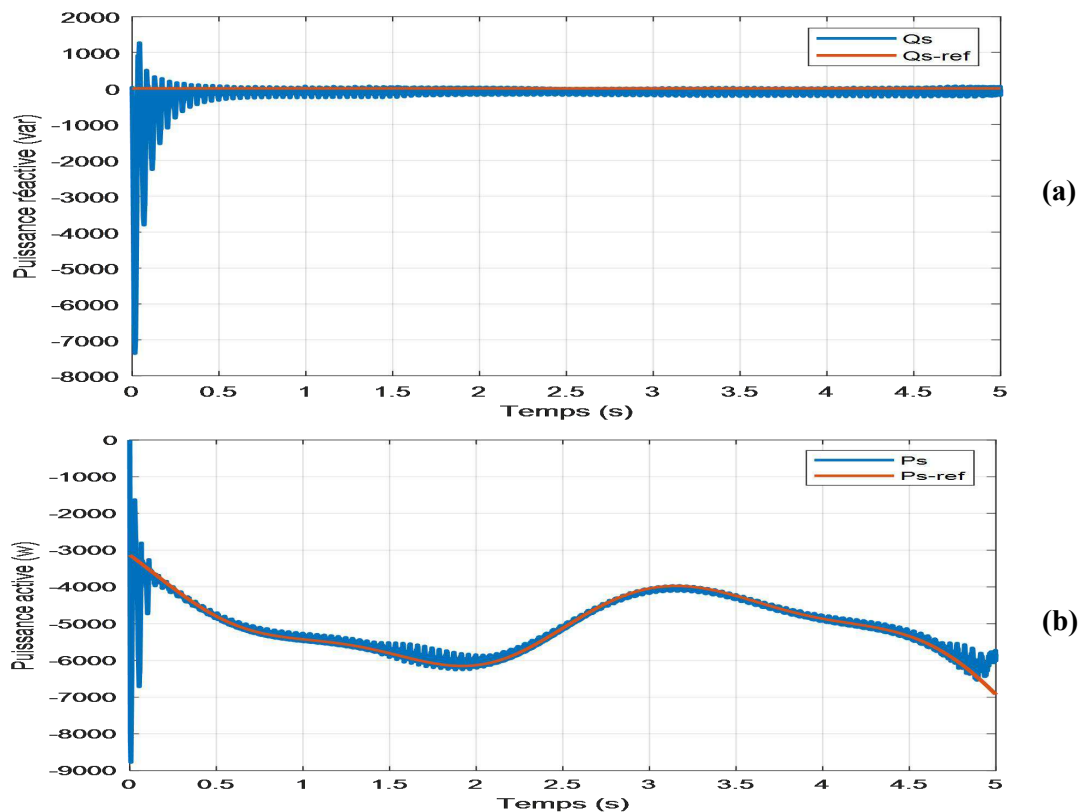


Figure.4.24. Schéma fonctionnel de la conception de la commande par backstepping

4.14. Résultats et discussion obtenus en utilisant un régulateur backstepping

La figure 4.25 montre les réponses des puissances active et réactive et le couple de la GADA par le contrôleur backstepping. On observe aussi que : le temps de réponse est plus rapide et le dépassement est faible dans le régime transitoire, également le temps de changement des consignes. Les oscillations sont minimisées, et aussi une convergence exponentielle des erreurs vers entre les valeurs s de consigne et celles mesurées. Ce qui confirme la robustesse du contrôle MPPT. Les résultats de simulation, mettent en évidence l'efficacité et la robustesse du contrôle par backstepping.

D'après les résultats, nous remarquons que la commande proposée est plus performante que les commandes traitées précédents. Les résultats, montrent un temps de réponse rapide et aussi erreur faible. La commande proposée assure aussi moins d'oscillations de perturbations et suivent leurs références.



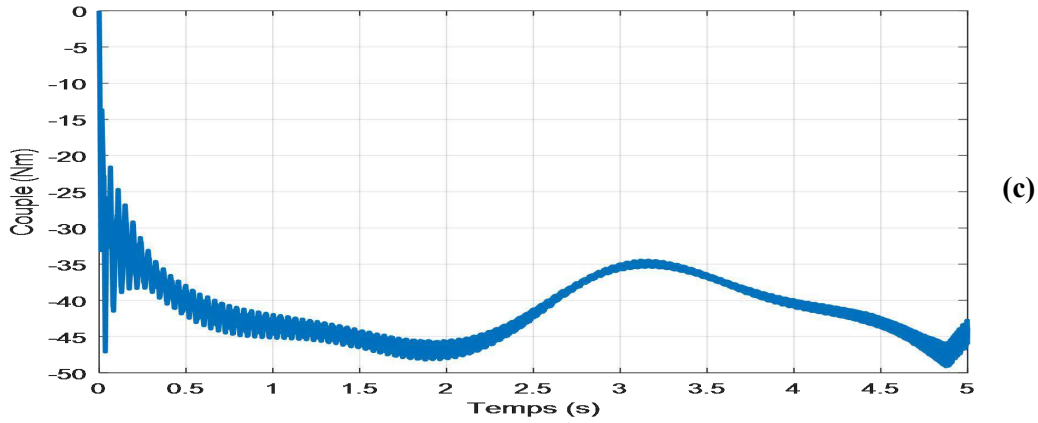
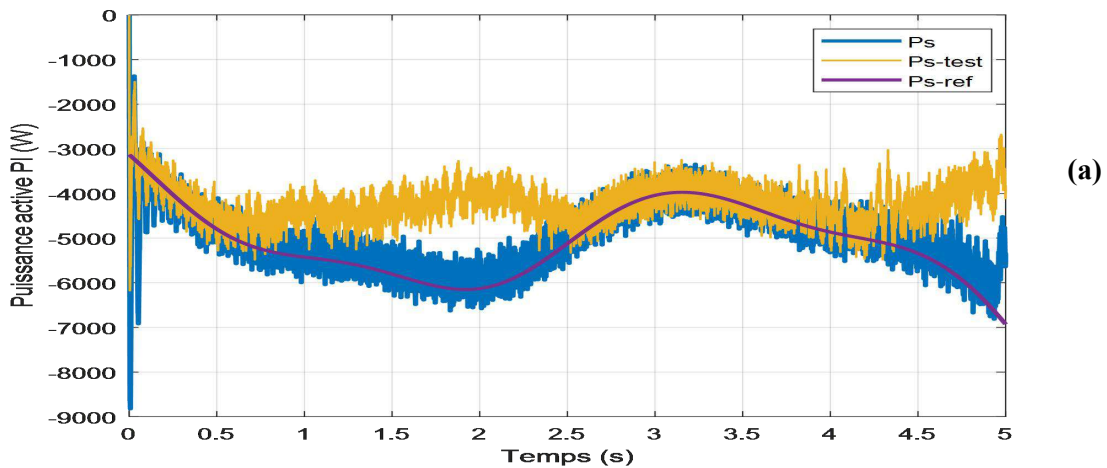


Figure.4.25. Résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne avec réglage des puissances par mode backstepping

4.15. Tests de robustesse pour les trois (03) régulateurs

La figure 4.26 représente le test de robustesse de la puissance active des trois (03) régulateurs : (a) régulateur PI, (b) régulateur CMG, (c) régulateur backstepping. La figure 4.26.a se compose de trois (03) plages, dans la première plage (0s à 0.5s) la puissance active suit correctement sa référence, et même les ondulations sont minime par à port à l'après variation paramétrique qui s'opère dans la deuxième et troisième plages (0.5s à 2.5s) et (4s à 5s) où y a eu le changement des valeurs des résistances statoriques et rotoriques qui représente l'échauffement et qui est caractérisé par le pique visible sur la figure (4.26) et à partir duquel on observe une augmentation des ondulations et la puissance active ne suivent pas sa référence. Les figures 4.26.b et 4.26.c, dans toutes les plages la puissance active suit parfaitement sa référence et cela justifie que la commande par mode glissant et backstepping sont des commande robuste.

Les résistances statoriques et rotoriques : $R_s = 2R_{sn}$ et $R_r = 2R_{rn}$



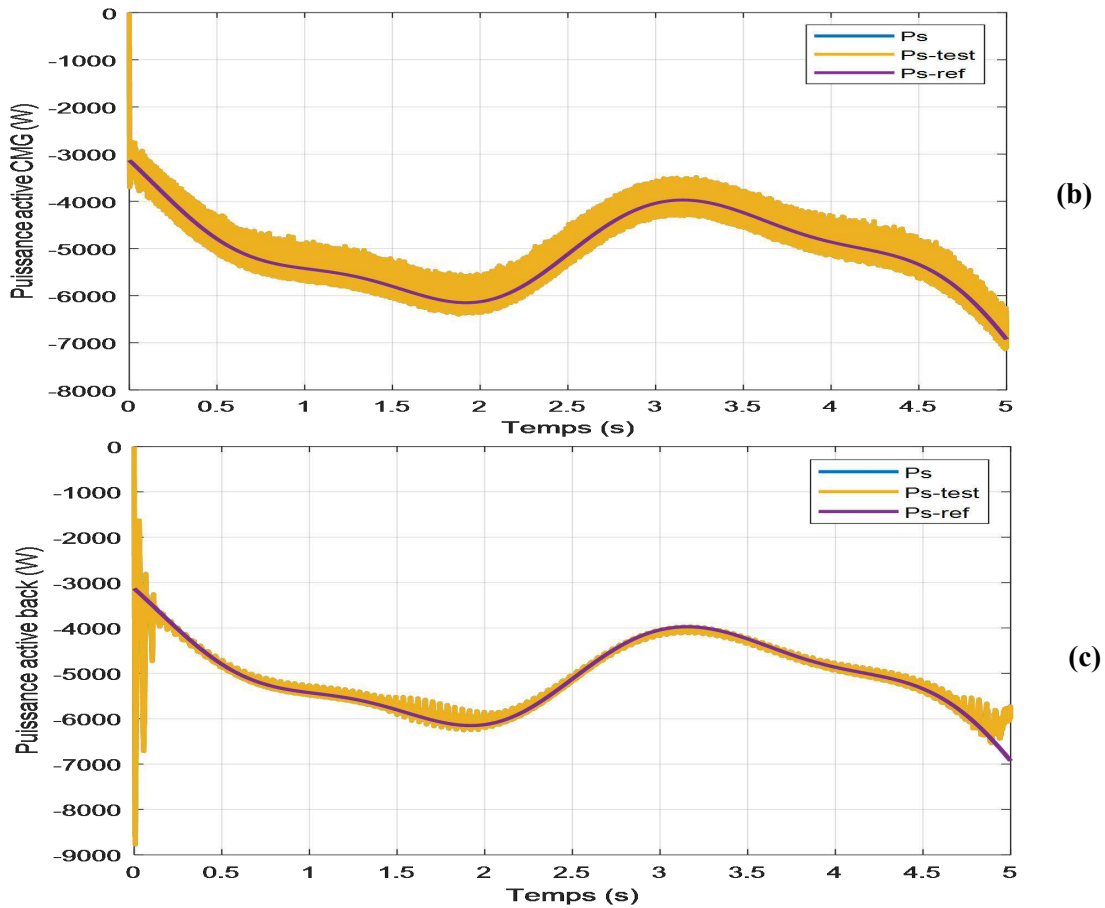


Figure.4.26. Tests de robustesse pour les trois (3) régulateurs

4.16. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les différentes stratégies de commandes de la machine asynchrone à double alimentation. Dans la première partie, le principe de la modélisation de la commande vectorielle par l'orientation du flux statorique a été détaillé. Dans la deuxième partie, trois techniques de commande différentes pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées par la MADA dans un système de production d'énergie éolienne couplé au réseau ont été établies.

Les résultats obtenus montrent que le réglage par régulateur backstepping apporte une amélioration remarquable par rapport aux régulateurs classiques PI et aux régulateurs modernes par mode glissant en particulier au régime transitoire avec de faibles dépassements et un temps de réponse très rapide. Cette technique a permis d'obtenir un découplage parfait entre les deux composantes du courant et présente plusieurs avantages tels que, robustesse, précision et temps de réponse très faible. Le chapitre suivant est consacré à la conception d'une stratégie de contrôle-protection du parc éolien contre les perturbations de type creux de tension sur le réseau électrique.

Chapitre 5

Stratégie de contrôle et protection du système éolien contre les creux de tensions

5.1. Introduction

Les Conditions Techniques de Raccordement (CTR) fixent les normes pour le raccordement des installations de production d'énergie au réseau électrique. De nombreux pays étudient l'intégration des parcs éoliens, notamment leur capacité à maintenir la production en cas de perturbations au point de connexion (PCC). Ce chapitre étudie le comportement d'un système éolien basé sur la GADA face aux défauts du réseau, en particulier lors des chutes de tension. Une stratégie de protection est proposée pour améliorer la capacité LVRT (Low Voltage Ride Through), visant à maintenir la connexion de l'éolienne tout en garantissant la sécurité et la qualité de l'énergie. La stratégie proposée a pour objectif de maintenir l'éolienne connectée au réseau, d'assurer la sûreté de fonctionnement du système éolien et la bonne qualité de l'énergie fournie au réseau, au cours des chutes de tension. Une méthode passive est adoptée, basée sur l'ajout d'une protection matérielle (Crowbar). Les simulations sous Matlab-Simulink ont permis de comparer les états sains, symétrique et asymétrique, montrant l'efficacité de la stratégie durant les perturbations.

5.2. Exigences du réseau

5.2.1. Qualité de l'énergie électrique

L'objectif des réseaux électriques est de fournir une alimentation continue et stable avec des tensions sinusoïdales de fréquence et d'amplitude désirées. La qualité de l'énergie électrique est essentielle à l'échelle mondiale et concerne toute déviation par rapport aux normes internationales pouvant affecter le bon fonctionnement des équipements [104]. Elle se définit comme l'ensemble des limites électriques permettant aux dispositifs de fonctionner sans dégradation ni réduction de leur durée de vie. La qualité de l'énergie dépend principalement de la tension, de la fréquence et des interruptions. Selon les normes, les perturbations de tension sont classées en plusieurs catégories : variations de tension, scintillement (flicker), transitoires et distorsion harmonique [105]. La classification des phénomènes liés à la qualité de l'énergie est illustrée par la figure 5.1. Les éoliennes connectées au réseau peuvent influencer la qualité de l'énergie et, inversement, être affectées par des perturbations du réseau. La qualité de l'énergie électrique est une combinaison de la qualité de la tension et du courant.

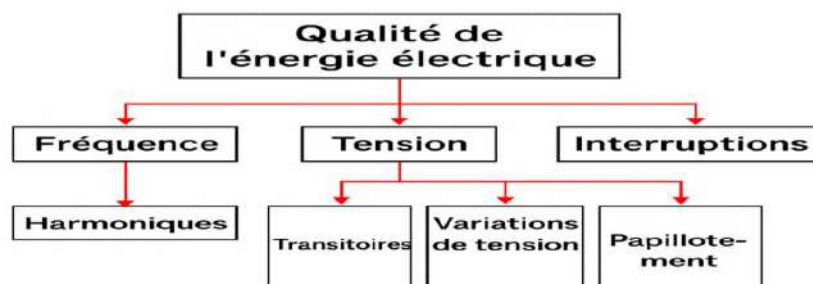


Figure.5.1. Caractéristiques générales de la qualité de l'énergie électrique

5.2.1.1. Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

- **Amplitude**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante, mais en réalité, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter.

- **Fréquence**

Les tensions alternatives sont idéalement sinusoïdales avec une fréquence constante de 50 ou 60Hz selon le pays. Les variations de fréquence, bien que généralement faibles (moins de 1%), peuvent être causées par des pertes de production, de l'îlotage ou des défauts entraînant une chute de tension. Toutefois, les réseaux autonomes peuvent connaître des variations plus importantes [106].

- **Forme d'onde**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

- **Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelée déséquilibre.

5.2.1.2. Qualité du courant

La qualité du courant se définit par la dérive des courants par rapport à leur forme idéale et repose sur quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Idéalement, les trois courants sont sinusoïdaux, de fréquence et d'amplitude constante, et déphasés de $2\pi/3$ radians. En l'absence de charges perturbatrices, toute déformation du courant découle des caractéristiques de la tension fournie. Ainsi, la qualité de l'énergie est souvent assimilée à la qualité de la tension.

5.2.2. Perturbations électriques

L'intégration croissante de l'électronique de puissance dans la production d'énergie entraîne des perturbations affectant la qualité du réseau électrique, telles que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, les variations de fréquence et de tension, ainsi que les surtensions transitoires. Ces perturbations peuvent engendrer des défaillances des équipements électriques et perturber les systèmes de production. Ce chapitre se concentre sur l'étude de deux types de défauts : les creux de tension équilibrés et déséquilibrés.

5.2.2.1. Creux de tension

Le creux de tension (sag ou dip en anglais) est une perturbation courante du réseau électrique, causant des interruptions industrielles et des pertes économiques qui affectent la qualité du réseau. Il peut être dû à des courts-circuits, des manœuvres de commutation, le démarrage de moteurs, des arcs électriques ou la saturation de transformateurs, les courts-circuits étant la cause la plus fréquente et sévère. Selon la norme IEEE 1159, un creux de tension correspond à une chute soudaine de la tension entre 90 % et 10 % de la tension de référence, durant de 0,5 période à une minute (figure.5.2). Dans les réseaux avec éoliennes, un creux monophasé ou biphasé peut engendrer un déséquilibre affectant leur fonctionnement. Les défauts peuvent être symétriques (triphases) ou asymétriques (biphasés ou monophasés), entraînant des amplitudes de creux égales ou inégales selon le cas [107].

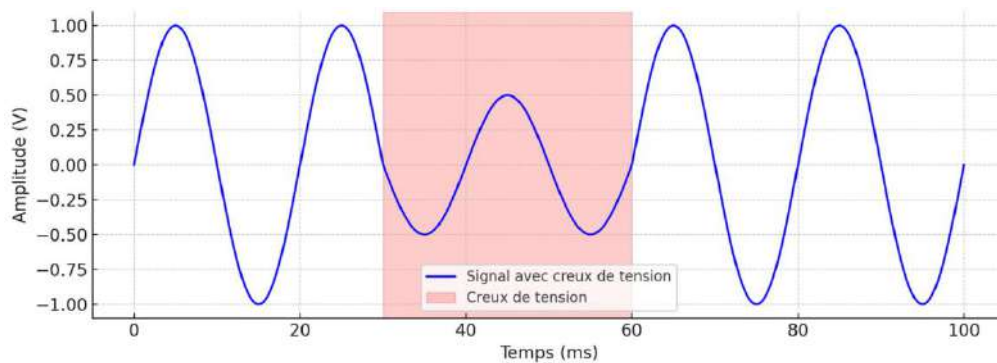


Figure.5.2. Signal sinusoïdale avec creux de tension

5.2.2.2. Coupures brèves

Une coupure brève est un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% (IEEE1159) et de durée allant jusqu'à 1 minute. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes.

5.2.2.3. Classification des creux de tension

Les creux de tension peuvent être classés selon plusieurs méthodes en fonction de leurs caractéristiques principales, telles que l'amplitude, la durée et la nature du défaut à l'origine de la perturbation.

A. Classification selon l'amplitude et la durée

Cette classification repose sur deux paramètres fondamentaux [108] :

- **L'amplitude** : correspond à la plus basse valeur efficace mesurée sur un cycle. Un creux de tension est détecté en calculant la valeur efficace du signal sur une période fondamentale toutes les demi-périodes.
- **La durée** : correspond au temps pendant lequel la tension efficace reste inférieure à 90 % de sa valeur nominale.

B. Classification selon le type de défaut

Les creux de tension sont souvent causés par des défauts dans le réseau électrique. On distingue plusieurs types de creux en fonction du type de défaut à l'origine :

- **Creux triphasé (symétrique)** : dû à un défaut triphasé équilibré.
- **Creux biphasé à la terre** : causé par un court-circuit entre deux phases et la terre.
- **Creux entre phases** : dû à un court-circuit entre deux phases sans mise à la terre.
- **Creux monophasé à la terre** : provoqué par un court-circuit entre une seule phase et la terre.

C. Classification selon des paramètres avancé

Les études récentes suggèrent d'enrichir la classification des creux de tension en intégrant des paramètres supplémentaires, tels que :

- **Le saut d'angle de phase (*phase-angle jump*)** : impacte les équipements sensibles aux variations angulaires.
- **Le déséquilibre triphasé** : caractérise les différences d'amplitude entre les phases lors d'un creux asymétrique.
- **Le point d'apparition sur l'onde (*point-on-wave*)** : détermine à quel moment précis du cycle sinusoïdal le creux débute, ce qui influence la réponse des équipements.

5.2.3. Connexion potentielle au réseau pour les éoliennes

Une caractéristique essentielle des parcs éoliens est leur capacité à gérer les problèmes pouvant survenir sur le réseau de distribution ou de transport auquel ils sont connectés. Dans les réseaux intégrant des éoliennes, un creux de tension monophasé ou biphasé peut entraîner un déséquilibre de tension au point de raccordement des générateurs au réseau. Ce déséquilibre peut avoir des effets négatifs sur le fonctionnement des éoliennes [109].

La figure 5.3 illustre comment les problèmes de qualité de l'énergie, pouvant provenir des réseaux de transport et de distribution, peuvent affecter la tension à laquelle les éoliennes sont raccordées [109]. De tels problèmes de réseau peuvent entraîner le déclenchement d'éoliennes individuelles et/ou de l'ensemble d'un parc éolien.



Figure.5.3. Influence de la qualité de l'énergie du réseau sur les parcs éoliens

L'une des caractéristiques les plus importantes des parcs éoliens est leur capacité à maintenir leur fonctionnement en cas de défauts sur le réseau (FRT : fault ride-through). La figure 5.4 décrit les effets qu'un parc éolien peut avoir sur un réseau de distribution et de

transport, notamment le scintillement (flicker), les transitoires, les harmoniques et l'augmentation de la puissance réactive [109]. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet du déséquilibre de tension du réseau sur les éoliennes.

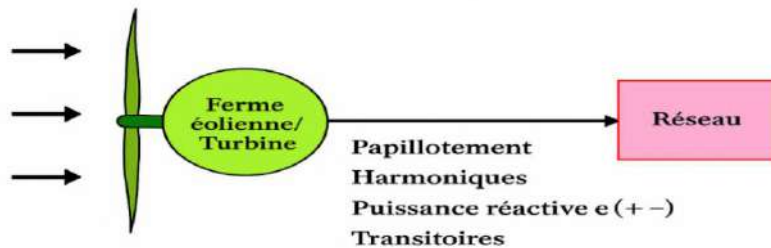


Figure.5.4. Influence de la qualité de l'énergie d'un parc éolien sur le réseau

5.2.4. Exigences des codes réseau pour le système GADA

Les codes réseau régissent le raccordement et le fonctionnement des centrales électriques, y compris les parcs éoliens, afin d'optimiser le transfert d'énergie et de limiter les dommages aux équipements [110,111]. Selon ces exigences, les éoliennes doivent rester connectées lors des perturbations et contribuer au soutien de la tension.

Les principales exigences des codes réseau incluent [110,111] :

1. **Plage de fonctionnement de la tension et de la fréquence** : pour s'adapter aux variations de tension et de fréquence du réseau.
2. **Contrôle de la puissance active et de la fréquence** : pour stabiliser la fréquence du réseau et éviter les surcharges.
3. **Contrôle de la tension et de la puissance réactive** : afin d'assurer un équilibre du facteur de puissance.
4. **Maintien en basse (LVRT) et haute tension (HVRT)** : éoliennes doivent rester connectées pendant une période déterminée avant d'être autorisées à se déconnecter.
5. **Qualité de l'énergie** : en limitant les fluctuations de tension et la distorsion harmonique.
6. **Modélisation et vérification des parcs éoliens** : pour l'analyse et la simulation du réseau en cas de défaut.
7. **Communications et contrôle externe** : permettant une supervision et une gestion à distance des éoliennes.

Ces exigences assurent une meilleure intégration des éoliennes au réseau et renforcent la stabilité du système électrique.

5.3. GADA lors d'un creux de tension équilibrée et déséquilibrée

Dans les réseaux avec éoliennes, les creux de tension monophasés ou biphasés entraînent des déséquilibres nuisibles aux équipements sensibles. Pour garantir la stabilité du réseau, les parcs éoliens doivent gérer ces perturbations. Le maintien en haute tension (HVRT) désigne la

capacité des éoliennes à base de GADA à rester connectées malgré ces chutes de tension. Ce travail distingue deux types principaux de défauts : symétriques et asymétriques.

- Les défauts symétriques (équilibrés)
- Les défauts asymétriques (d'équilibrés)

5.3.1. Défaut Symétrique : creux de tension triphasé symétriques

Un creux de tension triphasé symétrique est une chute temporaire affectant de manière égale les trois phases d'un réseau, souvent causée par un court-circuit triphasé à la terre ou le démarrage d'une machine. Il se manifeste par une baisse de la tension du stator sans atteindre zéro. Ce type de défaut, fréquent en haute tension, se caractérise par des amplitudes et impédances égales, ainsi qu'un décalage angulaire constant entre les phases [112]. La figure 5.5 illustre cet équilibre avec des tensions triphasées fondamentales parfaitement équilibrées.

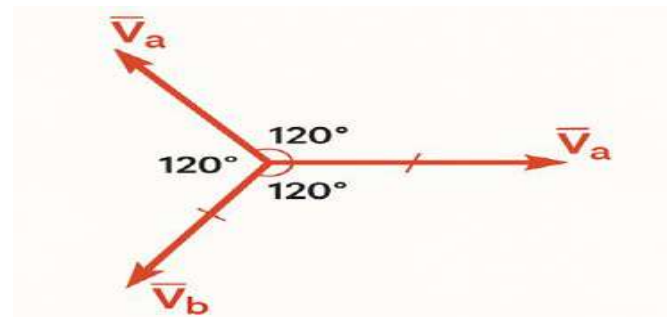


Figure.5.5. Système triphasé parfaitement équilibré

5.3.2. Défaut asymétrique : creux de tension triphasé asymétriques

Un système triphasé est dit déséquilibré lorsque les conditions de phase et d'amplitude ne sont pas respectées. Le déséquilibre de tension est mesuré par le rapport entre les composantes de séquence négative et positive, analysé via la méthode des composantes symétriques [112]. Ce déséquilibre peut perturber les dispositifs à thyristors et engendrer des fluctuations sur le bus continu des convertisseurs. Il se manifeste par une asymétrie de tension, un déséquilibre de courant, et une dissymétrie des paramètres du système. Plus ces écarts sont prononcés, plus l'impact sur le réseau est important. La figure 5.6 illustre deux exemples de systèmes triphasés asymétriques.



Figure.5.6 a) Système triphasé asymétrique résultant d'amplitudes et d'angles inégaux, b) Système triphasé asymétrique résultant d'amplitudes inégales

5.3.2.1. Classification des creux de tension asymétriques basée sur la transformation par vecteur spatial

La transformation par vecteur spatial (ou transformation de Park ou Clarke) permet de représenter le système triphasé dans un plan 2D (axe α - β), ce qui facilite la détection, la classification et la compensation des défauts asymétriques. L'analyse des creux de tension par transformation du vecteur spatial permet une représentation intuitive et une classification en sept types, selon les défauts et sous l'hypothèse d'impédances de séquence égales. Cette méthode offre une évaluation précise de la gravité des perturbations et de leurs effets sur les équipements, améliorant ainsi leur gestion et leur atténuation. Le tableau 5.1 présente cette classification en fonction des types de défauts possibles [113].

Tableau. 5.1. Classification des types de creux de tension asymétrique [113]

Type	Phase A	Phase B	Phase C	Symétrie	Description
A	Sag	Normal	Normal	Asymétrique	Creux monophasé – chute sur une seule phase
B	Normal	Sag	Normal	Asymétrique	Chute uniquement sur la phase B
C	Normal	Normal	Sag	Asymétrique	Chute uniquement sur la phase C
D	Sag	Sag	Normal	Asymétrique	Deux phases chutent également
E	Sag	Normal	Sag	Asymétrique	Phases A et C chutent, B reste normale
F	Normal	Sag	Sag	Asymétrique	Chute sur les phases B et C
G	Sag	Sag	Sag	Symétrique	Creux triphasé, souvent équilibré

Ce tableau permet une meilleure compréhension des différents scénarios de creux de tension et de leur impact potentiel sur le réseau et les équipements électriques, notamment les convertisseurs électroniques de puissance et les générateurs éoliens.

5.4. Méthodes d'extraction des deux séquences positive et négative

Pour garantir le bon fonctionnement des équipements, il est essentiel d'extraire rapidement et avec précision les composantes directes et inverses des tensions issues de sources déséquilibrées. De nombreux algorithmes existent à cet effet, et ce travail présente la méthode la plus couramment utilisée [114].

5.4.1. Méthode d'extraction basée sur la matrice de Fortescue

La méthode des composantes symétriques, introduite par Fortescue en 1918, est une technique fondamentale pour analyser les systèmes triphasés déséquilibrés [114]. Elle décompose les tensions ou courants en trois composantes équilibrées :

- **Séquence positive (V^+)** : tourne dans le même sens que la séquence des phases et représente l'état normal du réseau.
- **Séquence négative (V^-)** : tourne en sens inverse et indique un déséquilibre causé par un défaut asymétrique ou une charge déséquilibrée.

• **Séquence homopolaire (V^0)** : même amplitude et phase sur les trois phases, caractérisant les défauts impliquant la terre et les retours de courant homopolaires.

Selon la théorie des composantes symétriques de Fortescue, tout système triphasé déséquilibré peut être décomposé en trois systèmes équilibrés (figure 5.7) :

• **Système direct** : système triphasé équilibré de séquence directe (abc) tournant dans le sens anti-horaire (conventionnelle).

• **Système inverse** : système triphasé équilibré de séquence inverse (acb) tournant dans le sens horaire.

• **Système homopolaire** : système où les trois vecteurs sont égaux en amplitude et en phase [115].

Ces trois systèmes sont obtenus par la transformation de Fortescue, permettant une analyse efficace des déséquilibres dans les réseaux triphasés comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{da} \\ V_{db} \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \\ a^2 V_d \\ a V_d \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i \\ a V_i \\ a^2 V_i \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_o \\ V_o \\ V_o \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Tel qu' a est un opérateur qui correspond à une rotation d'un angle de 120° , il est donné par :

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.4)$$

Donc pour un système triphasé déséquilibré $[V_a V_b V_c]$ ce dernier sera exprimé en fonction des composantes symétriques par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Dans un système triphasé à trois fils avec neutre non relié à la terre, la loi de Kirchhoff élimine les composantes homopolaires des courants de ligne, rendant leur effet négligeable sur la GADA. La transformation de Fortescue, initialement conçue pour les systèmes sinusoïdaux asymétriques, pour traiter des signaux variables qu'ils soient sinusoïdaux ou non. [116]. Elle demeure un outil fondamental pour l'analyse des déséquilibres électriques.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Dans le cas d'un réseau qui présente une faible asymétrie, on ne s'intéresse alors que de l'extraction de la séquence positive. La matrice de Fortescue précédente permet d'avoir cette séquence directement à partir des valeurs instantanées des grandeurs réelles comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a^+ \\ V_b^+ \\ V_c^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a - \frac{1}{2}(V_b + V_c) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_b - V_c) \\ V_b - \frac{1}{2}(V_c + V_a) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_c - V_a) \\ V_c - \frac{1}{2}(V_a + V_b) + j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_a - V_b) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

La séquence négative à son tour peut être calculée de la même façon comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a^- \\ V_b^- \\ V_c^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_a - \frac{1}{2}(V_b + V_c) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_b - V_c) \\ V_b - \frac{1}{2}(V_c + V_a) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_c - V_a) \\ V_c - \frac{1}{2}(V_a + V_b) - j\frac{\sqrt{3}}{2}(V_a - V_b) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

L'extraction de la séquence négative suit le même principe que celle de la séquence positive. Toutefois, la méthode de Fortescue nécessite une adaptation numérique pour remplacer l'opérateur complexe 'j'. Un filtre assurant un déphasage de 90°, comme le filtre de Hilbert, est souvent utilisé pour cette opération [116].

5.5. Exigences des codes réseau (LVRT et HVRT)

L'intégration des parcs éoliens peut nuire à la stabilité du réseau. Pour garantir leur maintien en fonctionnement, les codes réseau imposent le respect des exigences LVRT et HVRT [117]. Cette étude propose une solution LVRT simple pour assurer la continuité de fonctionnement des éoliennes GADA lors des creux de tension.

5.5.1. Maintien en cas de surtension HVRT (*High Voltage Ride-Through*)

L'ajout d'un Dynamic Voltage Restorer (DVR) côté réseau permet de répondre aux exigences du HVRT en supprimant les transitoires du flux statorique, évitant ainsi surtensions et surintensités dans la DFIG. Cette approche stabilise le couple électromagnétique et optimise la gestion de la puissance réactive transitoire, assurant ainsi un meilleur soutien au réseau en cas de défaut [117].

5.5.2. Maintien en cas de creux de tension LVRT (*Low Voltage Ride-Through*)

Les défauts électriques sont classés en deux catégories : les défauts en circuit ouvert et les courts-circuits. Ces derniers, survenant côté réseau, sont subdivisés en [117] :

- **Défauts temporaires** : interruptions momentanées dues à des incidents comme le contournement d'isolateur. Ils sont éliminés par le déclenchement rapide des disjoncteurs.

- **Défauts permanents** : causés par des perturbations prolongées, comme la chute de débris ou l'accumulation de neige entraînant un court-circuit. Leur isolation nécessite une intervention des dispositifs de protection.

Lorsqu'une chute de tension se produit au point de couplage commun (PCC), la tension du stator de la GADA varie immédiatement (figure 5.7). Si cette variation n'est pas soudaine, la tension du rotor compensera la baisse, entraînant une oscillation des courants du stator et du rotor avec une augmentation significative de leur amplitude. Un SCEE ne peut être déconnecté du réseau qu'en cas de chute de tension dépassant les limites autorisées. Dans le cadre du maintien en basse tension LVRT, le réseau exige une injection de puissance réactive par le SCEE pour stabiliser la tension. Les parcs éoliens doivent ainsi rester connectés pendant une durée déterminée lors des perturbations, selon les niveaux de tension spécifiés [118].

Le LVRT est essentielle pour garantir la stabilité du réseau face aux défauts lors de l'intégration croissante des éoliennes. Les (GADA), équipés de convertisseurs électroniques et de protections par Crowbar, assurent la régulation de la puissance réactive et restent connectés au réseau en cas de chute de tension. En réduisant l'impact des défauts, le LVRT améliore la fiabilité du réseau, facilitant une plus grande pénétration de l'énergie éolienne et renforçant ainsi la résilience et la durabilité du système électrique [118].

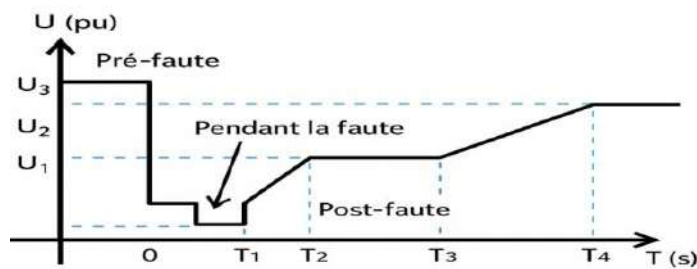


Figure.5.7. Codes réseau des exigences LVRT pour la production d'énergie éolienne [118]

La capacité de maintien en cas de défaut est un enjeu majeur pour la GADA. Les chutes de tension rapides sur le réseau génèrent des courants transitoires élevés dans les circuits du stator et du rotor, augmentant le risque de surcharge et d'endommagement des convertisseurs électroniques de puissance. La solution traditionnelle consiste à court-circuiter le rotor "Crowbar", mais cette méthode entraîne une forte demande de puissance réactive, aggravant la chute de tension et compromettant la stabilité du réseau [119].

5.5.2.1. Techniques d'amélioration de LVRT

Les techniques LVRT pour les éoliennes à base de la GADA se divisent en trois catégories [119] :

- **Techniques basées sur la protection** : utilisation de dispositifs comme la protection crowbar pour protéger le système en cas de défaut.
- **Techniques basées sur l'injection de puissance réactive** : stabilisation de la tension via l'injection de puissance réactive, grâce à des stratégies comme le contrôle de démagnétisation.

- **Techniques basées sur des solutions logicielles** : algorithmes avancés permettant une accélération temporaire du rotor pour stocker l'énergie sous forme d'inertie et la restituer après le défaut, réduisant ainsi le courant du rotor et améliorant le soutien en puissance réactive.

L'organigramme de la figure 5.8 résume les différentes techniques de LVRT basée sur la protection.

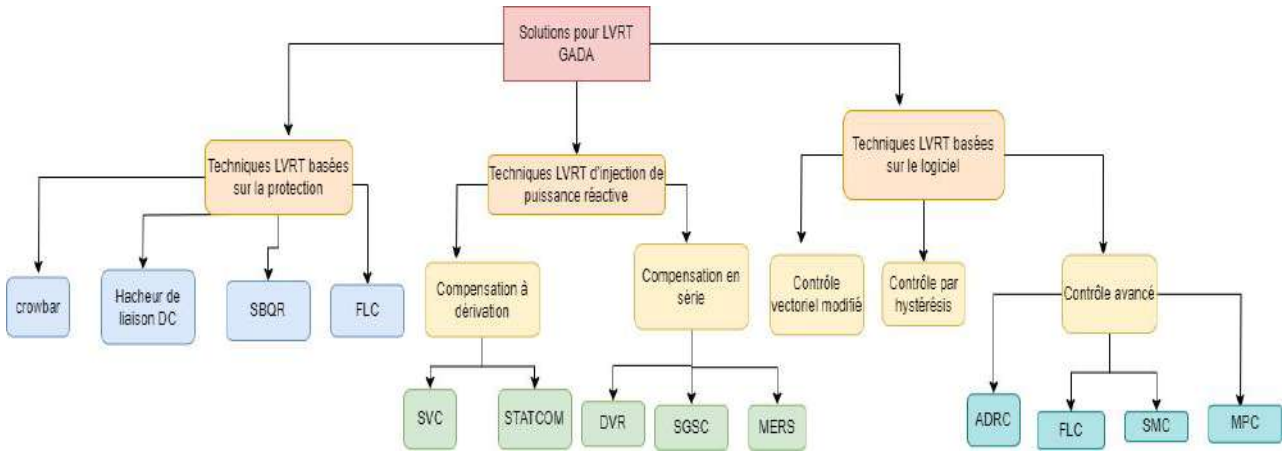


Figure.5.8. Techniques LVRT pour le système GADA

5.6. Techniques LVRT basées sur la protection

Le LVRT, est essentielle pour la stabilité du réseau lors de perturbations. Les techniques de contrôle se classent en trois catégories : externes côté rotor, externes côté stator et internes. Ce chapitre se focalise sur les techniques de crowbar côté rotor externe, tout en abordant brièvement les autres approches courantes.

Tableau.5.2. Comparatif des techniques de protection LVRT [120]

Technique	Avantages	Limitations	Remarques
Crowbar	- Simple et robuste - Protège efficacement le convertisseur rotorique Très efficace pour limiter le courant de défaut	- Interrompt le contrôle actif - Ne permet pas l'injection de puissance réactive	Utilisée surtout en début de creux pour éviter la surcharge du rotor
Hacheur à liaison DC	- Limite la surtension sur le bus DC - Protège les composants du convertisseur	- Complexité de commande - Chauffe importante - Coût plus élevé	Permet une dissipation rapide de l'énergie excédentaire sur le bus DC
FLC (commande floue)	- Réponse rapide et adaptative - Excellente performance même en conditions incertaines	- Nécessite une expertise pour la conception - Algorithme complexe	Convient aux systèmes non linéaires et variables (ex : éolien)
SBQR	- Simple à mettre en œuvre - Faible coût - Bonne protection du convertisseur	- Ne permet pas le contrôle rotorique pendant l'activation - Pertes par dissipation	Solution passive efficace pour les chutes de tension modérées et brèves

5.6.1. Crowbar

Le système de protection par crowbar protège la GADA en détournant le courant élevé du rotor à travers des résistances activées par des interrupteurs électroniques de puissance. Il ne s’engage que lors d’événements graves. Les crowbars actifs offrent une protection plus rapide et fiable. Leur placement (côté rotor ou stator) dépend de la conception de la GADA et des besoins en protection. Essentiel pour le LVRT, le crowbar protège le CCM des surintensités lors des baisses de tension. Bien que les configurations passives et actives soient efficaces, le crowbar actif se distingue par une réponse plus rapide. De nombreuses recherches ont exploré différentes techniques de crowbar [120]. Le tableau 5.3 présente le fonctionnement des SCEE basée su la GADA en cas normale et en défaut.

Tableau.5.3. Résumé des modes conventionnels de fonctionnement des éoliennes à GADA en conditions normales et de défaut [120]

Type de convertisseur	Fonction principale	Comportement en conditions normales	Comportement en cas de défaut
Convertisseur côté rotor	Contrôle du flux rotorique et de la puissance réactive/active injectée au réseau	- Commande vectorielle active - Suivi du point de puissance maximale (MPPT)	- Peut être désactivé (crowbar ou SBQR) - Perte du contrôle durant le défaut - Risque de surtension
Convertisseur côté réseau	Maintien de la tension sur le bus DC et transfert de puissance vers le réseau	- Régulation de la tension DC - Injection harmonique minimale - Injection de puissance réactive (si nécessaire)	- Peut être soumis à des surtensions - Risque de dépassement thermique - Doit rester opérationnel pour assurer la stabilité
Liaison DC (Bus continu)	Transfert d'énergie entre RSC et GSC	- Tension stabilisée pour un échange énergétique efficace	- Risque de surtension - Protégée par hacheur DC ou circuit dissipatif

5.6.1.1. Technique du Crowbar CC : protection des convertisseurs GADA lors des défauts

La technique du Crowbar CC (figure 5.9) utilise une résistance en parallèle avec le condensateur du lien CC pour éviter sa surcharge en cas de défaut. Activée automatiquement au-delà d’un seuil de tension, elle protège efficacement les convertisseurs GADA contre les surtensions réseau.

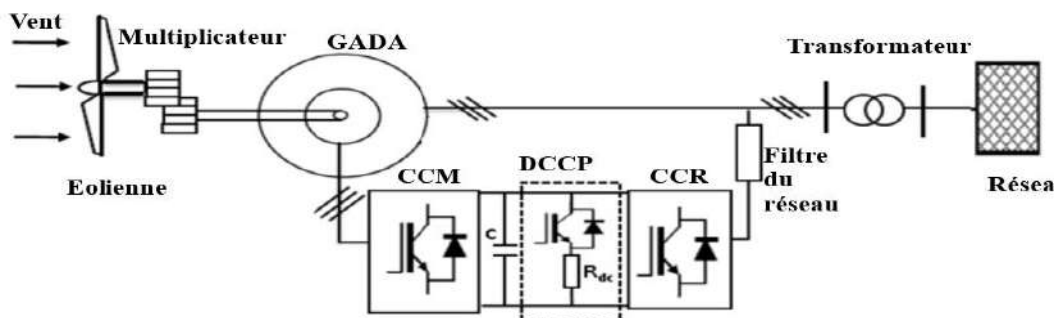


Figure.5.9. Représentation schématique de la GADA fonctionnant avec un circuit DCCP [121]

5.6.1.2. Technique du Crowbar Série Stator : protection interne des enroulements du stator

Le Crowbar série stator insère des résistances entre le stator et le réseau via des interrupteurs bidirectionnels (figure 5.10). En cas de défaut, les interrupteurs s'ouvrent et forcent le courant à passer par les résistances, protégeant ainsi le stator contre les surtensions et surintensités.

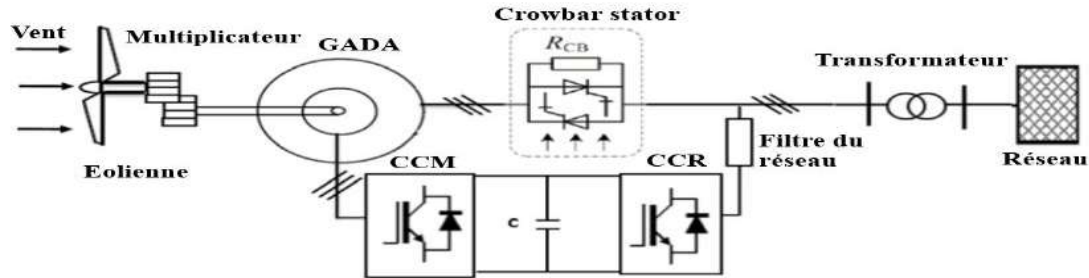


Figure.5.10. Représentation schématique de la GADA fonctionnant avec un circuit de Crowbar série stator [121]

5.6.1.3. Technique du Crowbar à Terminal Extérieur : protection de la GADA contre les courants de défaut

Le Crowbar à terminal extérieur fonctionne comme le Crowbar série stator, mais il est placé en série avec les terminaux de la GADA, comme montré dans la Figure 5.11. En cas de défaut, les interrupteurs s'ouvrent, dirigeant le courant vers des résistances pour protéger la machine contre les courants de défaut.

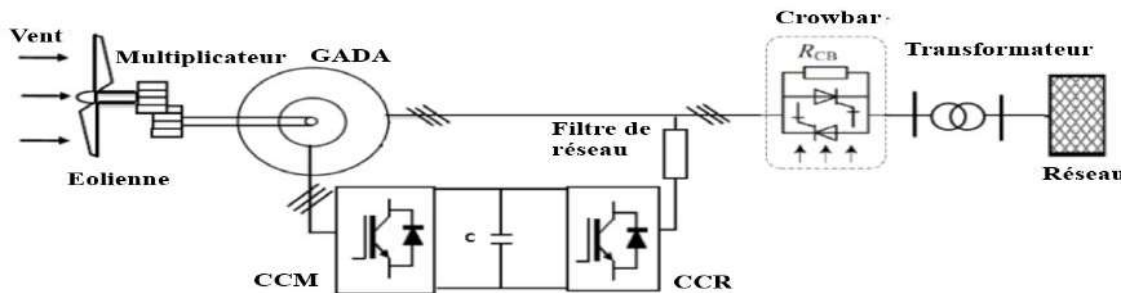


Figure.5.11. Représentation schématique de la GADA fonctionnant avec un circuit de Crowbar à terminal extérieur [122]

5.6.1.4. Technique conventionnelle du Crowbar Rotor : conversion de la GADA en SFIG lors des défauts

La technique conventionnelle du Crowbar protège les GADA en connectant un circuit de Crowbar au rotor lors des défauts réseau, ce qui désactive le convertisseur du rotor et transforme la machine en générateur à induction à alimentation simple (SFIG). Ce circuit est composé de trois résistances en série avec des interrupteurs statiques bidirectionnels. Les crowbars actifs (à thyristor, diodes ou pont de diodes) offrent une protection rapide et efficace. Cependant, l'activation du Crowbar fait fonctionner la GADA comme un générateur à cage d'écureuil, réduisant sa capacité à fournir de la puissance réactive, ce qui peut aggraver les chutes de tension du réseau [122].

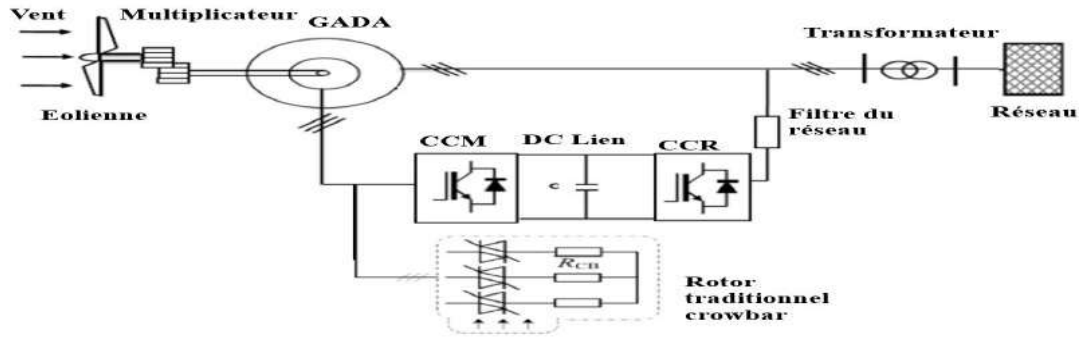


Figure.5.12. Représentation schématique de la GADA fonctionnant avec un circuit de Crowbar rotor traditionnel [123]

5.6.1.5. Choix de la résistance du Crowbar

Ce travail consiste à connecter un Crowbar en parallèle avec le circuit du rotor pour le protéger contre une chute de tension en utilisant un contrôleur flou (FLC). Le circuit de protection se compose de redresseurs, d'interrupteurs contrôlés et de résistances placées à chaque terminal du rotor, comme montré dans la figure 5.13.

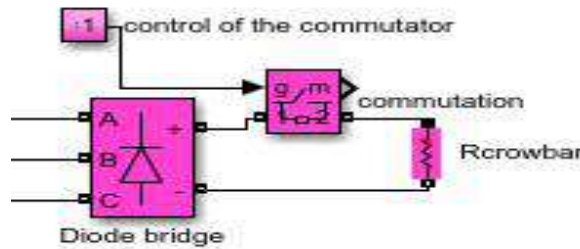


Figure.5.13. Diagramme de la résistance de protection par Crowbar

La détection de défaut est garantie par deux conditions en utilisant les équations (5.11) (5.12) [123] :

1- Le courant de défaut doit être inférieur au courant de sécurité, ce qui est indiqué par :

$$I_r > I_{r-limite} \tag{5.9}$$

2- La capacité de V_{bus} détermine la limite de la résistance du crowbar, ce qui est indiqué par : $V_{bus} > V_{bus-limite}$ (5.10)

La taille de la résistance du Crowbar dépend du courant rotorique (I_r) et de la tension du bus (V_{bus}). Elle doit être ajustée pour limiter le courant de défaut et améliorer la capacité LVRT de la GADA. L'erreur de courant est utilisée comme entrée du FLC pour optimiser cette protection.

$$\begin{cases} \frac{|\vec{V}_s(t_0)|}{\sqrt{(\omega_a L_l)^2 + (R_{cb})^2}} < I_{r,safe} \\ R_{cb,min} = \sqrt{(|\vec{V}_s(t_0)|)^2 - (\omega_a L_l I_{r,safe})^2} / I_{r,safe} \end{cases} \tag{5.11}$$

$$\begin{cases} \sqrt{3}R_{cb}I_{fault} < V_{DC,max} \\ R_{cb,max} = (\omega_a L_l V_{DC,max}) / \sqrt{3(|\vec{V}_s(t_0)|)^2 - (V_{DC,max})^2} \end{cases} \quad (5.12)$$

- **Modélisation des circuits de Crowbar**

En général, le fonctionnement de la protection par Crowbar du rotor peut être modélisé comme suit [124] :

$$V_{crowbar} = FS I_{crowbar} R_{crowbar} \quad (5.13)$$

Où : la valeur d'une fonction de commutation “ FS ” pour l'interrupteur de puissance est également intégrée dans l'expression suivante pour forcer cette fonction à zéro lorsque les crowbars sont inactifs (c'est-à-dire, $FS = 0$), et $FS = 1$, lorsque les Crowbars sont actifs. $V_{crowbar}$ et $I_{crowbar}$ sont respectivement la tension et le courant sur le crowbar ; et $R_{crowbar}$ est la résistance du crowbar.

En cas de défaut, les résistances de dérivation sont connectées pour protéger le RSC. Le temps de court-circuit dépend des paramètres du rotor, et ainsi la constante de temps transitoire du rotor est trouvée comme suit :

$$T_r^{SC} = \left(\frac{L_r^{SC}}{R_r + R_{r_crowbar}} \right) \quad (5.14)$$

Où : $R_{r_crowbar}$ est la résistance du crowbar du rotor ; R_r est la résistance du rotor ; L_r est l'inductance transitoire du rotor. Pour assurer la survie de la GADA lors d'un défaut réseau, la résistance du Crowbar doit être choisie en fonction du courant de court-circuit. Une valeur optimale permet de limiter ce courant et de faciliter le retour au fonctionnement normal après le défaut. Le déclenchement du Crowbar repose sur la valeur maximale du courant rotorique qui est donné par :

$$I_r^{max} = \left(\frac{V_r^{max}}{\sqrt{(X_r^{SC})^2 + (R_{r_crowbar})^2}} \right) \quad (5.15)$$

La performance de la GADA en défaut dépend du dimensionnement du Crowbar. Une résistance mal choisie peut causer des courants excessifs ou des surtensions. Une valeur optimale est donc nécessaire pour assurer à la fois protection et stabilité.

$$R_{r_crowbar} < \left(\frac{\sqrt{2}X_s^{SC}V_r^{max}}{\sqrt{2(V_r^{max})^2 + 3.2(V_s)^2}} \right) \quad (5.16)$$

Où : V_s est la tension du stator ; X_r^{SC} est la réactance transitoire du rotor ; et X_s^{SC} est la réactance transitoire du stator. La tension maximale autorisée du rotor V_r^{max} dépend linéairement de la tension continue (dc), qui est donnée en Pu.

$$V_r = k m V_{dc} \quad (5.17)$$

$$k = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \frac{V_{dc}^b}{V_r^b} \tag{5.18}$$

Où : m est la profondeur de modulation ($0 \leq m \leq 1$) ; V_{dc}^b et V_r^b sont les valeurs de base de la tension continue (dc) et de la tension du rotor, respectivement.

La résistance du Crowbar $R_{r_crowbar}$ peut être choisie comme étant de 20 à 50 fois la résistance du rotor.

Si : $I_r > I_{crowbar}$ ou $V_{dc}^b > V_{crowbar}$, activez le crowbar avec $R_{r_crowbar}$.

5.7. Contrôle des SCEE basés sur la GADA pour les chutes de tension

Le CCM régule la puissance générée par la GADA ainsi que son couple électromagnétique, tandis que le CCR régule la tension du bus CC. Les enroulements du rotor et le CCM sont protégés contre les surtensions et les surintensités à l'aide du bloc Crowbar. En utilisant les paramètres réels de la DFIG, le SCEE conçu a été complété par le modèle de machine asynchrone issu de la bibliothèque Matlab. La modélisation du SCEE, basée sur une GADA à vitesse variable, est simulée sur Matlab/Simulink. La Figure 5.14 présente le schéma de simulation.

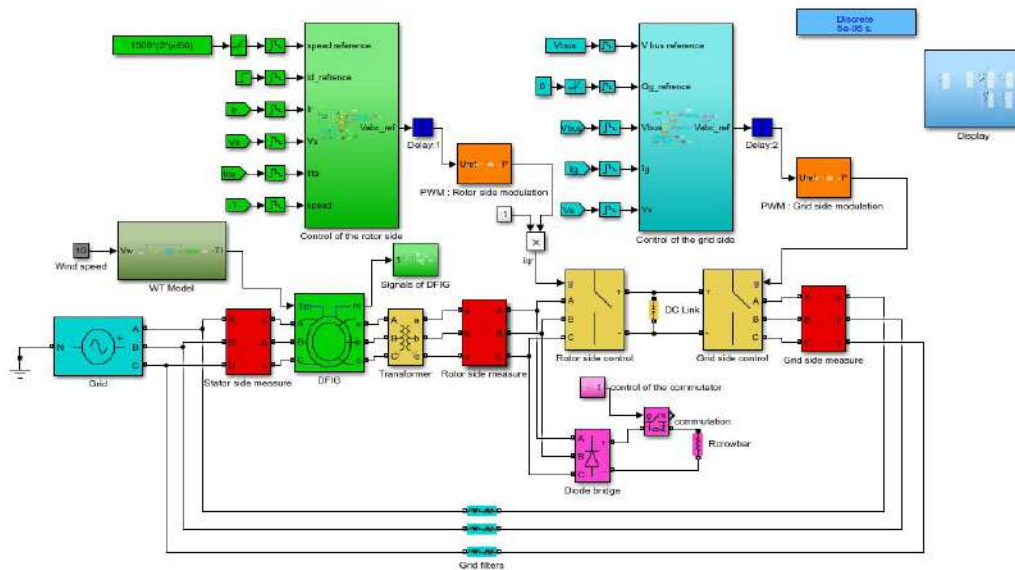


Figure.5.14. Diagramme du SCEE avec GADA pour l'étude de la chute de tension à l'aide de Matlab/Simulink

5.7.1. Contrôle d'une éolienne à vitesse variable

La méthode MPPT est largement utilisée dans la littérature pour contrôler les éoliennes en charge partielle en suivant la trajectoire d'extraction de puissance maximale [124]. Il existe deux types différents de contrôleurs, et dans cette partie, nous avons utilisé un contrôleur de vitesse indirect, comme illustré dans la figure 5.15.

Lors du fonctionnement MPPT, les expressions sont définies par l'équation (35) :

$$\begin{cases} C_p = C_{p_max} \\ \lambda = \lambda_{opt} \\ \beta = \beta_{opt} \end{cases} \quad (5.19)$$

Le couple aérodynamique est donné par les équations (5.20) -(5.22) :

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{R^2 \Omega_t^2 C_{p_max}}{\lambda_{opt}^2 \lambda_{opt}} \quad (5.20)$$

Ou,

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3 N^3} C_{p_max} \quad (5.21)$$

C'est-à-dire,

$$C_{aer} = k_{opt} \Omega_t^2 \quad (5.22)$$

Le couple électromagnétique est donné par l'équation (5.23) :

$$C_{em} = -\frac{C_{aer}}{G} + D \Omega_m \quad (5.23)$$

En substituant (5.22) dans (5.23) on obtient le couple électromagnétique comme indiqué dans (5.24) :

$$C_{em} = -k_{opt} \Omega_m^2 + D \Omega_m \quad (5.24)$$

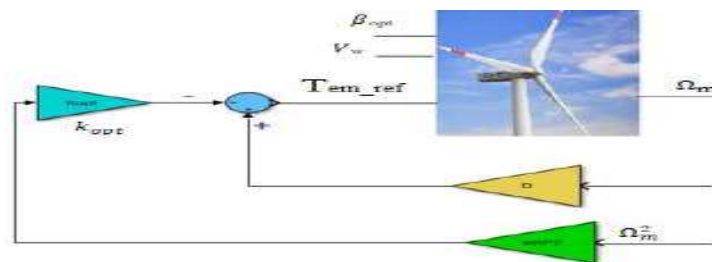


Figure.5.15. Contrôle de vitesse indirect

5.7.2. Structure de contrôle pour la commutation de la protection crowbar

Cette partie propose une amélioration des capacités LVRT des SCEE basées sur la GADA en intégrant un contrôle flou (FLC) au Crowbar. Implémenté sous Matlab/Simulink (figure 5.16), le FLC optimise le fonctionnement de l'interrupteur du Crowbar. Il détecte les anomalies en comparant la tension du bus DC et le courant du rotor avec leurs valeurs de référence. L'erreur obtenue est ensuite traitée par le FLC, qui ajuste le timing de la commutation du Crowbar pour une réponse plus efficace aux défauts du réseau.

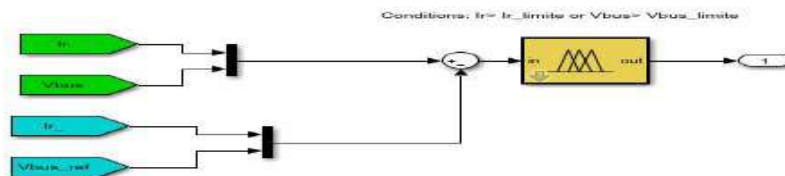


Figure.5.16. Contrôleur logique flou du Crowbar

Le tableau 5.4 présente la matrice d'inférence des décisions floues de commutation du crowbar selon le courant rotorique (I_r) et la tension du bus DC (V_{bus})

Tableau.5.4. Matrice d'inférence pour la commutation du Crowbar

I_r \ V_{bus}	Faible	Moyenne	Élevée
Élevée (≥ 0.9 pu)	N	N	P
Moyenne (0.5–0.9 pu)	N	P	A
Faible (≤ 0.5 pu)	P	A	A

La figure 5.17 représente les fonctions d'appartenance du courant rotorique (I_r) et la tension du bus DC (V_{bus}).

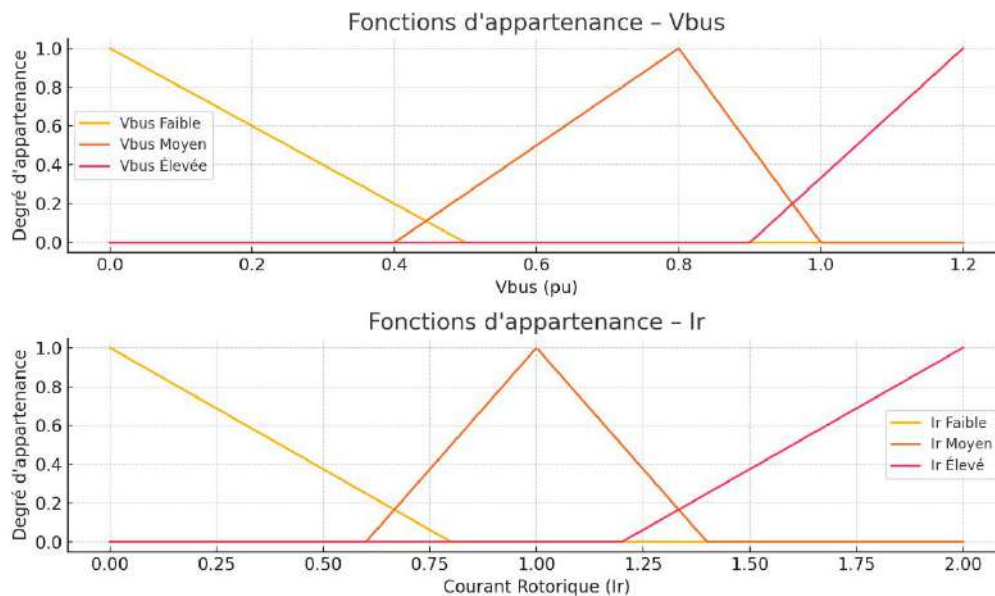


Figure.5.17. Fonctions d'appartenance

5.7.3. Structure de contrôle côté machine

Le schéma de contrôle vectoriel du convertisseur côté rotor est montré dans la figure 5.18. L'objectif du CCM est de contrôler les courants du stator et du rotor pour réguler le couple et donc la vitesse de l'éolienne, afin d'obtenir un maximum d'énergie [125]. Basé sur la transformation dq-axis, le CCM utilise des contrôleurs PI pour gérer les composants de courant du rotor sur les axes d et q ($I_{d,rp}$ et $I_{d,rn}$; $I_{q,rp}$ et $I_{q,rn}$) et un contrôleur de vitesse. Plusieurs blocs de transformation (DQ-abc, abc-DQ) sont impliqués dans les boucles de contrôle de courant interne (I_{dr} , I_{qr}), ainsi qu'un bloc d'injection du troisième harmonique pour augmenter la tension de sortie de 15 % [126]. Un bloc d'élimination du courant continu réduit les effets de couplage des phases. La synchronisation de la tension du stator est assurée par un PLL (Phase Locked Loop) et des blocs d'angle pour une estimation robuste du flux rotorique. Enfin, l'ajout du

contrôle MPPT au contrôleur PI améliore la performance globale en optimisant le couple de référence C_{em_ref} .

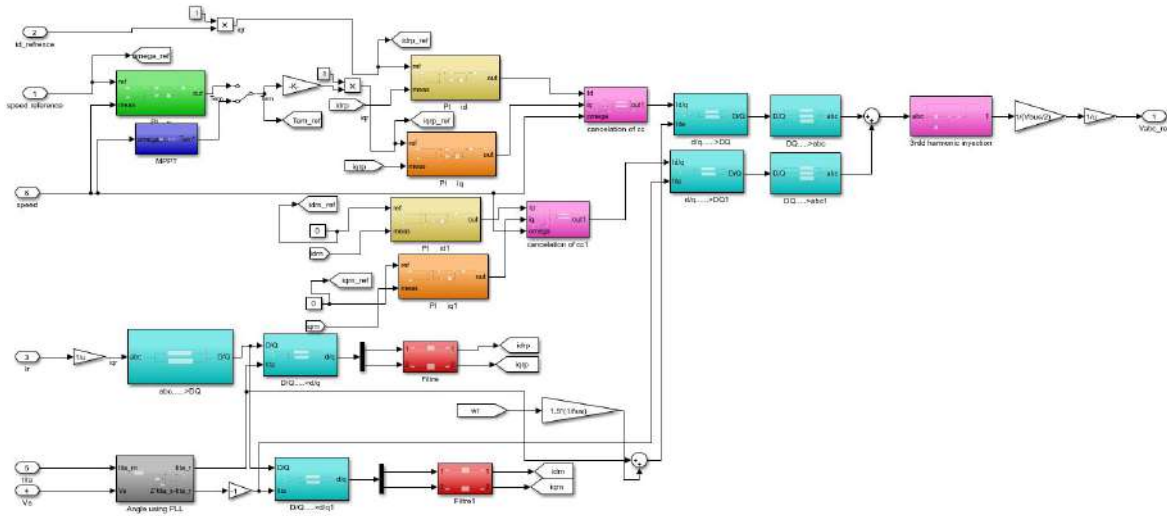


Figure.5.18. Schéma de contrôle vectoriel du convertisseur côté rotor avec compensation de la séquence négative en cas de creux de tension

5.7.4. Structure de contrôle côté réseau

Le schéma de commande du CCR est montré dans la figure 5.19. Dans cette section, nous utilisons la même stratégie de contrôle CCM, grâce à la transformation abc-dq, cette approche permet de réguler la puissance active et réactive injectée dans le réseau, stabiliser la fréquence et la tension, et maintenir une tension stable du bus DC. Cette méthode assure une meilleure résilience du système face aux creux de tension et optimise les performances du convertisseur côté réseau [127].

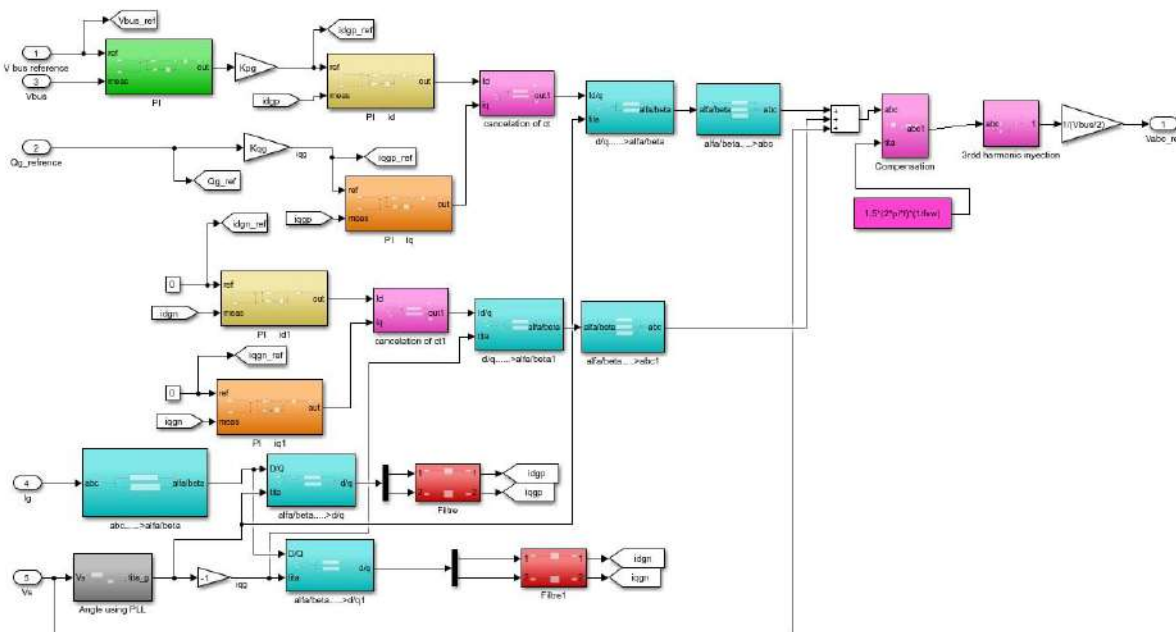


Figure.5.19. Schéma de commande du convertisseur côté réseau avec compensation de la séquence négative du courant statorique en cas de creux de tension

Le contrôle vectoriel du CCR utilise la transformation dq et des régulateurs PI pour gérer les composantes du courant réseau (I_{d_gp} et I_{d_gn} ; I_{q_gp} et I_{q_gn}) ainsi que la continuité du bus DC. L'angle de la tension du réseau est estimé via un PLL, qui transforme les signaux triphasés en biphasés et inversement. Grâce à son contrôle en boucle fermée, le PLL assure une estimation stable et précise de l'angle, en supprimant le bruit et en synchronisant les signaux sinusoïdaux triphasés avec une fréquence variable. Lorsque le contrôle automatique du gain est activé, le PLL ajuste dynamiquement l'entrée d'erreur de phase selon l'amplitude du signal d'entrée [128].

5.8. Résultats de simulation et discussion

Le SCEE ne peut pas maintenir des performances constantes lors des creux de tension en raison des limitations du convertisseur rotorique. Ce travail propose une éolienne à GADA équipée d'un système de protection de type crowbar, qui assure la sécurité et le maintien du contrôle du système face aux baisses de tension. L'intégration d'un contrôleur logique flou améliore les conditions de fonctionnement. L'organigramme de la figure 5.20 résume cette approche. Les simulations démontrent l'efficacité du crowbar en comparant les performances du système avec et sans protection durant l'intervalle de $t = 3,15s$ à $t = 4,17s$, à une vitesse de vent de 10 m/s.

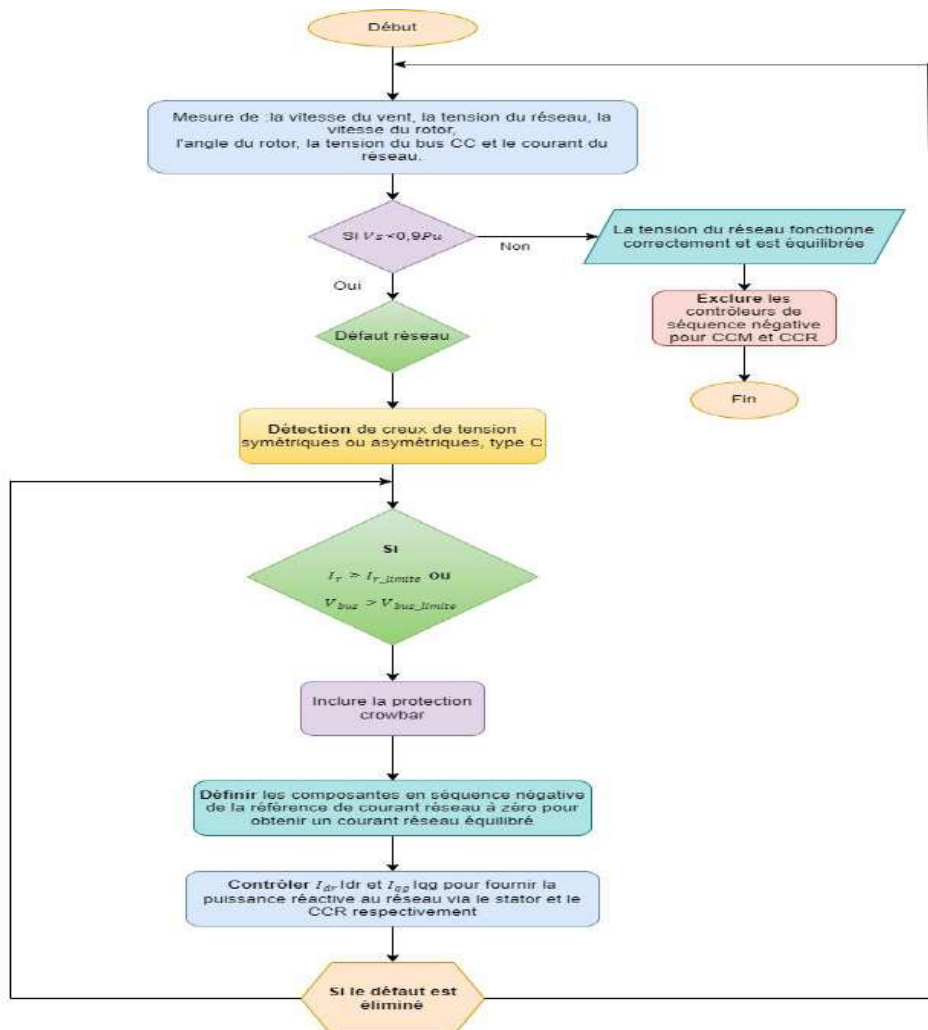
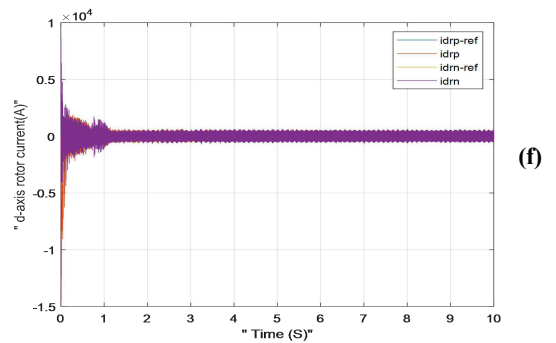
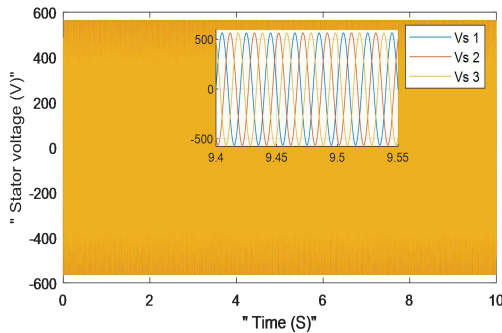
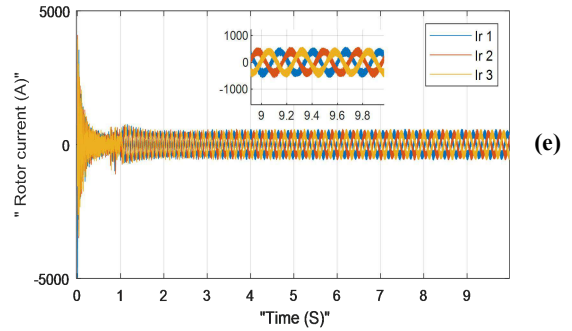
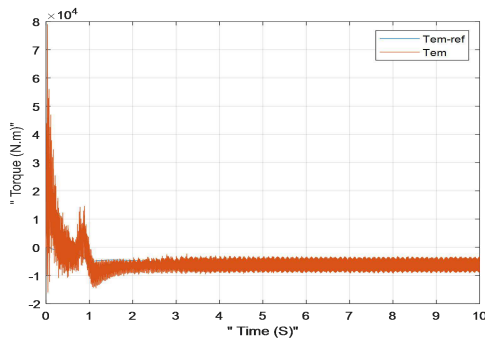
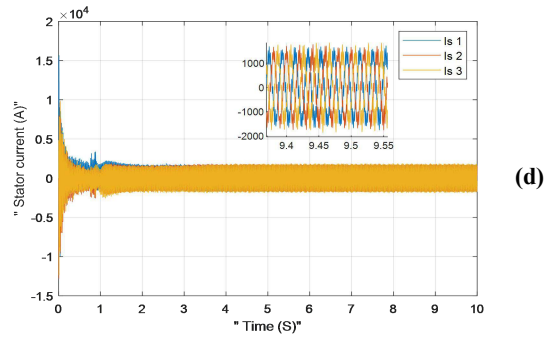
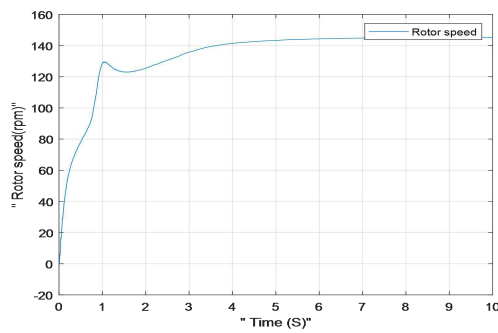


Figure.5.20. Schéma illustrant l'approche de contrôle utilisée pour les creux de tension symétriques et asymétriques (type C)

5.8.1. État du système durant l'état sain

Cette étude est réalisée en utilisant un SCEE à vitesse variable équipé d'une GADA. L'éolienne a une puissance nominale de 2,4 MW, tandis que la GADA a une puissance nominale de 2 MW. La tension statorique est fixée à 690 V et la fréquence à 50 Hz, avec une vitesse synchrone de 1500 tr/min. Le réseau électrique fournit trois tensions équilibrées avec une fréquence et une amplitude constante en fonctionnement normal. Selon l'équation (5.25), les trois phases sont décalées de 120° et ont les mêmes valeurs de tension :

$$\begin{cases} V_a = V_{ag} \cos(w_g t + \phi) \\ V_b = V_{bg} \cos(w_g t + \phi - 120^\circ) \\ V_c = V_{cg} \cos(w_g t + \phi - 240^\circ) \end{cases} \quad (5.25)$$



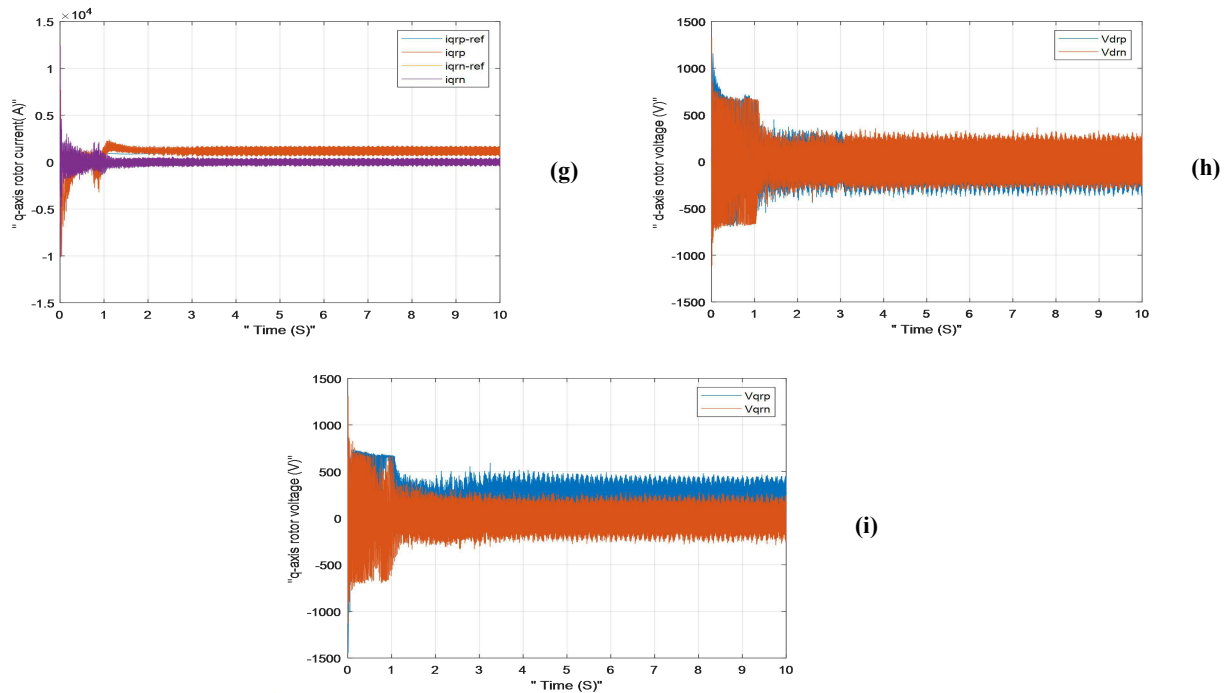


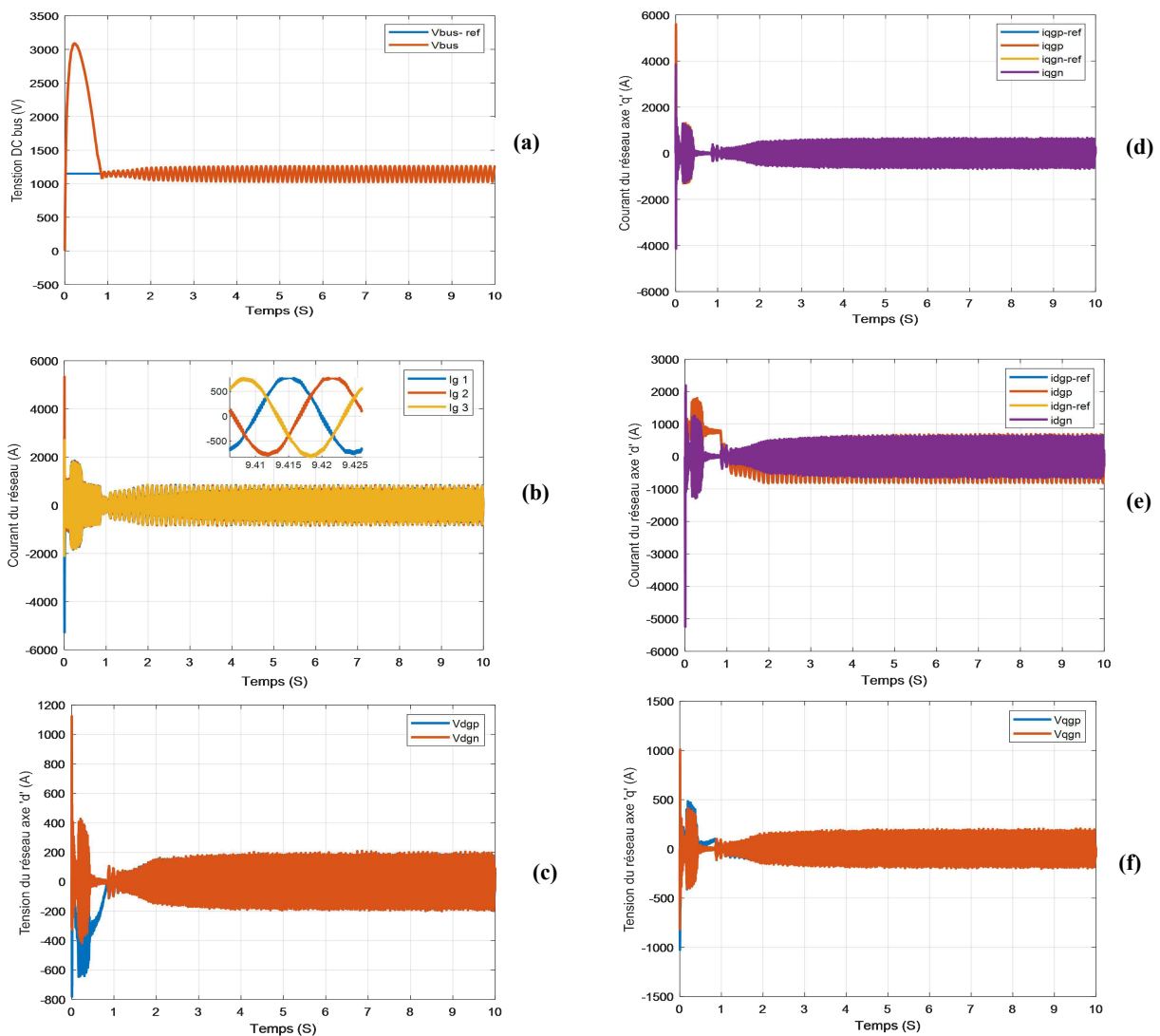
Figure.5.21. Résultats de la simulation du CCM en état sain

La figure 5.21.a illustre l'évolution de la vitesse du rotor en régime transitoire. Initialement, la vitesse augmente progressivement jusqu'à atteindre la valeur de référence, à laquelle elle finit par se stabiliser. Bien que quelques oscillations soient observées, elles s'atténuent rapidement, laissant place à une légère fluctuation en régime stable. Le démarrage direct de la machine connectée au réseau entraîne d'importantes perturbations, mais une fois cette phase terminée, le système retrouve un contrôle efficace. La figure 5.21.b représente l'évolution du couple, qui est négatif, indiquant que la charge influence sa variation et que la machine fonctionne en mode générateur. Un dépassement est visible en régime transitoire en raison de la connexion directe de la machine au réseau, mais après quelques millisecondes, le couple diminue progressivement pour atteindre un état stable. De plus, on remarque que le couple électromagnétique suit parfaitement sa référence. Les figures 5.21.c, 5.21.d, et 5.21.e montrent que la tension statorique, les courants statoriques et rotoriques de la GADA sont de forme sinusoïdale correcte. Les figures 5.21.f et 5.21.g illustrent respectivement le courant rotorique sur l'axe 'd' pour les séquences positive et négative, ainsi que le courant rotorique sur l'axe 'q' pour ces mêmes séquences. Les valeurs de $I_{d, rn}$ et $I_{q, rn}$ sont nulles, car la méthode du courant rotorique équilibré a été appliquée. En revanche, $I_{q, rp}$ varie en fonction du couple, tandis que $I_{d, rp}$ dépend de la puissance réactive transmise du stator au système. Les figures 5.21.h et 5.21.i illustrent respectivement la tension rotorique sur l'axe 'd' pour les séquences positive et négative, ainsi que la tension rotorique sur l'axe 'q' pour ces mêmes séquences. La tension $V_{q, rp}$ varie en fonction de $I_{q, rp}$. De plus, étant donné que $I_{d, rn}$ et $I_{q, rn}$ sont maintenus à zéro, les tensions $V_{d, rn}$ et $V_{q, rn}$ sont également nulles.

La figure 5.22 présente la simulation du CCR en l'absence de défaut ou la figure 5.22.a, illustre un dépassement significatif de la tension du bus DC, causé par un démarrage intense. Cependant, après quelques secondes, les convertisseurs côté rotor et côté réseau atteignent

leur point de fonctionnement stable. La tension du bus DC diminue alors progressivement, oscillant autour de sa valeur de référence avant de se stabiliser. Une fois un état stable atteint avec des oscillations acceptables côté réseau, le convertisseur côté rotor fonctionne également de manière optimale, avec un contrôle efficace de ses boucles de courant et de couple. La figure 5.22.b montre que la tension du réseau adopte une forme sinusoïdale parfaite. Les figures 5.22.c et 5.22.d illustrent que les courants du réseau selon les axes d-q suivent précisément leurs références, tout comme les tensions du réseau représentées dans les figures 5.22.f et 5.22.g. Étant donné que I_{d_gn} et I_{q_gn} sont maintenus à zéro, les tensions V_{d_gp} et V_{q_gn} sont également nulles. En revanche, les tensions V_{d_gp} et V_{q_gn} restent très faibles grâce à la rétroaction de la tension du réseau. Conformément aux exigences réglementaires du réseau, la puissance réactive doit être nulle, ce qui est confirmé par la figure 5.22.g.

La figure 5.23 présente la simulation de l'analyse des défauts en l'absence de défaut. Dans la figure 5.23.b, on observe qu'aucun courant ne traverse la protection Crowbar, ce qui indique que le couple et le flux statorique sont parfaitement régulés. Cette stabilité est corroborée par les résultats des figures 5.23.a et 5.23.c, qui confirment le bon fonctionnement du système.



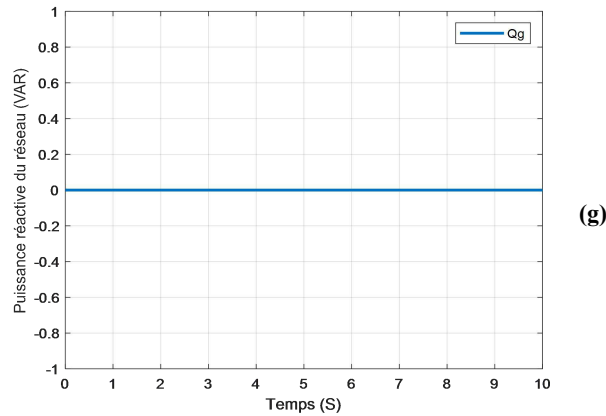


Figure.5.22. Résultats de la simulation du CCR en état sain

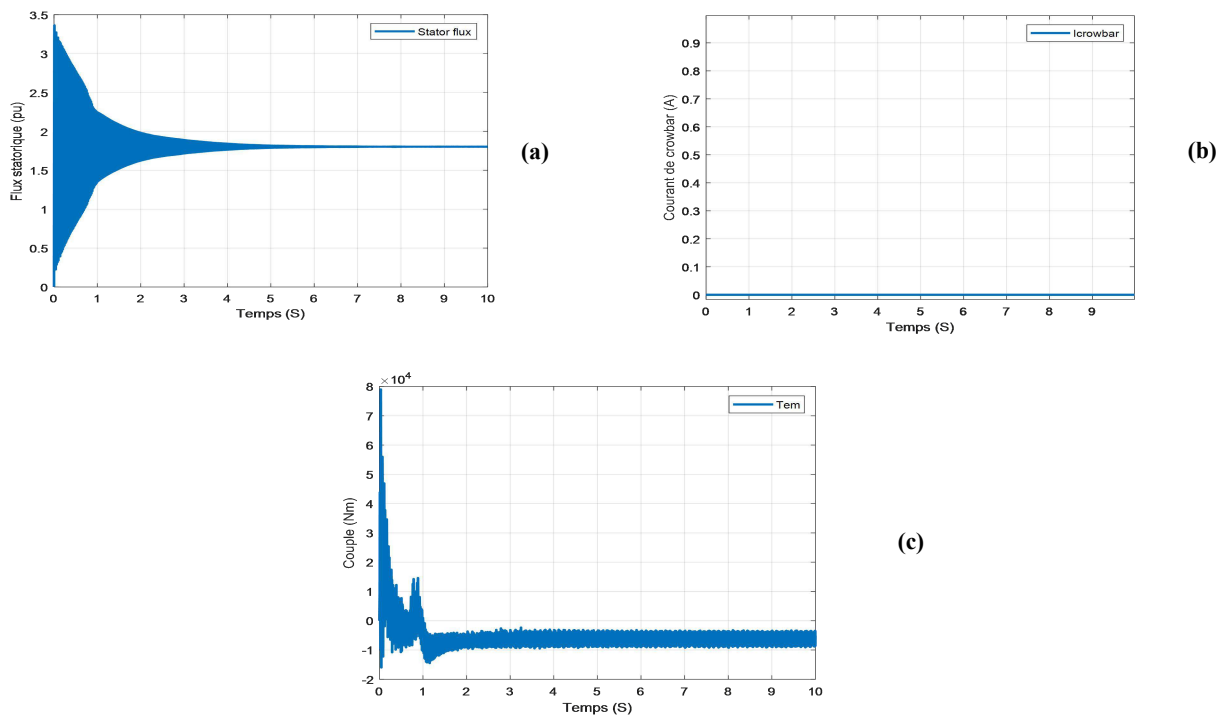


Figure.5.23. Résultats de simulation de l'analyse des défauts en état sain

5.8.2. Creux de tension symétrique sans protection Crowbar

Cette section examine le fonctionnement de la GADA lors de creux de tension symétriques à 80 %, incluant des harmoniques, sans la protection Crowbar. La GADA est supposée opérer dans des conditions normales et, à un instant précis (3,15s), un creux de tension symétrique se produit, en l'absence de protection FLC. La figure 27 présente les résultats de simulation du CCM lors de ce creux de tension symétrique sans protection Crowbar. Les résultats de la simulation de la GADA sont étudiés sans recourir à la technique du Crowbar lorsqu'un défaut triphasé équilibré à la terre se manifeste entre le sol et les trois phases. Pendant le creux de tension, l'analyse se concentre sur les côtés rotor et réseau, comme le montrent les figures 5.24 et 5.25. En outre, une analyse de défaut est présentée dans la figure 5.26.

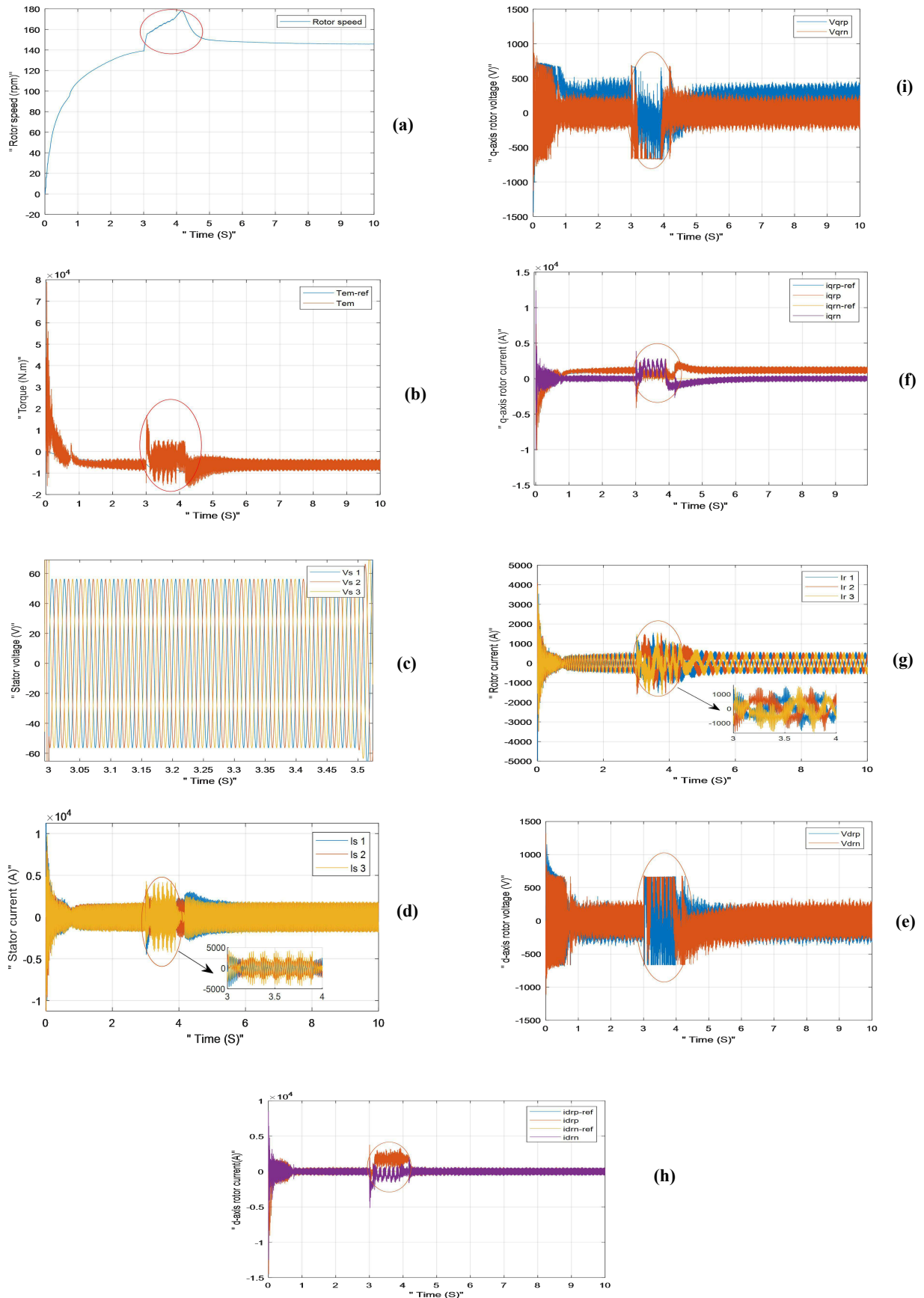
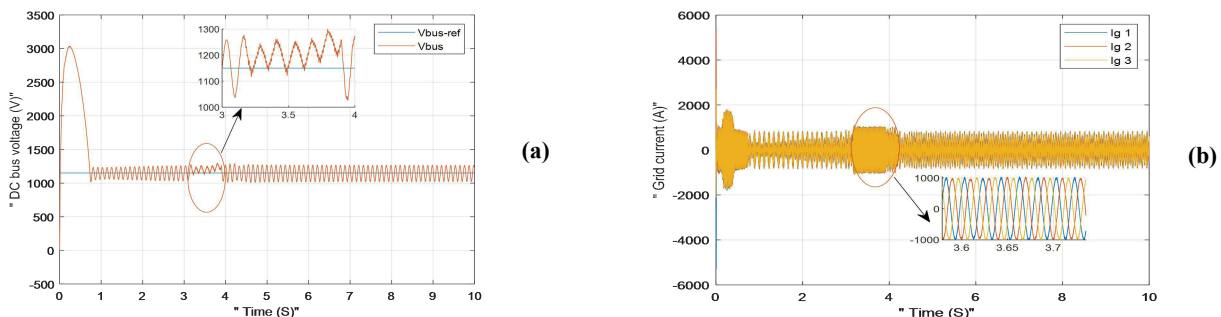


Figure.5.24. Résultats de simulation du CCM lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar

Lors de la simulation d'un creux de tension symétrique au PCC, l'absence de protection Crowbar a provoqué des perturbations importantes dans le système de conversion d'énergie éolienne. Nous avons appliqué un creux de tension symétrique entre $t = 3,15$ s et $t = 4,17$ s, et avons observé une perturbation significative sur tous les paramètres de la GADA. La figure 5.24.a, montre une augmentation soudaine de la vitesse du rotor. La figure 5.24.b illustre le couple électromagnétique C_{em} de la GADA sans protection FLC, à une vitesse de vent de 10 m/s. Dans ce scénario, le temps nécessaire pour que le couple atteigne sa valeur de référence est de 5 s, avec une perturbation notable et importante. Une fluctuation rapide du couple électromagnétique a été observée, provoquant des contraintes mécaniques sur l'arbre et la transmission de l'éolienne. Selon la figure 5.24.c, un changement brutal de la tension statorique V_s est clairement visible, et la tension présente sur le réseau n'atteint que 20% de la valeur nominale. Après le creux de tension, la tension récupère progressivement. Comme indiqué dans la figure 24.c, la tension statorique souhaitée V_s est finalement rétablie par la GADA sans protection FLC après 5 s, une fois que le creux de tension symétrique a été dissipé à 4,17 s. Le temps de récupération du SCEE est essentiel pour la précision et l'applicabilité du système proposé. Comme le montre ce cas, le temps de récupération est relativement long. Par ailleurs, les autres figures 26.e et 26.f illustrent une augmentation des tensions rotoriques V_{d_r} et V_{q_r} , ainsi que des courants rotoriques I_{d_r} et I_{q_r} de la GADA sans protection FLC. De même, le courant statorique I_s , s'éloigne de la forme sinusoïdale, ce qui entraîne une perturbation notable du couple pendant le creux de tension. Des chutes de tension ont été observées dans le stator, correspondant au creux de tension du réseau, tandis que les courants ont subi une augmentation brutale en raison du flux de puissance non régulé entre le stator et le rotor. Cette déviation des paramètres électriques augmente la complexité du contrôle du système, affectant ainsi sa performance pendant les conditions de creux de tension. Les courants dans le rotor (figure 5.24.g) ont subi des transitoires violents, atteignant des valeurs élevées qui dépassent les limites sécuritaires. Cela expose le système à des risques de dommages sur les enroulements du rotor et sur les convertisseurs de puissance.

Figure 5.25. Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar.



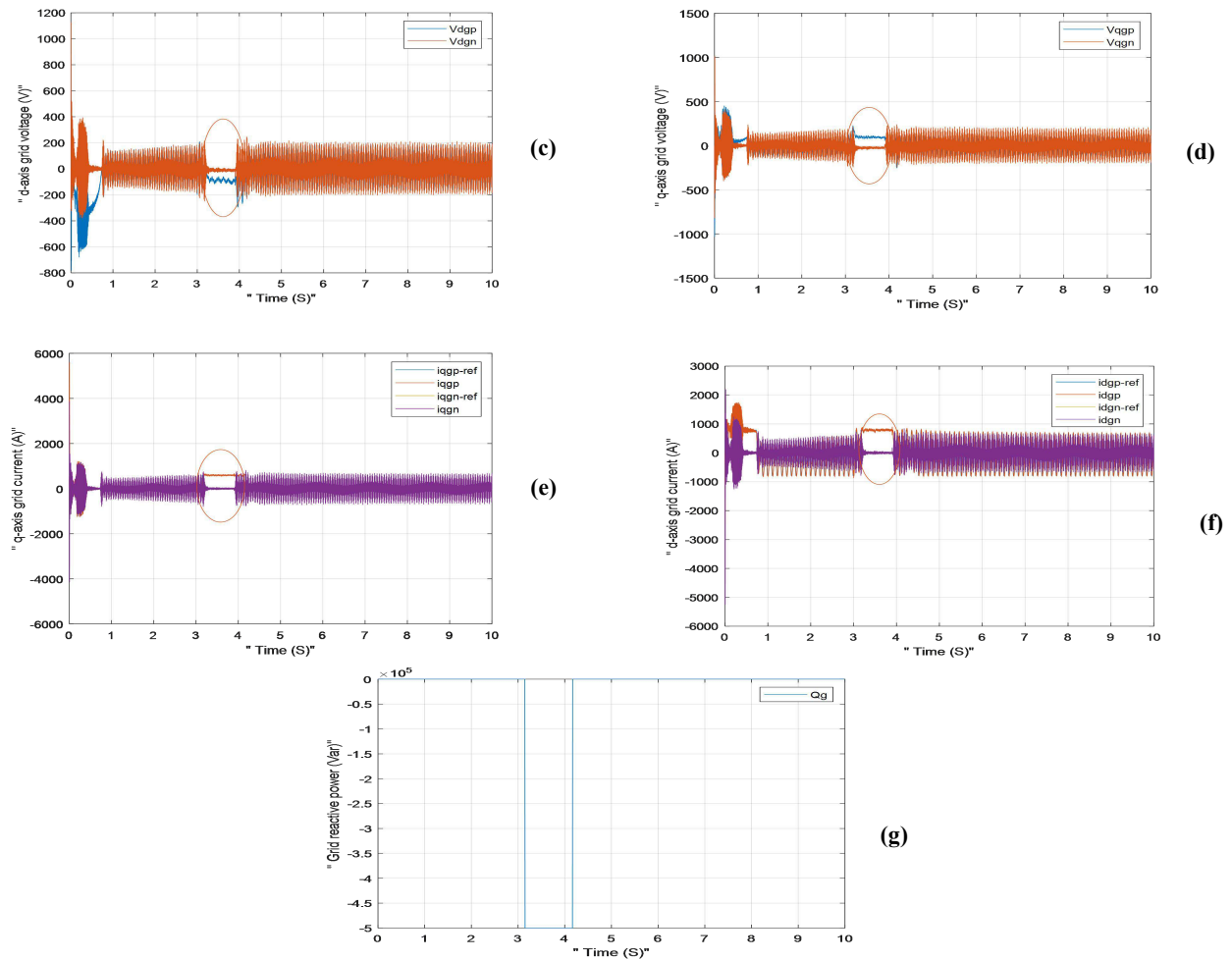


Figure.5.25. Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar

Concernant le convertisseur côté réseau (CCR), les figures 5.25 montrent que le creux de tension sans FLC provoque des fluctuations anormales de la tension du bus DC, ainsi que des variations des tensions V_{d-g} , V_{q-g} et des courants du réseau. Le système proposé utilise une référence de bus DC de 1150 V. Pendant le creux de tension symétrique à 3,15 s, la GADA sans FLC devient instable jusqu'à 4,17 s. De plus, la GADA sans FLC ne parvient pas à atteindre la tension de bus DC de référence avant la fin de la période du creux, c'est-à-dire à 4,6 s. Elle ne parvient donc pas à récupérer la tension V_{bus} de référence de manière rapide. La figure 5.25.a, montre une perturbation significative de la tension du bus DC entre 3,1 s et 4,17 s, indiquant clairement que le signal ne suit pas sa référence pendant cette période de creux sans FLC.

La tension du bus continu a montré des oscillations importantes et des surtensions, mettant en péril la stabilité du CCR. La figure 5.25.b révèle également que les tensions rotoriques de la GADA sans FLC sont perturbées durant cette période. Figure 5.25.b montre que le courant du réseau reste équilibré et conserve une forme sinusoïdale parfaite, grâce au contrôle de la séquence négative du CCR.

Les figures 5.25.e et 5.25.f montrent de fortes fluctuations des courants du réseau suivant les axes d-q. Cependant, malgré cette perturbation importante, la puissance réactive est généralement nulle. Cependant, lors d'un creux de tension, une référence de puissance réactive est générée en fonction du courant durant cette période, comme le montre la figure 5.25.g. La présence de cette puissance réactive générée est attendue, car en pratique, les régulations du réseau exigent que l'on fournisse une quantité substantielle de courant réactif. Cela peut être réalisé par le CCR en fournissant une puissance réactive négative Q_g pendant le creux de tension. Le courant I_{qg} contrôle la puissance réactive du CCR, et pour des courants réseaux équilibrés, I_{qg} doit être maintenu à zéro. Cette régulation garantit que la puissance réactive est correctement ajustée pendant les perturbations du réseau, ce qui permet de maintenir l'équilibre du système même en présence de creux de tension.

La figure 5.26.a montre la détection du courant de défaut via la protection Crowbar, ce qui engendre une perturbation soudaine du couple et une réduction du champ magnétique statorique, comme le confirment les figures 5.26.b et 5.26.c. Cette protection Crowbar permet de limiter les effets négatifs du défaut en réagissant rapidement pour protéger le système, mais elle provoque également des perturbations notables dans les paramètres de fonctionnement, notamment le couple et le champ magnétique statorique, en raison de l'interruption du flux d'énergie pendant l'incident.

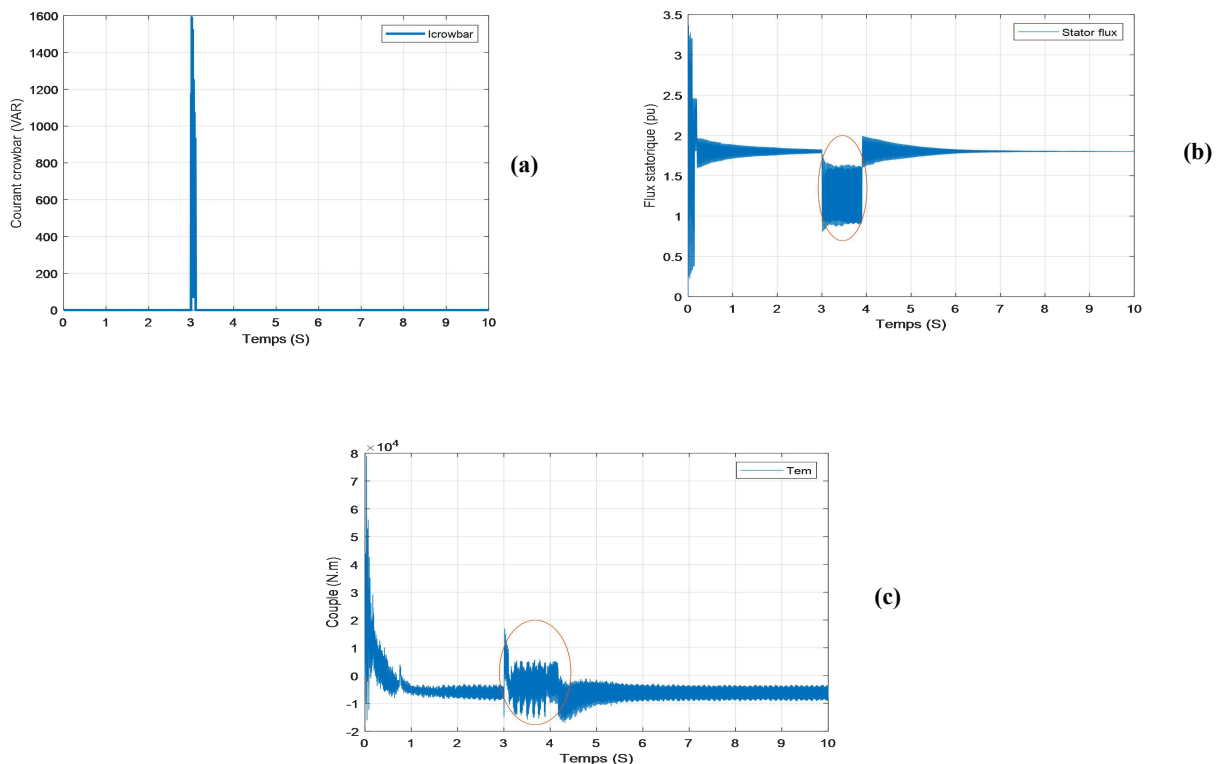
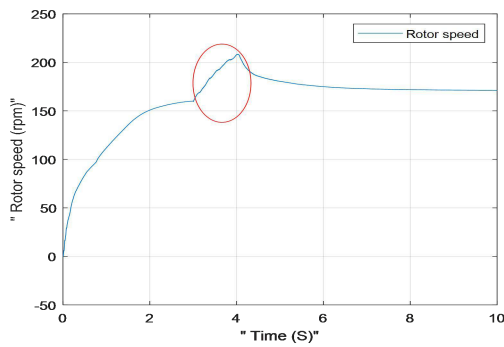


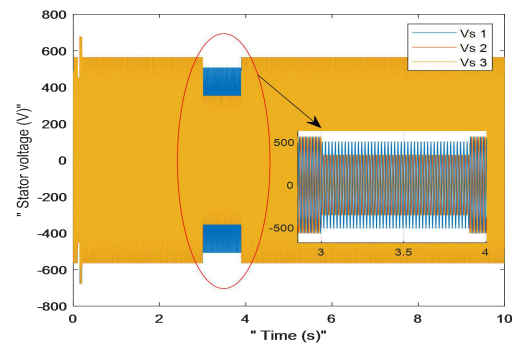
Figure.5.26. Résultats de la simulation de l'analyse de défaut lors d'un creux de tension symétrique sans protection Crowbar

5.8.3. Creux de tension asymétrique type C sans protection par Crowbar

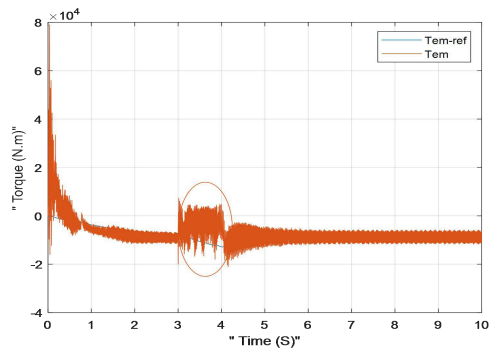
Il existe de nombreux types de creux de tension déséquilibrés. Dans cette étude, nous avons mis en évidence un défaut asymétrique de type C. Il est donc essentiel de surveiller la perturbation asymétrique biphasée (entre deux phases) lors des dysfonctionnements du réseau. Dans ce même système, les résultats de simulation de la GADA sont observés sans protection Crowbar lors d'un défaut asymétrique. Dans cette situation, les références du courant rotorique correspondent à la somme des séquences positive et négative. Il est donc nécessaire de générer des tensions et courants d'ordre positif et négatif à l'aide de la GADA, ainsi que d'introduire des courants d'ordre négatif, afin de garantir un contrôle précis du générateur. Pour assurer une régulation efficace de chaque séquence, il est essentiel de les traiter indépendamment. Lors du creux de tension, notre analyse a été menée à la fois sur le rotor et sur le réseau, et les résultats sont présentés dans les mêmes figures que celles utilisées pour l'examen du cas symétrique. Les figures 5.27 et 5.28 montrent respectivement les résultats du côté générateur et du côté réseau, tandis que la figure 5.27 présente les résultats de l'analyse du défaut. Un creux de tension a été introduit dans le réseau, provoquant une chute déséquilibrée des tensions de la DFIG : la tension de la phase a reste stable, tandis que celles des phases b et c diminuent. Ce creux, survenant entre $t = 3,15s$ et $t = 4,17s$, induit une asymétrie et un déséquilibre dans le réseau, entraînant une perturbation importante au niveau du stator, qui est d'abord détectée par le CCM, puis par le CCR. Les résultats de la simulation de la GADA sont analysés sans la technique du Crowbar lorsqu'un défaut triphasé équilibré à la terre se produit entre le sol et les trois phases. Pendant le creux de tension, notre analyse s'est focalisée sur les côtés rotor et réseau, comme illustré dans les figures 5.27 et 5.28. En outre, une analyse détaillée du défaut est présentée dans la figure 5.29.



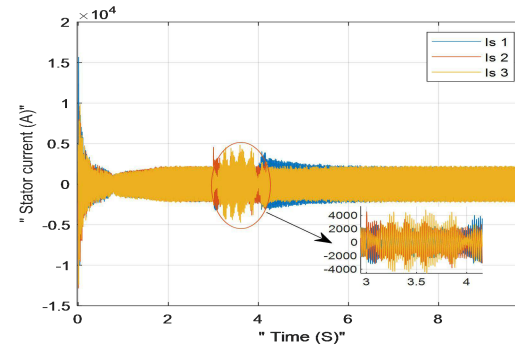
(a)



(c)



(b)



(d)

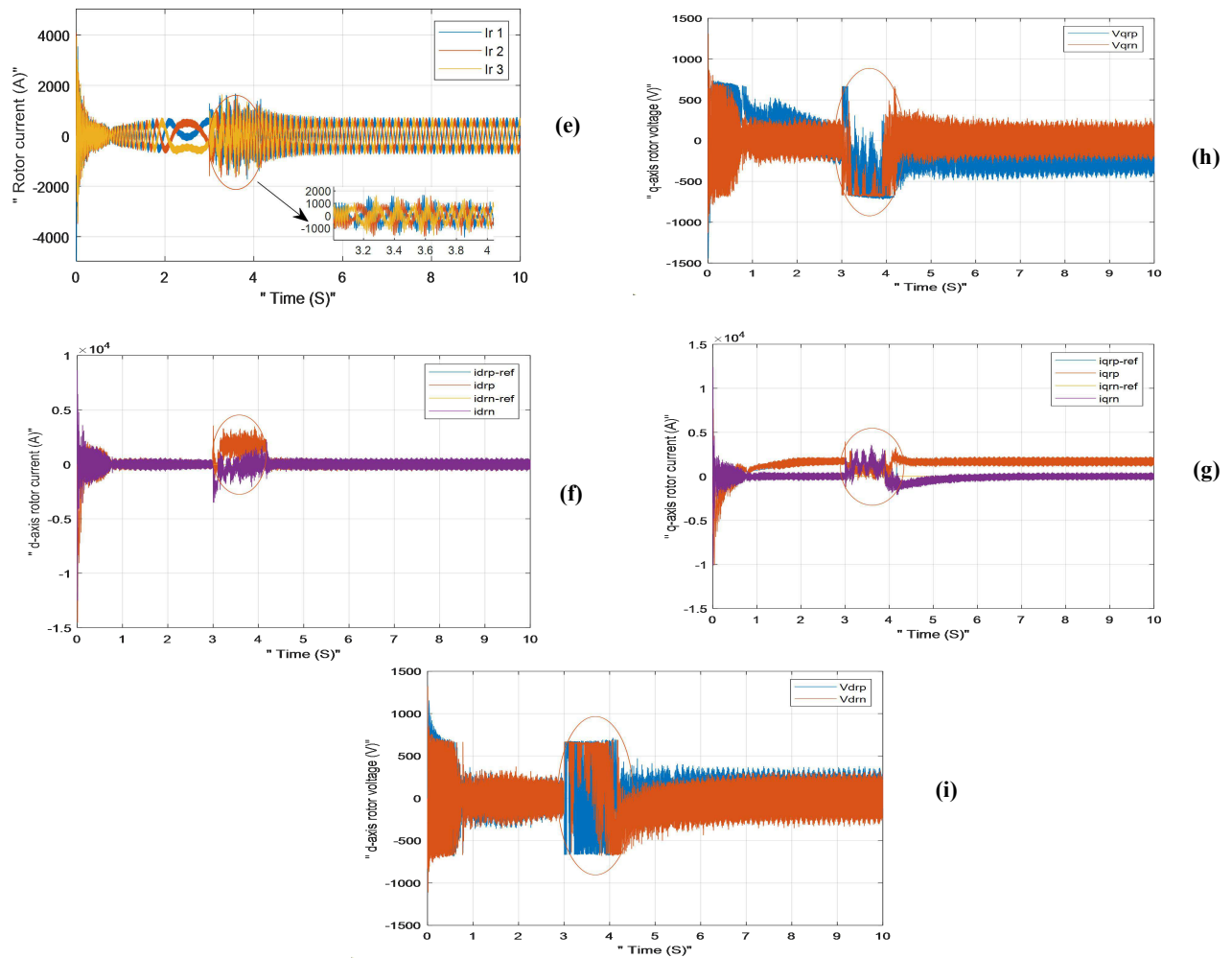
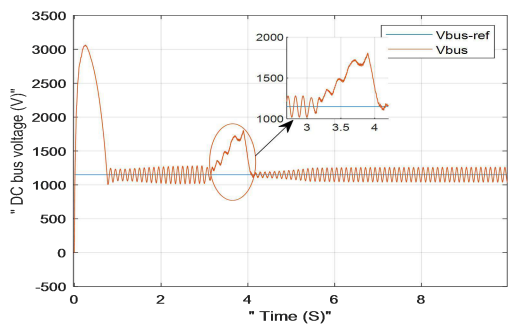


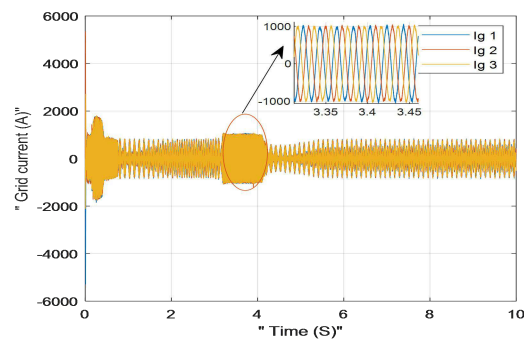
Figure.5.27. Résultats de simulation du CCM lors d'un creux de tension asymétrique sans protection Crowbar

Lors de la simulation d'un creux de tension asymétrique au point de couplage commun (PCC), l'absence de protection Crowbar a entraîné des perturbations majeures dans le système à DFIG. Le temps de récupération après un creux de tension asymétrique est essentiel pour garantir la validité du système SCEE basé sur la GADA. Dans ce cas, nous constatons qu'après un creux de tension asymétrique, le système maintient sa tension nominale une fois la faute résolue à 4,17 s. Nous observons également une forte perturbation du courant statorique I_s , des tensions du rotor en séquence positive et négative V_{d_r} , V_{q_r} , des courants du rotor en séquence positive et négative I_{d_r} , I_{q_r} ainsi que du couple électromagnétique. Des variations rapides du couple électromagnétique ont été observées, entraînant des contraintes sur l'arbre et le système de transmission de l'éolienne. Cependant, la tension finit par se rétablir, marquant la fin de la perturbation et permettant au système de fonctionner avec des performances acceptables. À $t=3,15$ s, une forte perturbation de tous les paramètres de la GADA est observée. Comme le montre la figure 5.27.c, une perturbation asymétrique de la tension statorique est clairement visible pendant le creux de tension, ce qui empêche un contrôle total du système. La tension statorique a

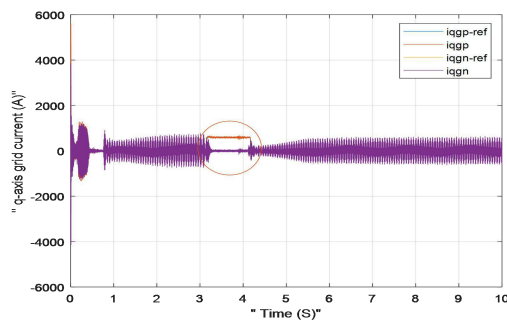
été affectée par des creux de tension asymétriques, avec des courants fluctuants, dus à l'irrégularité du flux de puissance entre le rotor et le stator. Le temps de récupération après un creux de tension asymétrique est important pour garantir la validité du système SCEE basé sur la GADA. Dans ce cas, après un creux de tension asymétrique entre deux phases, le système parvient à maintenir sa tension nominale une fois la faute résolue à 4,17s. On observe également une perturbation significative du courant statorique I_s , des tensions du rotor en séquence positive et négative V_{d_r} , V_{q_r} , des courants du rotor en séquence positive et négative I_{d_r} , I_{q_r} , ainsi que du couple électromagnétique. Cependant, la tension finit par se rétablir, marquant la fin de la perturbation et permettant au système de reprendre son fonctionnement avec des performances acceptables. Les oscillations du couple sont principalement dues au déséquilibre de I_{q_r+} , qui est responsable de la régulation du couple. La figure du couple électromagnétique de la GADA montre que le dépassement du C_{em} est significativement élevé en l'absence de FLC. À 4,17s, le C_{em} de la GADA sans FLC atteint finalement la référence après la suppression du creux de tension asymétrique. D'après les figures 5.27.d, 5.27.e, 5.27.h et 5.27.i, l'apparition d'un creux de tension entraîne une augmentation des courants I_s et I_r , ainsi que des tensions V_{d_r} et V_{q_r} . Cette perturbation provoque une diminution du flux statorique et une réduction de la tension du réseau. La figure 5.27.e met en évidence que, durant le creux de tension, le courant du rotor ne suit pas une forme sinusoïdale. Les courants du rotor ont présenté des pics de forte intensité, ce qui a dépassé les limites de sécurité, mettant en danger les enroulements du rotor et les convertisseurs de puissance. Au départ, le système fonctionne en mode sous-synchrone, caractérisé par une vitesse inférieure à la vitesse synchrone. Lorsque la vitesse de référence atteint la vitesse synchrone, les courants cessent d'être sinusoïdaux et adoptent une forme continue, faisant ainsi fonctionner la machine comme un moteur synchrone. Enfin, en mode sous-synchrone, nous observons des séquences de type (abc). Selon les figures 5.27.f et 5.27.g, les courants du rotor dans le repère d-q subissent de fortes perturbations et s'écartent de leurs valeurs de référence. L'analyse du comportement du convertisseur côté réseau révèle également des perturbations significatives affectant les paramètres du système, entraînant une perte totale de contrôle.



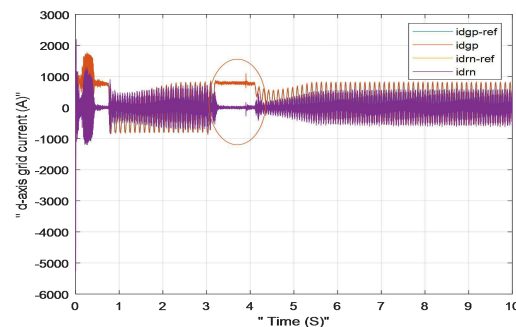
(a)



(c)



(b)



(d)

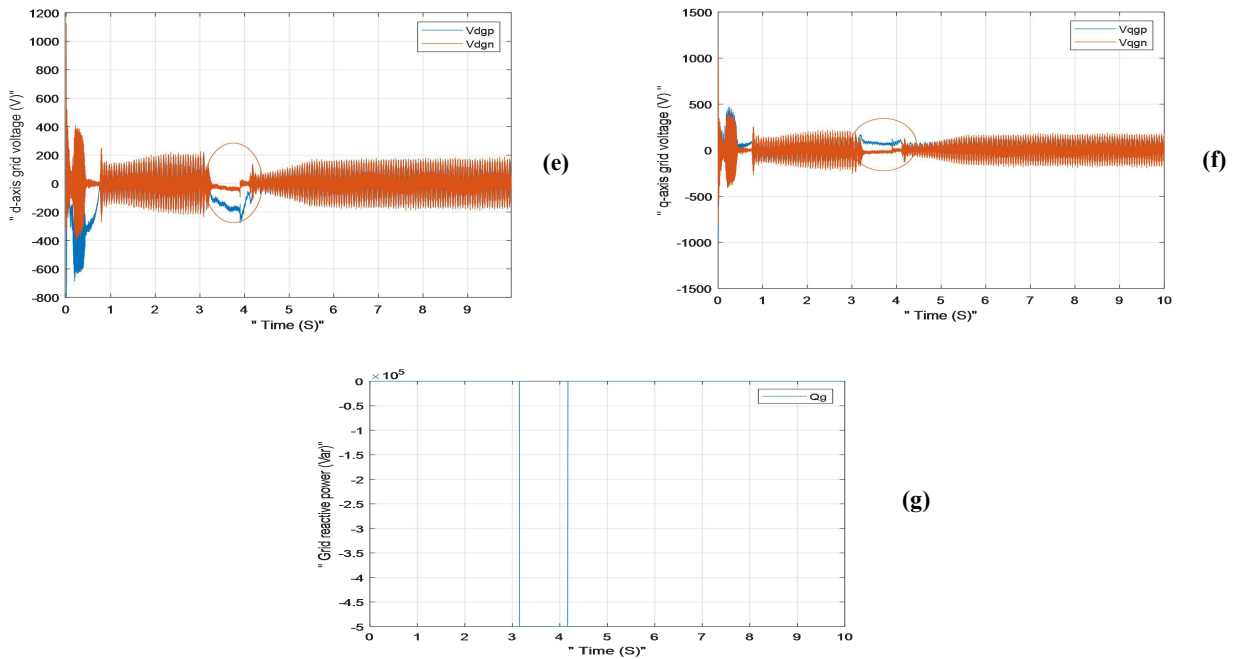


Figure.5.28. Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension asymétrique sans protection Crowbar

Au début du creux de tension, la figure 5.28.a illustre des oscillations marquées de la tension du bus DC. La tension du bus continu a subi de sévères oscillations et des surtensions importantes, compromettant la stabilité du CCR. Celui-ci se révèle incapable de réguler efficacement la surtension massive engendrée par la puissance du rotor qui le traverse, ce qui entraîne un dépassement significatif. Face à cette situation, le courant $I_{d_{g+}}$ intervient pour tenter de ramener la tension du bus à sa valeur de référence, fixée à 1150 V dans le système proposé. Cependant, sans l'utilisation du FLC, la GADA ne parvient pas à atteindre la tension de référence du bus et se stabilise en 1,5 s, avec un dépassement de V_{bus} particulièrement élevé. Les Figures 5.28.c, 5.28.d, 5.28.e et 5.28.f illustrent une déviation des trajectoires des tensions $V_{d_{gn}}$, $V_{d_{gp}}$, $V_{q_{gn}}$, $V_{q_{gp}}$, ainsi que des courants $I_{d_{gn}}$, $I_{d_{gp}}$, $I_{q_{gn}}$, $I_{q_{gp}}$.

Pour corriger cette asymétrie dans le réseau et assurer un contrôle efficace du générateur, il est nécessaire d'introduire une commande de courant négatif dans les boucles de courant positif. À $t=3,15s$, une demande soudaine de courant réactif positif est observée via $I_{q_{g+}}$, tandis que les composantes négatives $I_{d_{g-}}$ et $I_{q_{g-}}$ restent nulles. Bien que la tension du réseau V_s soit asymétrique, le courant du réseau I_g demeure équilibré et fonctionne correctement, grâce à l'intégration des composantes de séquence négative $I_{d_{g-}}$ et $I_{q_{g-}}$ dans le CCR. Cependant, étant donné que la tension du bus DC reste perturbée et ne parvient pas à suivre sa référence, la mise en place d'un mécanisme de protection s'avère indispensable.

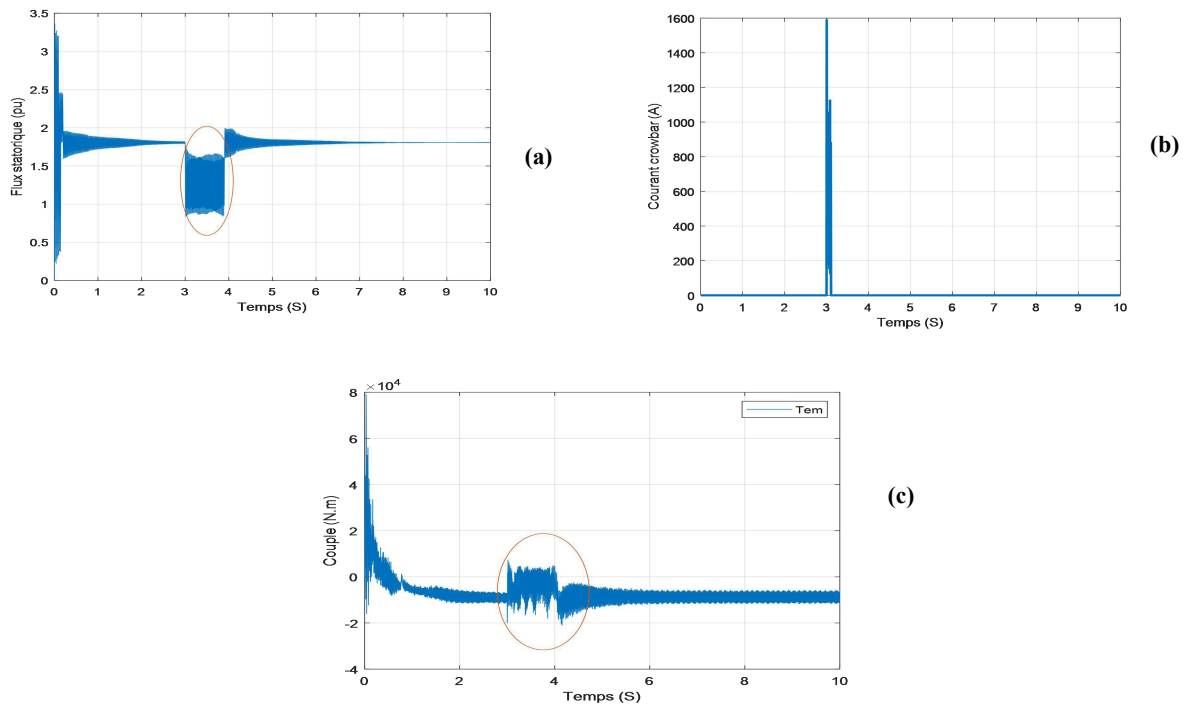
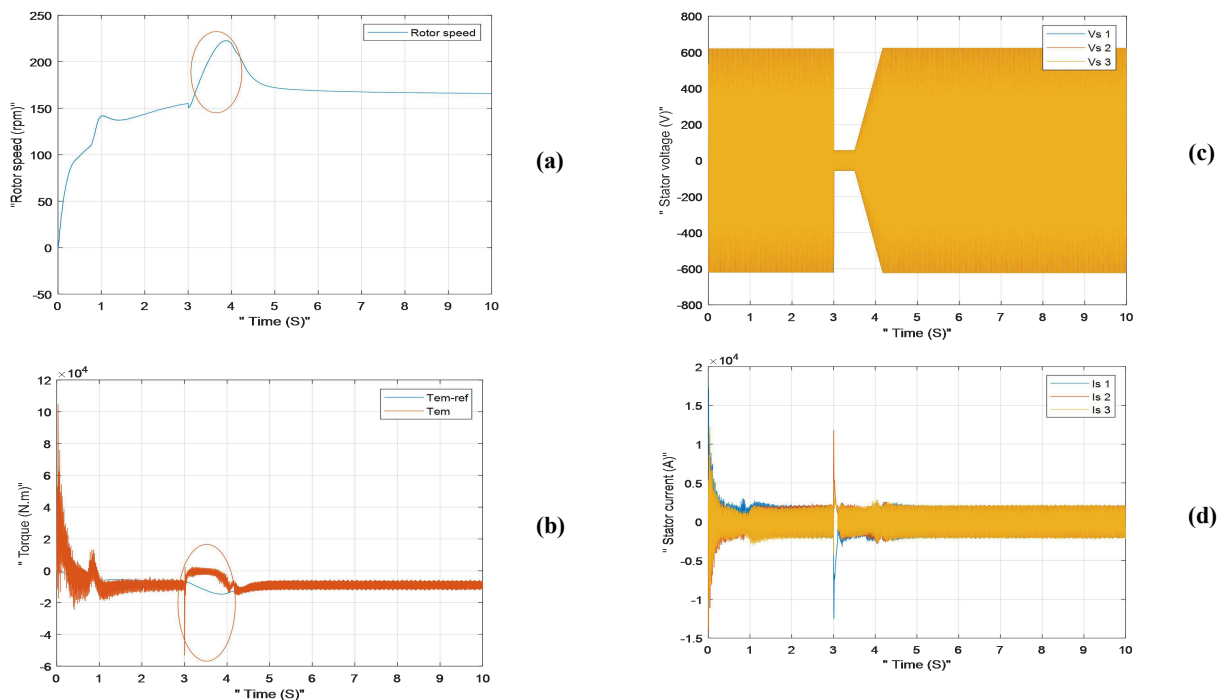


Figure.5.29. Résultats de simulation de l'analyse de défaut lors d'un creux de tension asymétrique sans protection Crowbar

La figure 5.29.b met en évidence la détection d'un courant de défaut grâce au dispositif de protection par Crowbar. Cette activation provoque une perturbation soudaine du couple et une diminution du flux magnétique statorique. Ces effets sont corroborés par les observations des figures 5.29.a et 5.29.c, qui confirment l'impact de la protection sur la dynamique du système.

5.8.4. Creux de tension asymétrique type C avec protection par Crowbar

Cette partie analyse le fonctionnement de la GADA lors de creux de tension asymétriques de type C, avec protection par Crowbar.



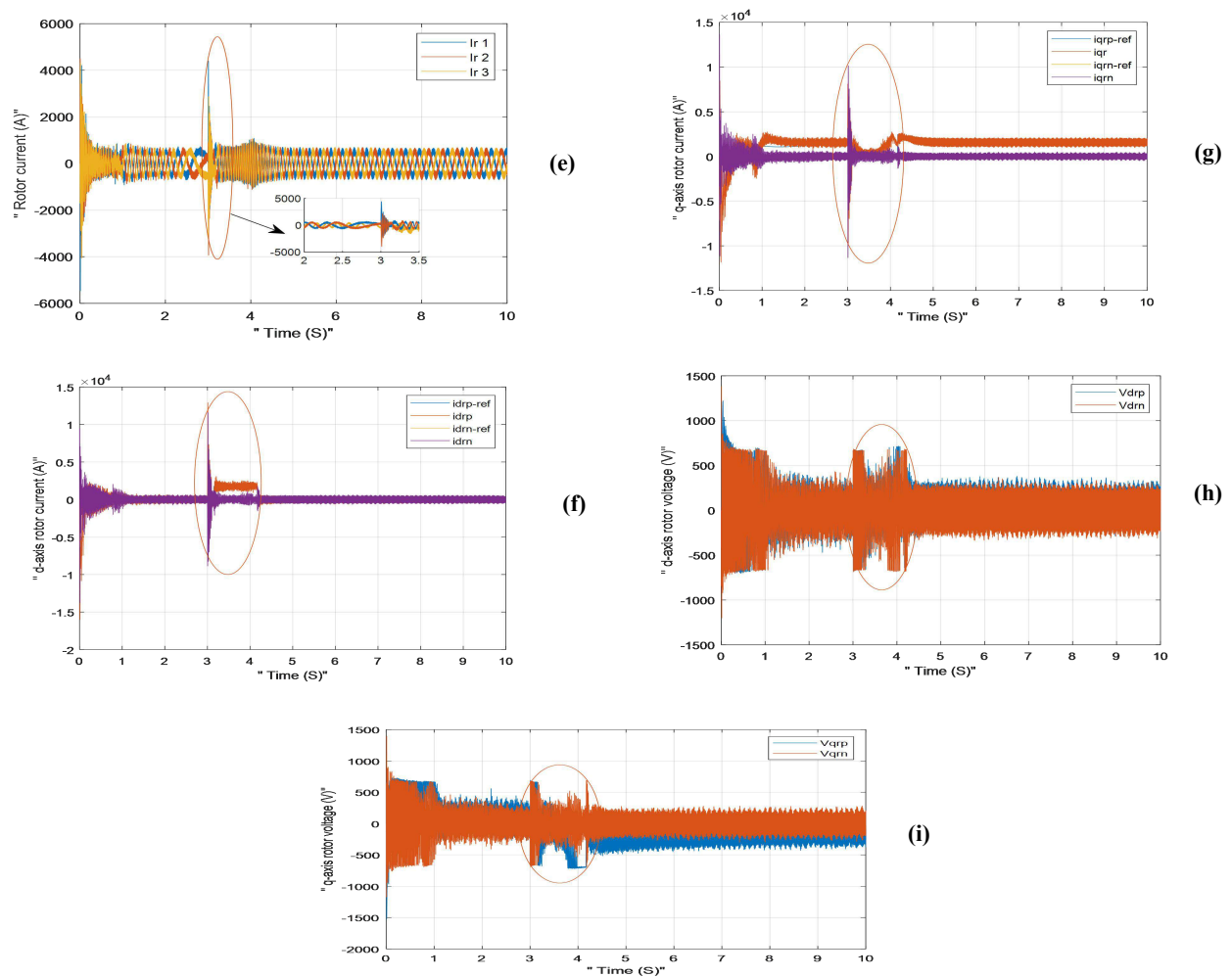


Figure.5.30. Résultats de simulation du CCM lors d'un creux de tension asymétrique avec protection Crowbar

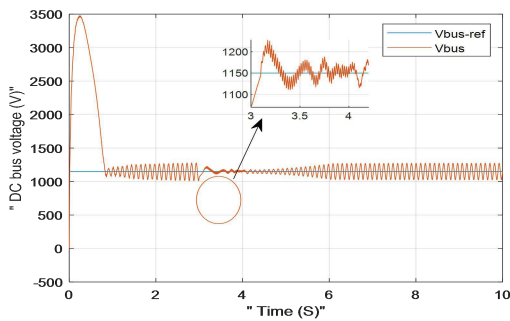
Lors de la simulation d'un creux de tension asymétrique au point de couplage commun (PCC), la protection Crowbar a joué un rôle clé en limitant les perturbations et en assurant la sécurité du système à GADA. Comme prévu, dès l'apparition soudaine du creux de tension, la protection par Crowbar s'active, permettant l'écoulement de l'intégralité du courant et de l'énergie à travers la résistance de protection, comme l'illustre l'analyse des défauts dans la figure 5.30. Lors de cette activation, l'ensemble du courant du rotor est dérivé vers le circuit de protection, assurant ainsi la protection du CCM. Par ailleurs, l'activation est exprimée en pourcentage, mettant en évidence des courants statoriques élevés ainsi qu'un pic de couple significatif. L'analyse de la figure 5.30 montre que les perturbations sont considérablement réduites en comparaison avec la situation où aucune protection par Crowbar n'est appliquée. Selon les figures 5.30.b, 5.30.d, et 5.30.e, il est observé que les paramètres (I_s, C_{em}) sont perturbés uniquement lors de l'apparition du défaut.

La Figure 5.30.b montre l'évolution du couple électromagnétique du DFIG avec un contrôleur FLC à une vitesse de vent de 10 m/s. Pour garantir la validité du SCEE basé sur la GADA, il est essentiel de déterminer le temps nécessaire pour que le couple de référence soit atteint après un creux de tension asymétrique. D'après la figure 5.30.b, C_{em} parvient à retrouver

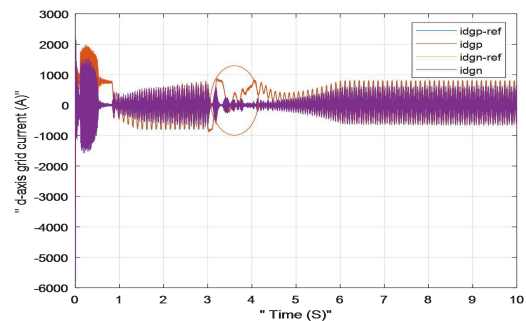
sa valeur de référence plus rapidement et sans dépassement, contrairement au système sans FLC, où un dépassement important a été observé. La protection a également permis de minimiser les variations du couple électromagnétique, réduisant ainsi les contraintes mécaniques sur l'arbre et le système de transmission de l'éolienne. D'après les résultats, la GADA avec FLC proposée s'avère non seulement fiable, mais aussi valide en termes de couple électromagnétique C_{em} .

D'après la figure.5.30.d la protection Crowbar a permis de limiter les courants du rotor en régulant les surtensions et en réduisant les pics de courant. Cela a évité d'endommager les enroulements du rotor et les convertisseurs de puissance. En présence de creux de tension asymétriques, la protection Crowbar a permis de maintenir la tension statorique dans des limites sûres, tout en régulant les courants, ce qui a permis d'éviter les fluctuations dangereuses dues au défaut du réseau. Le temps de récupération du SCEE est un facteur essentiel pour garantir l'exactitude et l'efficacité du système proposé. Selon la figure 5.30.c, la GADA avec FLC parvient à atteindre la tension souhaitée V_s en 4,4 secondes, tandis que la GADA sans FLC met 5 secondes pour y parvenir, ce qui montre que le système avec FLC récupère plus rapidement.

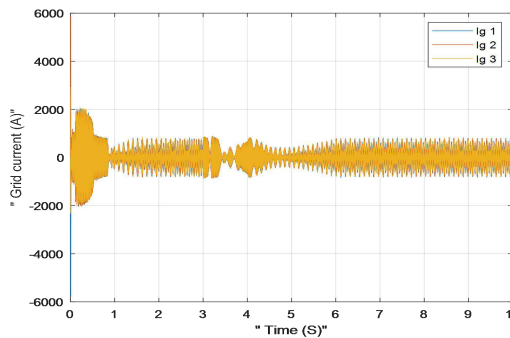
Les résultats obtenus avec le SCEE basé sur la GADA proposée sont à la fois réalistes et acceptables. En termes de récupération de la tension, le SCEE sans FLC met plus de temps pour revenir à son état normal que le SCEE avec FLC. En conséquence, la GADA avec FLC offre des performances plus précises et plus réactives. Les figures 5.30.f et 5.30.g montrent également que, lors de l'activation de la protection, la perturbation du courant du rotor, analysée selon l'axe d-q, est considérablement réduite. De plus, les figures 5.30.h et 5.30.i illustrent une réduction significative de la perturbation de la tension du rotor. Ces résultats confirment que le FLC, associé à la GADA, améliore non seulement la vitesse de récupération, mais aussi la stabilité du système face aux perturbations du réseau.



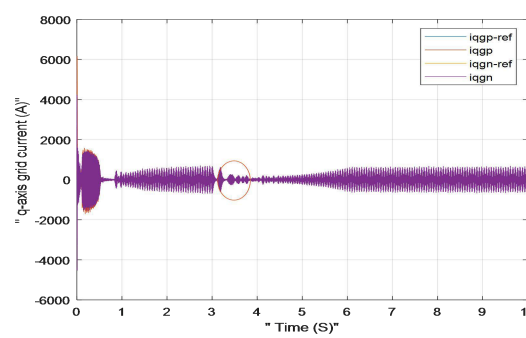
(a)



(c)



(b)



(d)

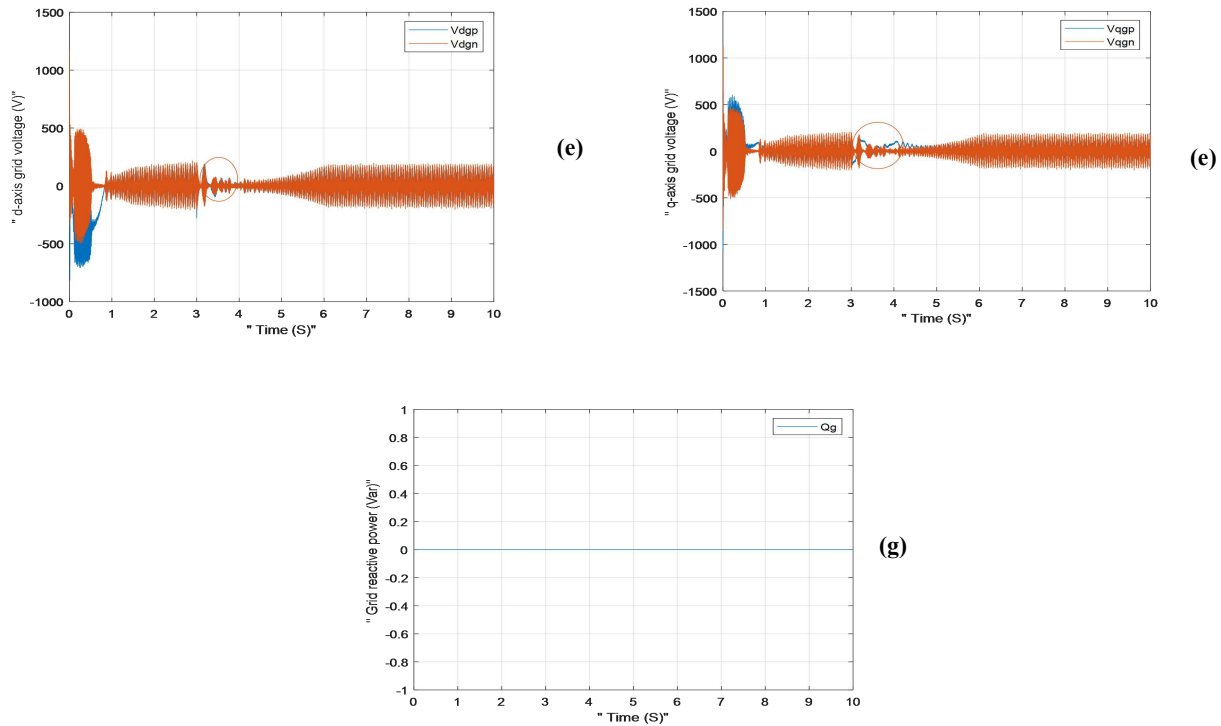


Figure.5.31. Résultats de simulation du CCR lors d'un creux de tension asymétrique avec protection Crowbar

Lorsque le circuit de protection est activé, comme le montre la figure 5.31.a, la tension du bus DC se comporte différemment dans les cas symétriques et asymétriques, comparé aux situations sans protection par Crowbar. Grâce à la protection Crowbar, la tension du bus continu est restée stable, et les oscillations et surtensions ont été largement atténuées, assurant ainsi une meilleure stabilité du CCR. Grâce à la protection implémentée, le bus DC continue de fonctionner autour de sa valeur de référence même pendant les creux de tension, avec une référence de $V_{bus} = 1150 \text{ V}$ pour le système proposé. Cette stabilité est bien illustrée dans la figure 5.31.a. L'un des avantages majeurs du système proposé, en particulier lorsqu'il est couplé avec le contrôleur FLC, est que la GADA avec FLC atteint la référence de V_{bus} plus rapidement que sans FLC. Pendant les creux de tension asymétriques, V_{bus} suit parfaitement sa référence lorsque le FLC est utilisé. En revanche, dans le cas sans FLC, la fluctuation de la tension du bus DC est plus importante, comme l'illustrent les figures 5.28.a et 5.30.a. Le dépassement de V_{bus} , avec FLC est également plus faible après un creux de tension asymétrique, soulignant la meilleure régulation offerte par le FLC (figure.5.29). Les résultats de simulation montrent que la GADA avec FLC est plus efficace en termes de stabilité de V_{bus} , lors d'un creux de tension asymétrique. De plus, comme le montrent les figures 5.31.c, 5.31.d, 5.31.e, 5.31.f, les grandeurs V_{d_gp} , V_{q_gp} , I_{d_gp} , I_{q_gp} restent proches de leur référence même pendant la chute asymétrique de tension, grâce à l'activation du circuit de protection par Crowbar contrôlé par la logique floue. Enfin, la figure 5.31.g met en évidence un autre aspect positif : la puissance réactive reste nulle pendant le creux de tension, ce qui suggère que le système fonctionne comme s'il était sans défauts, renforçant ainsi l'efficacité et la robustesse du système de protection par Crowbar avec la logique floue dans ce contexte.

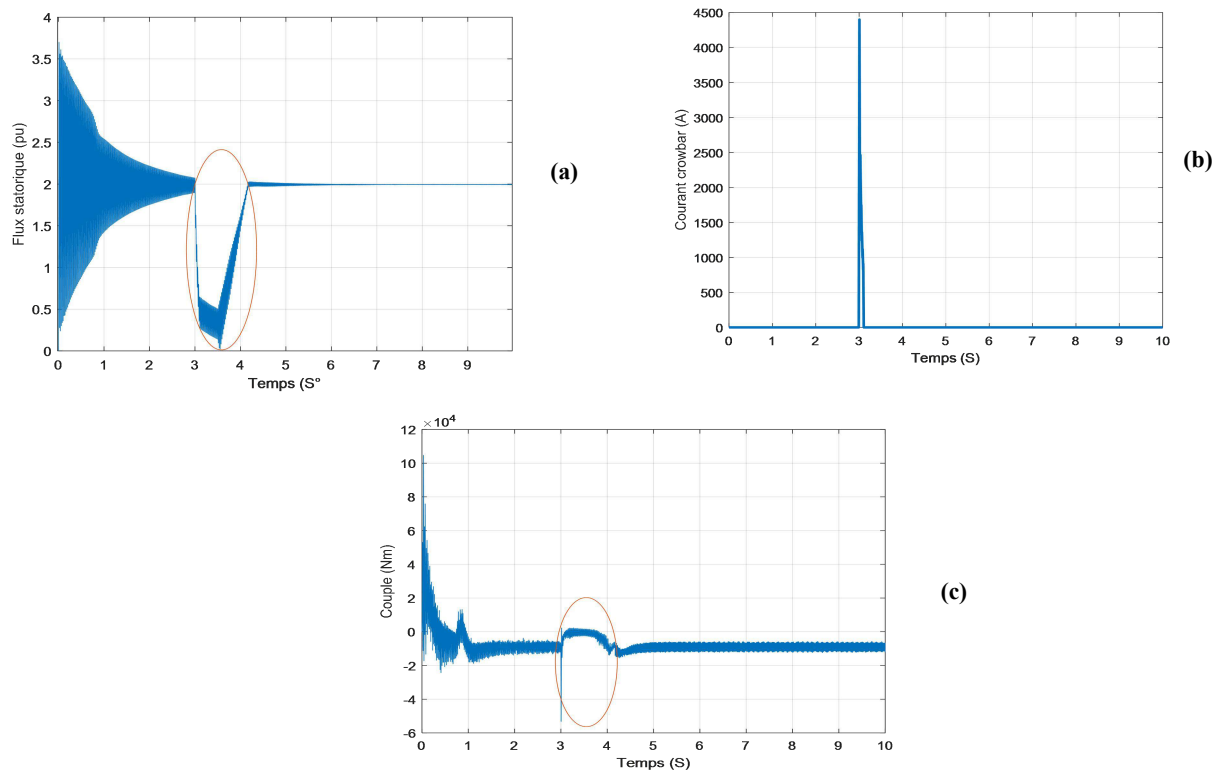


Figure.5.32. Résultats de simulation de l'analyse de défaut lors d'un creux de tension asymétrique avec protection Crowbar

La figure 5.32.b illustre la détection du courant de défaut par la protection Crowbar, ce qui permet de garantir la sécurité et la stabilité du système en cas de perturbation. Cependant, comme le montrent les Figures 5.32.a et 5.32.c, la perturbation du couple reste très légère et la réduction du flux magnétique statorique est faible, ce qui indique que le système conserve une performance stable même sous conditions de défaut. L'objectif principal de cette protection Crowbar est de garantir que le système reste contrôlable même pendant les creux de tension et d'éliminer le besoin de puissance réactive. En activant la protection, les enroulements du rotor, les condensateurs et les convertisseurs sont protégés contre les surintensités pendant ces périodes de chute de tension. Cette approche assure que le système ne subit pas de dommages tout en maintenant son fonctionnement. Grâce au FLC, la méthode proposée donne des résultats plus fiables et appropriés comparativement au système GADA sans FLC.

L'intégration de la protection Crowbar améliore de manière significative le comportement du système en cas de défaut, comme le montrent les résultats de simulation et l'analyse du comportement du système. Le Crowbar contrôle efficacement les perturbations et prévient les risques liés aux défaillances du système, tout en garantissant que les performances restent optimales malgré les défauts. Ces résultats soulignent l'efficacité de la protection Crowbar pour maintenir la stabilité et la sécurité du SCEE en cas de creux de tension asymétriques, permettant ainsi à la machine de supporter les défauts du réseau sans subir de dommages importants.

5.9. Conclusion

La connexion de toute machine électrique au réseau est suivie d'une perturbation ou de creux de tension. L'analyse du comportement de la GADA de 2MW sous les conditions critiques des creux de tension de réseau de formes symétrique et asymétrique a été l'objectif de ce chapitre. Ce chapitre présente une stratégie passive de LVRT pour une éolienne à vitesse variable utilisant une GADA. Elle repose sur l'ajout d'une résistance Crowbar parallèle au rotor afin de stabiliser le système en cas de chute de tension triphasée. Cette méthode permet de limiter les surtensions et les courants rotoriques, en augmentant la tension statorique et en réduisant les pics de flux. Les simulations confirment l'efficacité de cette stratégie, en atténuant les oscillations du couple électromagnétique et les surtensions du bus DC, tout en assurant la conformité aux exigences du Grid Code.

Conclusion Générale

Les problématiques abordées dans cette thèse ont conduit à une analyse approfondie de la machine asynchrone à double alimentation (GADA) utilisée dans les systèmes éoliens. L'accent a été mis sur les aspects liés à son contrôle, son diagnostic et l'amélioration de la qualité de la puissance générée. L'objectif principal a été d'optimiser l'extraction de l'énergie tout en minimisant les contraintes dynamiques au sein du train de puissance, en tenant compte des perturbations tant internes qu'externes. Cette thèse s'articule autour de deux grands axes relatifs aux systèmes de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, à savoir l'évaluation des différentes configurations d'éoliennes ainsi que des stratégies de commande visant à réguler les puissances active et réactive de la GADA et le diagnostic des systèmes éoliens se concentre sur les chutes de tension tant équilibrées et déséquilibrées. L'objectif est de renforcer les systèmes de commande et de protection des éoliennes, d'améliorer leur stabilité et d'assurer la continuité de la production en cas de perturbation du réseau, tout en respectant les exigences du Code-Grid.

L'objectif principal de cette thèse a été d'analyser et d'optimiser les systèmes de production d'énergie éolienne, en mettant particulièrement l'accent sur ceux utilisant des générateurs à courant alternatif à double alimentation (GADA), dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie produite tout en minimisant les contraintes dynamiques du train de puissance. Pour ce faire, un large éventail d'approches théoriques et pratiques a été exploré, visant à maximiser l'extraction de l'énergie éolienne, notamment en réponse aux perturbations affectant le réseau électrique. Dans un premier temps, cette étude a consisté à se connaître à l'état de l'air l'énergie éolienne, en analysant les tendances récentes concernant la production d'électricité éolienne, tant à l'échelle mondiale qu'en Algérie, ainsi que les différents types de turbines utilisées dans ce secteur. Cette analyse a permis de mettre en évidence les diverses technologies des turbines, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs avantages et inconvénients, est également défis liés à leur intégration dans le réseau électrique. Les statistiques récentes sur la production mondiale d'énergie éolienne ont permis d'accentuer l'importance croissante de cette source d'énergie renouvelable, notamment en raison de sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à répondre à la demande énergétique croissante, tout en respectant les exigences réglementaires en vigueur. Une étape essentielle de cette étude a consisté en la modélisation du système global de conversion d'énergie éolienne. Ce modèle a intégré une GADA, associée à une turbine, dans le but de maximiser la capture de la puissance éolienne, tout en ajustant la vitesse du rotor afin d'optimiser le rendement énergétique. L'intégration de cette machine avec un redresseur et un onduleur a permis de réguler la puissance transmise au réseau, garantissant ainsi une gestion optimale de l'énergie. Cette configuration a conduit à une meilleure régulation de la puissance active et réactive, éléments essentiels pour maintenir un facteur de puissance optimal et minimiser les pertes énergétiques. Les techniques de commande mises en œuvre ont démontré une performance efficiente du système, permettant un contrôle précis de la production d'énergie,

avec une attention particulière portée à l'optimisation de la réponse dynamique du système face aux variations des conditions de vent.

En ce qui concerne la commande du système, plusieurs stratégies ont été mises en œuvre afin d'optimiser l'extraction de l'énergie, notamment à travers l'utilisation de la commande par suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cette commande a permis d'ajuster le couple de référence de la génératrice, dans le but de maximiser la puissance active extraite. Des contrôleurs avancés ont été mobilisés pour atteindre cet objectif, incluant des contrôleurs classiques tels que le PI, ainsi que des techniques de commande plus élaborées telles que la commande par mode glissant, la commande backstepping et la commande floue. Ces différentes commandes ont permis d'évaluer les performances et d'identifier les stratégies les plus efficaces pour garantir un rendement énergétique optimal. Les résultats ont révélé que la commande floue offrait de meilleures performances en termes de stabilité et de réponse dynamique, par rapport aux autres approches.

De plus, une attention particulière a été accordée à l'analyse des défauts susceptibles de survenir dans le système éolien, en particulier les creux de tension. Ces défauts peuvent avoir des répercussions significatives sur la stabilité du réseau et compromettre la continuité de la production d'énergie. L'étude s'est penchée sur l'impact des creux de tension, qu'ils soient symétriques ou asymétriques, sur le comportement dynamique de la GADA. L'effet de ces défauts a été examiné en termes de leur effet sur la stabilité du contrôle de la machine, grâce à des simulations comparant l'état normal et l'état défectueux du système. Ce diagnostic a permis de formuler des stratégies de protection efficaces visant à limiter les effets indésirables de ces perturbations sur le système éolien. Les solutions proposées qui reposent sur des protections matérielles passives ont montré une efficacité satisfaisante face à différentes amplitudes de creux de tension, contribuant ainsi à une meilleure résilience du système face aux perturbations du réseau. Dans l'ensemble, les travaux réalisés ont permis d'améliorer la gestion et la fiabilité du fonctionnement du parc éolien, notamment en réponse aux perturbations du réseau. Ce projet a également renforcé les capacités de protection des éoliennes utilisant la GADA. Les résultats obtenus contribuent à réduire les impacts négatifs des perturbations sur le réseau électrique, tout en garantissant une production continue et stable.

Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nombreuses perspectives de recherche en vue d'améliorer le fonctionnement global du système éolien. À cet égard, il serait judicieux de :

- Mettre en œuvre de manière expérimentale les techniques de protection pour une éolienne basée sur la GADA et procéder à une comparaison des limites des différentes approches ;
- Explorer l'utilisation de l'intelligence artificielle, notamment des réseaux de neurones, pour la commande de la GADA ;
- Étudier la pertinence des techniques de protection de la GADA en fonction des divers codes de réseau et de la capacité LVRT ;
- Vérifier la protection de la GADA face à tous les types de perturbations potentielles du réseau et proposer des solutions appropriées ;

- Examiner le rôle des réseaux électriques intelligents dans l'amélioration de l'intégration des parcs éoliens au sein du réseau.

Ces travaux pourraient favoriser l'amélioration de la résilience des parcs éoliens face aux perturbations du réseau haute tension, tout en optimisant leur performance globale.

Annexe

Paramètres de la Turbine

Tableau 1 : Paramètres de la turbine

Nom	Valeur	Unité
Puissance nominale	7,8	kW
Densité de l'air	1,225	kg/m ³
Angle de calage (Pitch Angle)	2	°
Nombre de pales	3	
Rayon des pales	3	m
Gain du multiplicateur	5,4	
Moment d'inertie	0,042	kg·m ²
Coefficient de frottement visqueux	$6,73 \times 10^{-3}$	N.s/rad
Ratio de la vitesse	9.41	

Paramètres de la GADA

Tableau 2 : Paramètres de la GADA en régime permanent

Paramètre	Valeur	Unité
Fréquence statorique	50.0	Hz
Puissance statorique nominale	2000000.0	W
Tension statorique nominale	690.0	V
Vitesse de rotation nominale	1500.0	tr/min
Courant statorique nominal	1760.0	A
Couple électromagnétique nominal	12732.0	N·m
Nombre de paires de pôles	2.0	—
Rapport de spires stator/rotor	0.33	—
Tension rotorique nominale	2070.0	V
Glissement maximal	0.33	—
Tension rotorique ramenée au stator	690.0	V
Résistance statorique	0.0026	Ω

Inductance de fuite (stator et rotor)	8.7e-05	H
Inductance de magnétisation	0.0025	H
Résistance rotorique (référée stator)	0.0029	Ω
Inductance statorique	0.002587	H
Inductance rotorique	0.002587	H
Tension bus DC référée stator	976.31	V
Tension statorique (rms en $\alpha\beta$)	564.19	V
Pulsation statorique	314.16	rad/s
Coefficient de couplage (sigma)	0.0687	—

Paramètres de la commande MPPT

Tableau 3: Paramètres du Coefficient de puissance

Coefficient	Valeur
C_1	0.5
C_2	0.0167
C_3	3
C_4	0.00184
C_5	3

Tableau 4 : Paramètres de la commande MPPT

Gain proportionnel K_p	200
Gain proportionnel K_i	250
Coefficient du régulateur par mode glissant K	1000
Coefficient du régulateur par backstepping K_1	$3 \cdot 10^3$
Coefficient du régulateur par logique floue G	50

Références

- [1] M. Taleb Ep Lachachi, "Contribution des énergies renouvelables dans le développement durable: cas de l'Algérie.," *Revue économique Al-Bashair*, 2022. cerist.dz
- [2] F. Fadila, "Potentiels et perspectives des énergies renouvelables en Algérie) Expériences de certains pays," *Revue Organisation&Travail*, 2022. cerist.dz
- [3] Y. Hita, "Etat de l'art sur l'énergie éolienne," 2023. ensta.edu.dz
- [4] N. Boulkadra and N. Lakhal, "Les Photovoltaïques: une Idée, une Réalisation et un Impact Economique en Algérie.," *Al Bashaer Economic Journal*, 2021. cerist.dz
- [5] Elgharib, A. O. A. (2022). Différentes stratégies de contrôle pour le système d'éolienne connecté PMSG (Doctoral dissertation, Aix-Marseille).
- [6] Smily, J., Radi, B., & Sossey-Alaoui, I. (2022). Analyse de fiabilité d'une pale d'éolienne. Published by ISTE Ltd. London, UK—opencscience. fr ISTE Open Science—2022.
- [7] Balde, A. E., Bah, A. L., Millimono, T. N., Diaby, I., & Kebe, C. M. F. (2023). Evaluation du potentiel éolien exploitable le long de la zone côtière guinéenne.
- [8] Poinssot, C., d'Hugues, P., Claret, F., & Dupuy, A. (2024). Le sous-sol, un acteur invisible et impensé de la transition énergétique. *La Revue de l'Énergie*, 674(5), 19-37.
- [9] Canuel, C. M., Thiffault, E., Locoh, A., & Thiffault, N. (2023). La bioénergie forestière pour lutter contre les changements climatiques: quelles implications dans la transition énergétique du Québec (Canada). *The Forestry Chronicle*, 99(1), 11-24.
- [10] Lamy, A. (2024). Processus éolien et son transport sédimentaire associé en condition de vent de terre sur le système dune-plage (Doctoral dissertation, Université de Perpignan).
- [11] Miossec, A. Des énergies fossiles aux énergies marines renouvelables, vers la territorialisation de l'océan. shs.cairn.info,
- [12] Rapport annuel de Global Wind Energy Council, fin 2022.
- [13] Guediri, A., Hettiri, M., & Guediri, A. (2023). Modeling of a wind power system using the genetic algorithm based on a doubly fed induction generator for the supply of power to the electrical grid. *Processes*, 11(3), 952.
- [14] Rapport annuel de Global Wind Energy Council, fin 2023.
- [15] Hamouchene, H. (2023). Colonialisme et accaparements «verts» en Afrique du Nord. In *Transition «verte» et métaux «critiques»* (pp. 133-142). Éditions Syllepse.
- [16] Bendib, Y., & Adjout, A. (2022). Le solaire photovoltaïque en Algérie: un vecteur énergétique compétitif et durable. *Sciences naturelles et mathématiques*, 8(1), 352-373
- [17] Hasni, T., Malek, R., & Zouiouche, N. (2021). L'Algérie 100% énergies renouvelables. Friedrich-Ebert-Stiftung.
- [18] Chabot, B. (1997). La contribution potentielle des énergies renouvelables au développement durable.
- [19] Wassila Iguergazix Dahmoun Energies renouvelables: l'un des pivots du développement durable en Algérie. [\[PDF\] à partir de ekb.eg](#)
- [20] Belkadi, G. (2024). Les facteurs contraignants l'algérie dans son parcours de transition énergétique: cas de l'énergie solaire et éolienne. *Revue des reformes Economique et intégration dans l'économie mondiale*, 18(1), 31-48.
- [21] Hallal, A. (2021). La sécurité énergétique en Méditerranée: défis et enjeux. *Sciences naturelles et mathématique*, 6(1), 602-618.
- [22] Zerhouni, F. Z., Zerhouni, M. H. H., & Zegrar, M. (2021). Systèmes Energétiques Autonomes.

- [23] Vilanculos, R. A., & Mubiala, S. (2022). Etude et simulation de la commande vectorielle d'une MADA dédiée à un système aérogénérateur (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun Tiaret).
- [24] Mekkaoui, N. (2018). "Contribution à la Maîtrise et au Contrôle des Transferts de Puissances d'un Aérogénérateur à base d'une Machine à Induction" (Thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Option : Energies Renouvelables), Université de Batna 2.
- [25] Soued, S. 2019. "The DFIG Based Wind Farms and Their Impact on Electrical Power Systems", (Thèse de Doctorat de Génie électrique), Université de Technologie de Belfort Montbéliard, Belfort.
- [26] Bouchiba, N. 2018. "Intégration du générateur à double alimentation dans un réseau isolé à énergie éolienne", (Thèse de doctorat en Génie Electrique), École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie.
- [27] Dutilleux, P. "Effets météorologiques sur le bruit éolien aux points d'immission-Méthodes pratiques de caractérisation du milieu de propagation," 16ème Congrès Français d'Acoustique, . hal.science
- [28] BOUALEM, S. "Optimisation d'un micro réseau intelligent vert eolienne/pv/batteries/groupe electrogene connecté au réseau," 2023. univ-biskra.dz
- [29] N. Arrak, A. Ghram, and D. Ouerchefani, "Étude de la dynamique des accumulations éoliennes dans une région aride du Sud est tunisien : cas du bassin versant d'oued Bouhamed (Jeffara septentrionale)," Revue Marocaine de ..., 2021. hal.science
- [30] Sobhy, A., Elfar, M. H., Refaat, A., & Fawzi, M. (2025). Performance Evaluation of an Optimized Simplified Nonlinear Active Disturbance Rejection Controller for Rotor Current Control of DFIG-Based Wind Energy System. Cleaner Engineering and Technology, 100896.
- [31] Toumi, I. (2023). Contribution à l'amélioration de performance d'une chaîne énergétique hybride (éolienne/photovoltaïque) basée sur des techniques d'intelligence artificielle (Doctorat dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [32] Gallas, H. (2021). Contribution à la Commande d'un Générateur de type Synchrones à Double Excitation dans le cas d'une Application Éolienne et Comparaison avec d'autres Architectures (Doctoral dissertation, CY Cergy Paris Université ; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax).
- [33] Bendjeddou,., Abdessamed, R., & Merabet, E. (2021). commande a flux virtuel oriente de la generatrice asynchrone a cage double étoile. électrotechnique et électroénergétique, 66(5), 71-76.
- [34] Lounnas, F. (2021). Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double stator (Doctoral dissertation, universite mouloud mammeri Tizi-ouzou).
- [35] Mohammed, O. M. E., Liu, Y., Xu, W., & Zhao, Y. (2024). Overview of Control Strategies for Improving Power Quality of Brushless Doubly-fed Generators. IEEE Transactions on Power Electronics.
- [36] Ehsani, M., Oraee, A., Abdi, B., Behnamgol, V., & Hakimi, M. (2024). Adaptive dynamic sliding mode controller based on extended state observer for brushless doubly fed induction generator. International Journal of Dynamics and Control, 1-14.
- [37] KHELOUD, A., & RABIA, H. (2024). Optimisation par l'algorithme génétique (AG) du contrôle de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA) à l'aide de régulateurs PI (Doctorat dissertation, université Ibn khaldoun-tiaret).
- [38] Tamvada, K., & Babu, R. (2022). Control of doubly fed induction generator for power quality improvement: an overview. International Journal Of Systems Assurance Engineering And Management, 13(6), 2809-2832. <https://doi.org/10.1007/s13198-022-01754-7>
- [39] <http://leseoliennes.e-monsite.com/pages/les-eoliennes.terrestre/fonctionnement.html>.

- [40] A. Benamor, "Contribution à la Modélisation, à la Commande et au Contrôle des Systèmes de Production de l'Energie Électrique Renouvelable", Thèse de Doctorat en Sciences en Génie Electrique : Université Mohamed Khider de Biskra, 18/11/ 2019.
- [41] H. Bilal, "Diagnostic des systèmes de production de l'énergie Hybride Générateur/Mode moteur," 2022. [hal.science](#)
- [42] Kiyyour, B. (2020). Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [43] A. Bonfils, "La gestion des risques dans les contrats internationaux d'énergies marines renouvelables : exemple de l'éolien en mer," 2022. [hal.science](#)
- [44] A. A. ESSERIR Abdennour, "La conception CAO d'une éolienne et l'étude du comportement mécanique de sa tour en présence de défauts," 2021. [univ-km.dz](#)
- [45] R. Bendjaida and A. F. Benallal, "Contrôle et Diagnostic des convertisseurs AC/DC à deux et trois niveaux dans une chaîne éolienne basée sur une GSAP," 2023. [univ-tiaret.dz](#)
- [46] Boutitel, Khodir Modélisation et commande d'un système éolien basé sur une GADA université Ghardaia 2023
- [47] Yang, R. H., & Jin, J. X. (2020). Unified power quality conditioner with advanced dual control for performance improvement of DFIG-based wind farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 116-126.
- [48] Herizi, A. (2021). Amélioration des performances de la commande non linéaire robuste d'un moteur asynchrone à double alimentation (MADA) (Doctoral dissertation, Université de M'Sila-Mohamed Boudiaf).
- [49] M. A. Mahboub, S. Drid, M. A. Sid and R. Cheikh, "Sliding mode control of grid connected brushless doubly fed induction generator driven by wind turbine in variable speed", *Int J SystAssurEngManag*, 8, 2017, pp: 788-798.
- [50] BENAKCHA, M. (2019). Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE' (Doctoral dissertation, These de doctorat, Spécialité Génie Electrique, Université de M'sila).
- [51] M. M. Guero, "Modélisation théorique et expérimentation d'un système éolien à accélérateur de flux de vent," 2023. [hal.science](#)
- [52] Chebel AHLEM, « Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion éolienne couplée à un réseau électrique » (These de doctorat, Spécialité Electromécanique, Université BADJI MOKHTAR. 2022.
- [53] Marouf, M. (2023). Commande vectorielle d'une machine Asynchrone à double alimentation (Doctoral dissertation).
- [54] Abdelkader, M. I., Abdelsalam, A. K., & Hossameldin, A. A. (2020). Indirect vector-controlled brushless doubly-fed twin-stator induction generator for wind energy conversion application. *Energies*, 13(16), 4174.
- [55] Rajendran, M., & Kumar, L. A. (2020). Modeling and Simulation of a DFIG-Based Wind Energy System. Dans *Lecture notes in electrical engineering* (p. 31-49). https://doi.org/10.1007/978-981-15-7245-6_4
- [56] Guo, Q. (2024). Stratégies de contrôle pour un microréseau DC basé sur la génératrice à réluctance variable (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay (2020-2024).
- [57] Bada, M. L., & Bougoffa, M. Commande vectorielle direct du mil alimente par un onduleur MLI (Doctoral dissertation, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA).

- [58] Shekhar, A., Ramirez-Elizondo, L., Feng, X., Kontos, E., & Bauer, P. (2017). Reconfigurable DC Links for Restructuring Existing Medium Voltage AC Distribution Grids. *Electric Power Components And Systems*, 45(16), 1739-1746. <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1346005>
- [59] Shekhar, A., Ramirez-Elizondo, L., Soeiro, T. B., & Bauer, P. (2019). Boundaries of operation for refurbished parallel AC–DC reconfigurable links in distribution grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(2), 549-559.
- [60] Othman, S. (2021). Modélisation et Commande à base d'une représentation par Réseau de Pétri d'un Filtre Actif Parallèle avec un Onduleur Multicellulaire Série (Doctoral dissertation, CY Cergy Paris Université; École nationale d'ingénieurs de Gabès (Tunisie).
- [61] F. Amrane, "Contribution à la Commande d'un Système de Conversion Eolien à base de la Génératrice Double Alimentée", Thèse de doctorat en science, Option Commande Electrique, Université Ferhat Abbas Setif 1, 13/05/2018
- [62] Z. Boudjema, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) »; These de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabes, Sidi Bel-Abbes, Algerie, Février 2015.
- [63] 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
- [64] W. T. BELHARAZEM and I. BENDEDDOUCHE, "Etude, Modélisation et commande robuste d'une éolienne," 2023. essa-tlemcen.dz
- [65] S. BOUALEM, "Optimisation d'un micro réseau intelligent vert EOLIENNE/PV/BATTERIES/GROUPE ELECTROGENE connecté au réseau," 2023. univ-biskra.dz
- [66] Bekiroglu, E., & Yazar, M. D. (2022). MPPT Control of grid Connected DFIG at Variable Wind Speed. *Energies*, 15(9), 3146. <https://doi.org/10.3390/en15093146>
- [67] Hallouz, M., Kabeche, N., Moulahoum, S., & Kechidi, Z. (2023). Experimental investigation of DFIG-based wind energy conversion system using fuzzy logic control. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 67(3), 260-267.
- [68] M. Chakib, A. Essadki and T. Nasser, "A Comparative Study of PI, RST and ADRC Control Strategies of a Doubly Fed Induction Generator Based Wind Energy Conversion System", *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(2), 2018, pp: 964-973.
- [69] A. Bakouri, H. Mahmoudi and A. Abbou, "Modeling and Optimal Control of the Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine System Connected to Utility Grid", *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, IEEE, 2016.
- [70] SLIMANE, W. (2021). : Modélisation et Commande d'une GADA Destinée à la Production de l'Energie Electrique dans une Chaine Eolienne (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [71] ABDI YONIS, S., Yusupov, Z., Habbal, A., & Toirov, O. (2023). Control approach of a grid connected DFIG based wind turbine using MPPT and PI controller. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 21(3), 157-170.
- [72] Bouguerra, Z. (2023). Comparative study between PI, FLC, SMC and Fuzzy sliding mode controllers of DFIG wind turbine. *Journal of Renewable Energies*, 26(2), 209-223.
- [73] Saihi, L., Ferroudji, F., Berbaoui, B., Koussa, K., Roummani, K., & Bakou, Y. (2022). Sliding mode fuzzy MPPT controller of a wind turbine system based on DFIG. In *Artificial Intelligence and Heuristics*

for Smart Energy Efficiency in Smart Cities: Case Study: Tipasa, Algeria (pp. 604-612). Springer International Publishing.

[98] Soomro, M. A., Memon, Z. A., Kumar, M., & Baloch, M. H. (2021). Wind energy integration: Dynamic modeling and control of DFIG based on super twisting fractional order terminal sliding mode controller. *Energy Reports*, 7, 6031-6043.

[74] GASMI, H. (2023). Contribution à l'amélioration de la commande des chaînes de conversion éoliennes (Doctoral dissertation).

[75] Leulmi Rayane, Lekhchine Salima, Medoued Ammar, « Control power of wind power system with SMC” the 4th International Conference on Electromechanical Engineering (ICEE2022) on December 13-14, 2022 at the university of Skikda, Algeria.

[76] Echiheb, F., Ihedrane, Y., Bossoufi, B., Bouderbala, M., Motahhir, S., Masud, M., ... & ElGhamrasni, M. (2022). Robust sliding-backstepping mode control of a wind system based on the DFIG generator. *Scientific reports*, 12(1), 11782.

[77] Benbouhenni, H., Gasmi, H., & Colak, I. (2022). Backstepping control for multi-rotor wind power systems. *Majlesi Journal of Energy Management*, 11(4), 8-15.

[78] Echiheb, F., Elkafazi, I., Bossoufi, B., Almalki, M. M., & Alghamdi, T. A. (2024). Nonlinear robust sliding mode-Backstepping hybrid control for WECS-theoretical design and experimental evaluation. *Heliyon*, 10(11).

[79] Leulmi Rayane, Medoued Ammar, Lekhchine Salima, “Backstepping control of active and reactive power in doubly fed induction generator wind turbine system” the 3 International Conference on Electronics and Engineering (IC3E’2022), on December 05-06, 2022 at the university of Bouira, Algeria.

[80] SAIDI, A. (2021). Contribution à la Commande hybride: Mode glissant-floue de la machine à induction double alimentée (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

[81] Yessef, M., Bossoufi, B., Taoussi, M., Lagrioui, A., & Chojaa, H. (2022). Overview of control strategies for wind turbines: ANNC, FLC, SMC, BSC, and PI controllers. *Wind Engineering*, 46(6), 1820-1837.

[82] Rouabah, B. (2021). Contribution à l'amélioration des performances d'un filtre actif parallèle de puissance par l'utilisation d'un convertisseur multicellulaire (Doctoral dissertation).

[83] Mahmoudi, S. M., Maleki, A., & Ochbelagh, D. R. (2021). Optimization of a hybrid energy system with/without considering back-up system by a new technique based on fuzzy logic controller. *Energy Conversion and Management*, 229, 113723.

[84] SLIMANE, W. (2021). : Modélisation et Commande d'une GADA Destinée à la Production de l'Energie Electrique dans une Chaîne Eolienne (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).

[85] HAOUARI, B. (2024). Étude et commande par logique floue d'un actionneur électrique alimenté par un onduleur multi niveau en mode dégradé (Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).

[86] Hemeyine, A. V., Abbou, A., Bakouri, A., Mokhlis, M., & El Moustapha, S. M. O. M. (2021). A robust interval Type-2 fuzzy logic controller for variable speed wind turbines based on a doubly fed induction generator. *Inventions*, 6(2), 21.

[87] Leulmi, R., Lekhchine, S., Medoued, A. (2024). A New Approach for Steady-State Calculations and Control of Doubly-Fed Induction Generator Performance Based on the Wind Turbine. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering (IJISAE)* Vol. 12 No. 4 (2024)

- [88] Hossain, M.E. A. 2017. new approach for transient stability improvement of a grid-connected doubly fed induction generator-based wind generator. *Wind Eng.*, 41, 245–259
- [89] Gianto R.2021. Steady-state model of DFIG-based wind power plant for load flow analysis. *Iet Renewable Power Generation*, 15(8):1724-1735.
- [90] H, Hassantaghi, M, Rahimi., 2021. Control and stability analysis of dc microgrid system including wind and solar generation sources and grid-connected voltage source converter. *International Journal of Circuit*. Wiley Online Library
- [91] Aljafari, B., Stephenraj, J.P., & Indragandhi, V. 2022. Steady State Modeling and Performance Analysis of a Wind Turbine Based Doubly
- [92] Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski, Kamal Al-Haddad. *powerelectronics forrenewable energysystems, transportationand industrial applications*. Wiley Online Library
- [93] Chergui, H., 2020. Commande Directe Du Couple d'un Moteur Asynchrone avec la Reconstitution de l'Algorithme Des Commutations par la Logique Floue. *dspace.univ-temouchent.edu.dz*
- [94] Kumar, B., Sandhu, K.,S Sharma R. 2021. Comparative analysis of control schemes for dfig-based wind energy system. *Journal of The Institution of Engineers*.
- [95] Cheng, T; Wu, J; & Wang, H. 2023. Dynamic optimization of rotor-side PI controller parameters for doubly-fed wind turbines based on improved recurrent neural networks under wind speed fluctuations. *IEEE Access*, 11, 102713 102726.
- [96] Kheloud, A., & Rabia, H. (2024). Optimisation par l'algorithme génétique (AG) du contrôle de la génératrice asynchrone double alimentation (GADA) à l'aide de régulateurs PI (Doctoral dissertation, université ibn khaldoun-tiaret).
- [97] Dbaghi, Y., Farhat, S., Mediouni, M., Essakhi, H., & Elmoudden, A. (2021). Indirect power control of DFIG based on wind turbine operating in MPPT using backstepping approach. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 11(3), 1951.
- [98] Soomro, M. A., Memon, Z. A., Kumar, M., & Baloch, M. H. (2021). Wind energy integration: Dynamic modeling and control of DFIG based on super twisting fractional order terminal sliding mode controller. *Energy Reports*, 7, 6031-6043.
- [99] Abbas, N. E. (2022). Etude comparative de la commande vectorielle directe et indirecte. Doctoral dissertation.
- [100] Benbouhenni, H., Zellouma, D., Bizon, N., & Colak, I. (2023). A new PI (1+ PI) controller to mitigate power ripples of a variable-speed dual-rotor wind power system using direct power control. *Energy Reports*, 10, 3580-3598.
- [101] Mousavi, Y., Bevan, G., Kucukdemiral, I. B., & Fekih, A. (2022). Sliding mode control of wind energy conversion systems: Trends and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112734.
- [102] Messaoud, F. Z., Tédjini, H., Ouamri, B., Abasi, M., & Zerek, A. R. (2021, May). Decoupled SMC of DFIG Based Multi-Level Inverter. In *2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI-STA* (pp. 1-6). IEEE..
- [103] Zeghdi, Z., Barazane, L., Bekakra, Y., & Larabi, A. (2022). Improved backstepping control of a DFIG based wind energy conversion system using ant lion optimizer algorithm. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 66(1), 43-59.
- [104] Zoukh, N., & RAS Ghanem, A. (2023). Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif parallèle dans un réseau électrique (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun).

- [105] Bey, H. (2023). Implémentation numérique de commandes avancées de systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie (Doctoral dissertation).
- [106] NIARE, M., DANIOKO, F., DANSOKO, M., & DOUMBIA, M. Amélioration de la qualité d'un réseau électrique par correction de déséquilibre de phases par la technique du filtrage actif.
- [107] Moumani, Y., Laafou, A. J., Ait Madi, A., & Boutssaid, R. (2024). An improved dual vector control for a doubly fed induction generator based wind turbine during asymmetrical voltage dips. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(5), 3757-3769.
- [108] Darambazar, G. (2024). Analyse des perturbations et des défauts dans les réseaux électriques avec des méthodes temps-fréquence et des techniques d'apprentissage machine (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse).
- [109] Cheng, T., Wu, J., Wang, H., & Zheng, H. (2023). Dynamic optimization of rotor-side PI controller parameters for doubly-fed wind turbines based on improved recurrent neural networks under wind speed fluctuations. *IEEE Access*, 11, 102713-102726.
- [110] Ali, M., Makki, E., Cazal, C., Ayadi, Y., & von der Brelie, B. S. (2021). Implementation of the Network Code on Requirements for Grid Connection of Generators. *Directorate-General for Energy, European Commission, Brussels, FGH GmbH*.
- [111] Lamy, C. (2022). *Étude de l'utilisation de réseaux de neurones artificiels pour des calculs de haute performance dédiés à la modélisation du transport de sources énergétiques* (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- [112] Loulijat, A. (2022). Impact des perturbations des réseaux haute tension sur la performance des éoliens: commande et observation.
- [113] Darambazar, G. (2024). Analyse des perturbations et des défauts dans les réseaux électriques avec des méthodes temps-fréquence et des techniques d'apprentissage machine (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse).
- [114] Simonetta, S. (2021). Il pensiero di John Fortescue: costituzione, legge e teoria della proprietà nell'Inghilterra del Quattrocento. Carocci editore.
- [115] Zaru, E. (2023). Il pensiero di John Fortescue. Costituzione, legge e teoria della proprietà nell'Inghilterra del Quattrocento. *Il Pensiero Politico*, 56(3), 364-365.
- [116] Fortescue, C. L. (1918). "Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks". *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 37(2), 1027-1140.
- [117] Yuan, L., Meng, K., Huang, ZY., Dong, W., and Zhang, W. 2020. Development of HVRT and LVRT control strategy for PMSG-based wind turbine generators. *Energies*.
- [118] Xian, L., Wu, L., Li, W., Wu, Y., & Xie, X. (2024). Enhancing FRT capability of DFIG based on RC-crowbar considering the resonance and matching control strategies for different fault degrees. *Electric Power Systems Research*, 232, 110434.
- [119] Döşoğlu, M. K. (2020b). Crowbar hardware design enhancement for fault ride through capability in doubly fed induction generator-based wind turbines. *ISA Transactions*, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.05.024>
- [120] Elnaggar, M. F. (2025). Optimal Controller Design of Crowbar System Using Class Topper Optimization: Towards Alleviating Wind-Driven DFIGs Under Nonstandard Voltages. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 5(1), 348-365.
- [121] En-Nay, Z., Moufid, I., El Makrini, A., & El Markhi, H. (2022). Improved crowbar protection technique for DFIG using fuzzy logic. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 13(3), 1779.

- [122] Bekiroğlu, E., & Yazar, M. D. (2023). Fault-Ride through Improvement of DFIG under Symmetrical/Asymmetrical Voltage Dips. *Electric Power Components And Systems*, 51(5), 510-523. <https://doi.org/10.1080/15325008.2023.2179135>
- [123] Thomas, T., Prince, A., Kumar, P., & Cheriyan, E. P. (2022). Real-time hardware emulation of WECS based on DFIG during unbalanced type_B and type-E voltage dips for enhanced low voltage ride-through. *Electrical Engineering*, 104(5),3717-3732.
- [124] Villanueva, I., Rosales, A., Ponce, P., & Molina, A. (2018). Grid Voltage-Oriented Sliding Mode Control for DFIG Under Balanced and Unbalanced Grid Faults. *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, 9(3), 1090-1098. <https://doi.org/10.1109/tste.2017.2769062>
- [125] Hamdan,I., Nourelddeen, O. 2021- An overview of control method with various crowbar techniques of wind turbines during power system faultsSVU-International Journal of Engineering.
- [126] Cheng, T; Wu, J; & Wang, H. 2023. Dynamic optimization of rotor-side PI controller parameters for doubly-fed wind turbines based on improved recurrent neural networks under wind speed fluctuations. *IEEE Access*, 11, 102713 102726.
- [127] Nair, R., & Narayanan, G. (2020). Stator Flux Based Model Reference Adaptive Observers for Sensorless Vector Control and Direct Voltage Control of Doubly-Fed Induction Generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1. <https://doi.org/10.1109/tia.2020.2988426>
- [128] Yonis, S. A., Yusupov, Z., Habbal, A., & Toirov, O. (2023). Control approach of a grid connected DFIG based wind turbine using MPPT and PI controller. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 21(3), 157-170.