



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhrad El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie Electrique

Electrotechnique

Réf :

جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة الكهربائية

المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de Doctorat 3ème Cycle en Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Intitulé de la thèse :

**Technique Avancées pour la Commande d'un Système de
Conversion Eolien**

Présentée par : Abdelhafid Guediri

Soutenue publiquement le 22/05/2023

Devant le jury composé de :

le nombre	Nom et Prénom	rang scientifique	l'Université	Adjectif
01	HETTIRI Messaoud	MCA	El Oued	Présidente
02	GUEDIRI Abdelkarim	MCA	El Oued	Encadreur
03	LAMOUCHE Zakaria	MCA	El Oued	Co-Encadreur
04	SRAIRI Kamel	Prof	Biskra	Examinateur
05	BENCHOUIA Mohammed Toufik	Prof	Biskra	Examinateur
06	ZELLOUMA Laid	Prof	El Oued	Examinateur
07	GUIA Talal	MCA	El Oued	Examinateur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{ يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ
دَرَجَاتٍ ۗ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ }

سورة المجادلة الآية 11

لكل بداية نهاية ولكل جهد طيب ثمرة طيبة
،جميل ان يضع الانسان هدفا في حياته
والأجمل ان يثمر هذا الهدف طموحا ،بعد
مشوار طويل من الكد والاجتهاد

إهداء

الحمد لله والصلاة والسلام على رسول الله محمد عليه افضل الصلاة
وازكى التسليم وعلى اله وصحبه اجمعين.

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات .

اللهم لك الحمد حتى ترضى.

ولك الحمد اذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا ولك الشكر كله .

الحمد لله حتى يبلغ الحمد منتهاه.

اهدي هذا العمل المتواضع :

الى والدي العزيز رحمه الله

الى والدتي العزيزة حفظها الله

الى زوجتي وابنائي الاعزاء حفظهم الله.....

الى اخوتي واخواتي الاعزاء

إلى أساتذتي المحترمين وأخص بالذكر

مؤطري الأستاذ الدكتور قديري عبد الكريم.....

إلى أصدقائي الأعزاء.....

واخيرا راجيا من الله عز وجل أن يجعلها صدقة جارية تنفع بها طلبة
العلم.

Dédicace

*Au nom de Dieu, et que la prière et la paix soient sur le Messager de Dieu,
que la prière et la paix de Dieu soient sur lui, ce qui suit :*

Je dédie cet humble travail :

A mon père, que Dieu lui fasse miséricorde

A ma chère mère, que Dieu la protège

À ma chère épouse et mes filles Chiraz et Maria

A mes frères et sœurs

A tous les amis et collègues

Merci beaucoup à tous.

Remerciements

Je remercie **Dieu -ALLAH-**Tout-Puissant de m'avoir accordé le succès dans ce travail et de m'avoir donné du courage, de la patience, de la force et une santé et un bien-être complets dans l'accomplissement de cette thèse tout au long de ces années. Je remercie vivement

Je tiens à exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur **GUEDIRI Abdel Karim**, professeur à l'Université d'El-Oued, pour ses conseils et son soutien, pour ses efforts dans la réalisation et la direction de ce travail, et pour sa compétence scientifique, qui a beaucoup profité. J'adresse également mes sincères remerciements au professeur **LAMOUCI Zakaria** professeur à l'Université d'El-Oued, pour son soutien, ses conseils et ses efforts tout au long de cette période.

J'ai le plaisir d'adresser mes sincères remerciements aux membres du jury :

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **HETTIRI Messaoud** Professeur à l'Université d'El-Oued , qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Je suis très reconnaissant aux membres du jury : Monsieur **SRAIRI Kamel** Professeur à l'Université de Biskra, Monsieur **BENCHOUIA Mohammed Toufik** Professeur à l'Université de Biskra, Monsieur **ZELLOUMA Laid** Professeur à l'Université d'El-Oued, Monsieur **GUIA Talal** professeur à l'Université d'El-Oued

Mes sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait acceptant de participer au jugement de ce travail.

Je tiens à remercier **Mes Parents** qui m'ont soutenu durant ce parcours en m'aidant et en priant pour ma réussite tout au long de mes études et leurs précieux conseils. Je voudrais également remercier l'honorable **Ma Femme** pour sa patience, se tenant à mes côtés et m'encourageant à terminer ce travail, sans oublier mes filles, **Chiraz** et **Maria**, que Dieu les protège et prenne soin d'elles.

A mes **Frères** et **Sœurs** et à tous mes **Collègues**, amis et **Etudiants**.

Je tiens à remercier toutes les **Personnes** qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce modeste travail.

Guedir Abdelhafid

Publications et Conférences Internationales

➤ **Type: Articles de Revues Internationales Spécialisées**

1. Guediri A. and Guediri A., “Study and Order of a Medium Power Wind Turbine Conversion Chain Connected to Medium Voltage Grid”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 7279–7282, Jun. 2021.
2. A. Guediri; A. Guediri; S. Touil. "Optimization Using a Genetic Algorithm Based on DFIG Power Supply for the Electrical Grid". *International Journal of Engineering*, vol. 35, no.1, pp.121-129, 2022.
3. A. Guediri, A. Guediri, and S. Touil, “Modeling and Comparison of Fuzzy-PI and Genetic Control Algorithms for Active and Reactive Power Flow between the Stator (DFIG) and the Grid”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 8640–8645, Jun. 2022.
4. Abdelhafid Guediri, Abdelkarim Guediri, Touil slimane, “Modeling and Comparison of Fuzzy-PI and Genetic Algorithm Regulators of Speed Control of DFIG for Supply of Power to the Electrical grid”, has been accepted in Processes (ISSN 2227-9717) on 23 September 2021.
5. Abdelhafid Guediri, Abdelkarim Guediri, Touil slimane, “Modeling And Adaptive Fuzzy Logic Control Of A Wind Power System Based On DFIG For Power Supply To Electrical Grid”, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, vol. 13, No. 3, pp. 882–894, Jun. 2022.

➤ **Type: Conférences Internationales**

1. Abdelhafid Guediri, Abdelkarim Guediri, Zakaria Lammouchi, “A Hybrid Intelligent Control of A Doubly Fed Asynchronous Generator in Wind Turbine”, *International Conference on Pluridisciplinary PhD Meeting (IPPM'20) 1st Edition*, February 23-26, 2020, El-Oued, Algeria.
2. Abdelhafid Guediri, Abdelkarim Guediri, “Active and Reactive Power Control PI-Fuzzy regulators of speed Control of DFIG for supply of power to the electrical grid”, *1st International Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA*.
3. Abdelhafid Guediri, Abdelkarim Guediri, “Optimization by PI- Fuzzy regulators of speed Control of DFIG for supply of power to the electrical grid”, *1st International*

Conference on Sustainable Energy and Advanced Materials IC-SEAM'21 April 21-22, 2021, Ouargla, ALGERIA.

4. Abdelhafid Guediri, Abdelkarim Guediri, "Modeling and genetic algorithm control of a wind energy system based on double-fed asynchronous machine for supply of power to the electrical grid", International Conference on Power and Energy Engineering (DZPOWER'21), 06-07 SEPT 2021, Online Conference ALGERIA.

➤ **Type: Revues internationales:**

Reviewer of the international journal ISA Transactions ELSEVIER (journal classA)

Since 2022

التقنيات المتقدمة للتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح

ملخص :

تتناول هذه الأطروحة النمذجة والتحكم المتين للمولد الهوائي اللا تزامني مزدوج التغذية (GADA) متصل مباشرة بالشبكة عن طريق الجزء الثابت ومدفوعاً بدواره بواسطة محولين ثابتين. الفكرة هي تنفيذ نظام تحكم منفصل عن GADA لضمان جودة أفضل للطاقة وجعل النظام غير حساس للاضطرابات. بعد نمذجة سلسلة تحويل طاقة الرياح الكاملة مع استغلال التحكم في تتبع أقصى نقطة للطاقة (MPPT)، كان نوعان من التحكم في النواقل موضوع تحليل للتحكم المستقل في القوة النشطة والمتفاعلة GADA مع المنظمين الكلاسيكيين للتناسب المتكامل (PI). من أجل ذلك اخترنا تقنية التحكم المنطقي الضبابي المطبقة على نظام تحويل طاقة الرياح متوسط الطاقة. هذه التقنية وجدت فعاليتها في تغيير بنية الأنظمة باستخدامها لقانون المراقبة غير الخطية والهدف من ذلك هو تطبيق هذه الاستراتيجية للتحكم في تبادل القدرة الفعالة و القدرة الرجعية للساكن بتغذية الدوار بواسطة محول ثنائي الاتجاه. نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها تظهر الاهتمام المتزايد من هذا التحكم في أنظمة الطاقة. ولأجل تحسين عملية تحديد وسائط هذين المنظمين استخدمنا تقنية الخوارزمية الجينية المهجنة مع إحدى الطرق البحث الموضوعي مما سهل عملية التصميم والبحث عن الوسائط مقارنة بطريقة المحاولات المحاكائية الاعتبائية من حيث تحديد حجم التجربة والخطأ.

الكلمات المفتاحية:

آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية (GADA)، طاقة الرياح، التحكم الشعاعي، محول MLI، المنظمات التقليدية (PI)، المنطق الضبابي، الخوارزمية الجينية، تتبع أقصى نقطة للطاقة (MPPT).

Technique Avancées pour la Commande d'un Système de Conversion Eolien

Résumé :

Cette thèse porte sur la modélisation robuste et le contrôle d'un générateur d'air asynchrone à double effet (GADA) connecté directement au réseau au moyen d'un stator et entraîné dans son rotor par deux transformateurs statoriques. L'idée est de mettre en place un système de contrôle séparé de GADA pour assurer une meilleure qualité de l'énergie et rendre le système insensible aux perturbations. Après avoir modélisé la chaîne complète de conversion de l'énergie éolienne avec exploitation du contrôle du point de puissance maximale (MPPT), deux types de contrôle vectoriel ont fait l'objet d'analyses pour le contrôle indépendant de la

puissance active et réactive GADA avec des régulateurs classiques proportionnels intégraux (PI). Par conséquent, nous choisissons la technique de commande par logique floue appliquée au système de conversion d'énergie éolienne de moyenne puissance. Cette technique a trouvé son efficacité dans la modification de la structure des systèmes en utilisant la loi de commande non linéaire. Le but est d'appliquer cette stratégie pour contrôler l'échange de puissance active et de puissance de retour stator en alimentant le rotor par un transformateur à deux voies. Les résultats de simulation numérique obtenus montrent l'intérêt croissant de cette commande dans les systèmes énergétiques. Afin d'améliorer le processus de détermination des modes de ces deux régulateurs, nous avons utilisé la technique de l'algorithme génétique hybride avec l'une des méthodes de recherche locale, ce qui a facilité la processus de conception et de recherche de médias par rapport à la méthode des tentatives de simulation arbitraires en termes de détermination de la taille des essais et des erreurs.

Mots clés :

machine asynchrone a double alimentation(GADA), énergie éolienne , commande vectorielle, convertisseur MLI , Proportionnel Intégral (PI) , logique floue , algorithme génétique , Suivi du point de puissance maximale (MPPT) .

Advanced Techniques for Controlling a Wind Power Conversion System

Abstract

This thesis deals with the robust modeling and control of a double-effect asynchronous air generator (GADA) connected directly to the network by means of a stator and driven in its rotor by two stator transformers. The idea is to set up a separate control system from GADA to ensure better power quality and make the system immune to disturbances. After modeling the complete chain of wind energy conversion with maximum power point control (MPPT) operation, two types of vector control were analyzed for independent control of active and reactive power GADA with conventional proportional-integral (PI) controllers. Therefore, we choose the fuzzy logic control technique applied to the medium-power wind energy conversion system. This technique has found its effectiveness in modifying the structure of systems using the nonlinear

control law. The goal is to apply this strategy to control the exchange of active power and stator feedback power by feeding the rotor by a two-way transformer. The numerical simulation results obtained show the growing interest of this control in energy systems. In order to improve the process of determining the modes of these two regulators, we used the hybrid genetic algorithm technique with one of the local search methods, which made the media design and search process easier than the method of arbitrary simulation attempts in terms of determining the size of trial and error.

Keywords :

Doubly-Fed Induction generator (DFIG), wind power , Vector control, converter MLI , Traditional Controller (PI) , fuzzy logic , genetic algorithm , Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Table des Matières

Table des Matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne

I.1 Introduction	4
I.2 Aperçu des systèmes de conversion de l'EE	4
I.2.1 Capacité éolienne installée	4
I.2.2 Aperçu général de la production d'EE.....	5
I.2.3 Évolution du SCEE en puissance	7
I.3 Développement de l'EE en Algérie	7
I.4 Avantages et inconvénients de l'EE.....	11
I.5 Aérogénérateur.....	12
I.5.1 Principe de fonctionnement.....	12
I.5.2 Constitutions d'un aérogénérateur.....	13
I.6 Prédiction optimale de l'énergie	14
I.6.1 Fonctionnant à vitesse fixe	14
I.6.2 Systèmes de génération EVV	15
I.7 Machines utilisées dans les systèmes éoliens	16
I.7.1 Eoliennes à vitesse variable commandées par le rotor.....	16
a. Structure à énergie rotorique dissipée.....	17
b. Structure de KRAMER.....	18
c. Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur.....	19
d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI.....	20
I.8 Configuration du mode de fonctionnement et stratégie de commande de la GADA.....	21
I.8.1 Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur	21
I.8.2 Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	22
I.8.3 Fonctionnement en génératrice	24

I.9 Conclusion	26
----------------------	----

Chapitre II : commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une GADA

II.1 Introduction.....	27
II.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	27
II.3 Description du système.....	27
II.4 Les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse variable	29
II.4.1 Avantages.....	29
II.4.2 Inconvénients.....	29
II.5 Modélisation de la turbine éolienne.....	29
II.5.1 Modèle du vent.....	30
II.5.2 Modèle aérodynamique.....	31
II.5.3 Modèle de la partie mécanique.....	33
II.6 Modes d'opération du système éolien à vitesse variable.....	35
II.6.1 Zone II : Extraction de la puissance maximale du vent (MPPT)	37
II.6.2 Zone III : Contrôle des variations du pas des pales (limitation de la vitesse et la puissance)	38
II.6.3 Contrôle avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI.....	39
II.6.4 Principes généraux d'une commande par la LF.....	39
II.6.4.1 Fuzzification.....	41
II.6.4.2 Base de connaissance.....	41
II.6.4.3 Inférence	41
II.6.4.4 Défuzzification.....	42
II.6.5 Avantages et inconvénients de la commande par la LF.....	42
II.6.6 Conception des régulateurs flous pour le réglage de la vitesse de rotation.....	43
II.7 Résultats simulation de la turbine en MATLAB/SIMULINK.....	44
II.8 Conclusion.....	47

Chapitre III : commande classique du système de conversion à base d'une GADA

III.1 Introduction.....	48
III.2 Modélisation de la GADA.....	48
III.3 Lois de la commande vectorielle appliquée à la GADA.....	50
III.4 Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique.....	50
III.5 Stratégie de commande en puissance active et réactive de la GADA.....	51
III.5.1. Objectif du contrôle des puissances et des courants.....	51
III.6 Convertisseur MLI.....	52
III.6.1 Onduleur a deux niveaux.....	52
III.6.2 Stratégie de commande à MLI.....	54
III.6.3 Algorithme de commande.....	55
III.7 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI).....	57
III.7.1 Calcul des régulateurs des courants rotoriques.....	57
III.7.2 Calcul des régulateurs des puissances.....	58
III.8 Commande par régulateur PI de la GADA.....	60
III.9 Résultats de simulations.....	62
III.10 Résultats pour un profil vent Aléatoire.....	65
III.11 Conclusion.....	67

Chapitre IV : Commande par la logique floue d'un système éolien a vitesse variable basé sur une GADA

IV.1 introduction.....	68
IV.2 Principe et Historique de la logique floue.....	68
IV.3 Contrôleur à base de la logique floue.....	69
IV.4 Notions de base de la logique floue.....	70
IV.4.1 Ensemble flou.....	70
IV.4.2 Fonction d'appartenance.....	70
IV.4.3 Variables linguistiques.....	70

IV.4.4	Operateurs de la logique floue.....	71
IV.4.5	Règles floues.....	71
IV.4.5.1	Linguistiquement	71
IV.4.5.2	Symboliquement	71
IV.4.5.3	Par matrice d'inférence	72
IV.5	Structure de base d'un contrôleur flou.....	72
IV.5.1	Commande par logique floue.....	72
IV.5.1.1	Fuzzification.....	73
IV.5.1.2	Règles d'inférence floue.....	74
IV.5.1.3	Defuzzification.....	75
IV.5.1.3.1	Régulateur de type de MAMDANI.....	75
IV.5.1.3.2	Synthèse du régulateur.....	76
IV.6	Loi de commande.....	77
IV.7	Réglage des courants rotoriques de la GADA.....	77
IV.8	Résultats et discussion.....	78
IV.9	Comparaison entre le régulateur PI et le régulateur PI-FLOUE.....	82
IV.10	Contrôle de logique floue adaptative.....	83
IV.11	Rotor actuel prédiction la prédiction	84
IV.12	Liens entre les modifications des paramètres PI et les performances souhaitées.....	84
IV.13	Description du mécanisme d'adaptation d'un régulateur classique par logique floue....	85
IV.14.	Résultats et discussion	86
IV.15.	Conclusion.....	89

Chapitre V : Amélioration les performances des commandes par l'algorithme génétique basé de GADA

V.1	Introduction.....	90
V.2	Définition d'un AG.....	91
V.3	Bref historique de l' AG.....	91
V.4	Principes généraux	92
V.5	Fonctionnement d'un AG.....	93
V.6	.Les outils évolutionnaires de base d'un AG.....	94
V.7	Opérateurs et paramètres de l' AG.....	94

V.7.1 Codage des chromosomes.....	95
V.7.2 Initialisation de la population	95
V.7.3 Fonction d'adaptation	95
V.7.4 Évaluation.....	96
V.7.5 Sélection	96
V.7.5.1 Sélection par la roulette	97
V.7.5.2 Sélection par ordonnancement	98
V.7.5.3 Sélection par tournoi	98
V.7.5.4 Sélection uniforme	98
V.7.6 Croisement	99
V.7.6.1 Croisement arithmétique (barycentrique)	99
V.7.7 Mutation uniforme.....	100
V.8. Description des AGs.....	100
V.9 Technique AG proposée pour la protection des parcs éoliens	104
V.9.1 Initialisation.....	104
V.10. Avantages et inconvénients des AG.....	104
V.10.1. Avantages.....	104
V.10.2. Inconvénients.....	105
V.11 Procédure d'optimisation pour les deux régulateurs	106
V.12 Optimisation du régulateur PI classique.....	106
V.13 Résultats de la simulation.....	107
V.14 Comparer les résultats de recherche avec des références graphiquement pertinentes.....	111
V.15 Comparaison de l' AG et du régulateur PI-Floue.....	113
V.16 Réglage des paramètres d'un AG.....	115
V.17 Conclusion.....	116
Conclusion générale et perspectives	117
Annexes.....	119
Références.....	124

***Table des figures et des
Tableaux***

Table des figures et des Tableaux

Figure I-1: Capacité mondiale d'EE.....	5
Figure I-2: Capacité de production d'EE et ajouts, 10 premiers pays, 2018	6
Figure I-3: Évolution de la taille des TEs (puissance nominale de sortie de la turbine, son diamètre et la hauteur du moyeu)	7
Figure .I-4: Phases du programme algérien des ERs.....	8
Figure. I-5: Carte des vents de l'Algérie à 10 m d'altitude (m/s).....	9
Figure. I-6 : Objectifs du programme Algérien des ERs.....	10
Figure I-7 : Principe de la CEE	13
Figure I-8 : Schéma descriptif d'un TE de grande puissance.....	13
Figure I-9: Eolienne a vitesse fixe.....	15
Figure I-10: Schéma de l'alimentation de la GADA pour une application génératrice.....	16
Figure I-11 : Eolienne à vitesse variable à base d'une GADA.....	17
Figure I-12: GADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée.....	18
Figure I-13: Structure de KRAMER pour la GADA.....	19
Figure I-14: Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur.....	19
Figure I-15: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.....	20
Figure I-16 : Schéma d'un système utilisant une GADA en moteur alimenté par un seul convertisseur.....	21
Figure I-17 : Schéma d'un système utilisant une GADA en moteur alimenté par deux convertisseurs.....	22
Figure I-18: Schéma d'un système utilisant une GADA en alternateur Alimenté par un seul convertisseur.....	24
Figure II-1: Configuration d'un système éolien contrôlé connecté au réseau.....	28
Figure II-2: Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent.....	28
Figure II-3: Schéma d'une turbine éolienne.....	30
Figure II-4: Profil de la vitesse du vent.....	31
Figure II-5 : Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ de la turbine de la puissance 1.5 MW	32
Figure II-6 : Partie mécanique de l'éolienne.....	33
Figure II-7: Modèle d'une turbine éolienne.....	34

Figure II-8: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne.....	34
Figure II-9 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	35
Figure II-10 : Variation de la puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique.....	36
Figure II-11: Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.....	36
Figure II-12: Stratégies de commande de la turbine.....	38
Figure II-13: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.....	39
Figure II-14 : Configuration de base d'un régulateur par LF.....	40
Figure II-15 : Régulation de la vitesse mécanique en boucle fermée à l'aide d'un contrôleur flou.....	43
Figure II-16: Fonctions d'appartenances utilisées pour RLF pour les deux boucles des courants. (a) Erreur, (b) Dérivée de l'erreur et (c) La commande.	43
Figure II-17: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.....	45
Figure II-18 : Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ et Vitesse spécifique λ avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI et flous.....	45
Figure II-19 : Vitesse mécanique Ω_m et Puissance mécanique avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI et flous. (a) Couple de la turbine, (b) Couple génératrice.....	46
Figure II-20 : Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation. (a) Vitesse mécanique de l'arbre, (b) Puissance mécanique, (c) Zoom de la Vitesse mécanique de l'arbre, (d) Zoom de la Puissance mécanique.....	46
Figure III-1: Principe de la commande vectorielle d'une GADA.....	50
Figure III-2: Orientation de la tension et du flux statorique	51
Figure III-3: Schéma du principe de la CV en Puissance de la GADA.....	52
Figure III-4: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux	52
Figure III-5: Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	53
Figure III-6 : Principe de la commande MLI.....	54
Figure III-7 : Principe de fonctionnement de la technologie PWM trigonométrique sinusoïdale à vecteur unique.....	55
Figure III-8: Tension composée à la sortie de l'onduleur	56
Figure III-9: Schéma fonctionnel du redresseur MLI de tension dans le référentiel tournant d $-q$	56
Figure III-10: Tension du bus DC.....	56
Figure III-11: Spectre d'harmoniques de contrôle de tension de bus DC.....	57

Figure III-12: Schéma fonctionnel de régulation du courant i_{dr}	58
Figure III-13 : schéma bloc de synthèse du PI de la puissance active.....	59
Figure III-14 : schéma bloc de synthèse du PI de la puissance réactive.....	60
Figure III-15 : Schéma global de la commande par regulateur PI de la GADA.....	61
Figure III-16: Schéma fonctionnel global du contrôle vectoriel de GADA.....	62
Figure III-17: puissance active statorique.....	63
Figure III-18 : puissance réactive statorique.....	63
Figure III-19 : Les courants directs et quadrature et rotoriques	63
Figure III-20 : Les courants directs quadrature statoriques.....	63
Figure III-21: Flux quadrature rotorique.....	63
Figure III-22 : Flux direct rotorique.....	63
Figure III-23 : Couple électromagnétique.....	64
Figure III-24: Le courant et la tension statoriques.....	64
Figure III-25: Courant triphasé rotoriques	64
Figure III-26: Courant triphasé statoriques.....	64
Figure III-27 : Vitesse mécanique.....	65
Figure III-28 : Couple électromagnétique.....	65
Figure III-29: Les courants rotorique.....	65
Figure III-30: La puissance active et réactive statorique.....	66
Figure III-31 : Le courant et la tension statoriques.....	66
Figure III-32: Zoom sur le courant et la tension statoriques.....	66
Figure III-33 : Les courants statorique et rotorique triphasés.....	66
Figure III-34 : Les courants statorique et rotorique avec zoom.....	67
Figure IV-1: a) Schéma synoptique d'un contrôleur flou et b) configuration d'un contrôleur flou.....	72
Figure IV-2: Méthodologie de la synthèse d'une commande floue.....	73
Figure IV-3: Forme de la fonction d'appartenance.....	74
Figure IV-4: Schéma bloc d'un contrôleur flou.....	76
Figure IV-5: Schéma fonctionnel des régulateurs de vitesse adaptatifs flous -PI DFIG pour l'alimentation du réseau électrique.....	78
Figure IV-6 : puissance active statorique	80
Figure IV-7 : puissance réactive statorique	80
Figure IV-8: Les courants directs et quadrature rotoriques.....	80

Figure IV-9 : Les courants direct et quadrature statoriques	80
Figure IV-10 : Flux direct rotorique	81
Figure IV-11: Flux quadrature rotorique	81
Figure IV-12: Couple électromagnétique	81
Figure IV-13: Le courant et la tension statoriques	81
Figure IV-14: Courant triphasé statoriques	81
Figure IV-15: Courant triphasé rotoriques	81
Figure IV-16: puissance active statorique	82
Figure IV-17: puissance réactive statorique	82
Figure IV-18: Les courants direct et quadrature rotoriques	83
Figure IV-19: Les courants direct et quadrature statoriques	83
Figure IV-20: Principe d'adaptation du PI par LF.....	86
Figure IV-21: puissance active statorique.....	87
Figure IV-22: puissance réactive statorique.....	87
Figure IV-23: Le courant quadrature rotorique.....	87
Figure IV-24: Le courant direct rotorique.....	87
Figure IV-25 : Les courant direct statorique	88
Figure IV-26 : Le courant quadrature statorique.....	88
Figure IV-27: Le courant et la tension statoriques.....	88
Figure IV-28: Zoom sur le courant et la tension statoriques.....	88
Figure IV-29: Courant triphasé rotoriques	88
Figure IV-30: Courant triphasé statoriques.....	88
Figure V-1: Cycle génétique.....	93
Figure V-2: Un exemple de sélection de roulette.....	97
Figure V-3 : Le croisement arithmétique.....	100
Figure V-4: Concepts de base d'un AG.....	101
Figure V-5: Organigramme pour l'approche de l'AG.....	103
Figure V-6: Principe d'optimisation par gradient génétique ou algorithme du simplexe.....	106
Figure V-7: Schéma fonctionnel global de la commande de l'AG basé sur GADA.....	108
Figure V-8: puissance active statorique	110
Figure V-9: puissance réactive statorique.....	110
Figure V-10: Les courants directs et quadrature rotoriques.....	110
Figure V-11: Les courants direct et quadrature statoriques	110

Figure V-12:Courant triphasé rotoriques110
Figure V-13: Courant triphasé statoriques110
Figure V-14:Couple électromagnétique111
Figure V-15: Le courant et la tension statoriques111
Figure V-16:puissance active statoriques111
Figure V-17: puissance réactive statoriques111
Figure V-18:Les courants directs et quadrature rotoriques112
Figure V-19: Les courants direct et quadrature statorique112
Figure V-20: puissance active statoriques114
Figure V-21:puissance réactive statorique114
Figure V-22: Le courant direct rotorique114
Figure V-23: Le courant quadrature rotorique.....114
Figure V-24: Le courant direct statorique115
Figure V-25: Le courant quadrature statorique115

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

Tableau. I.2: Objectifs du programme algérien des ERs pour 2030.....10

Tableau II-1 : Table de règles pour le RLF des courants rotoriques.....44

Tableau IV-1: Règles d'inférence pour ajuster les deux paramètres proportionnels et intégraux de PI.....75

Notations et Symboles

Notions et Symboles

Notations et Acronymes :

GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MAS	Machine Asynchrone
EVF	Eoliennes à Vitesse Fixe.
EVV	Eoliennes à Vitesse Variable.
EE	Energie Eolienne
MS	Machine Synchrone
CEE	Conversion d'Energie Eolienne.
TE	Turbine Eolienne.
ER	Energie Renouvelable
SCEE	Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne.
Matlab	Mathematics for Laboratory
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Proportionnel Intégral
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
DC	Direct Current
CV	Commande Vectorielle
CC	Courant Continu
MCC	Machine à Courant Continu
AC	Alternative Current
LF	Logique Floue
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
CCR	Convertisseur Coté Rotor

CCS	Convertisseur Coté Stator
CCG	Convertisseur Côté Génératrice.
EF	Ensemble Floue
CF	Contrôleur Floue
FLC	FuzzyLogic Control
AG	Algorithme Génétique
TSM	Time Setting Multiplier
OF	Objective Functions
CTI	Coordination Time Interval
CF	Contrôleur Floue
RSC	Rotor Side Converter
GSC	Grid Side Converter
PID	Proportional Integral Dérivé
SE	Systèmes Eoliens
DFIM	Doubly Fed Induction Machine
GWO	Grey Wolf Optimizer
ALO	Ant Lion Optimizer

Symboles :

GADA

D_g	Coefficient de frottement du rotor de la génératrice
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support
F	Coefficient de frottement visqueux
Db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
F	Coefficient de frottement visqueux
Db	Coefficient de frottement de pale par rapport à l'air
$\dot{\beta}_{b1}, \dot{\beta}_{b2}, \dot{\beta}_{b3}$	Les vitesses d'orientation de chaque pale
T_{b1}, T_{b2}, T_{b3}	La force de pale dépend de la vitesse de vent appliquée
$E_{[J]}$	L'énergie cinétique
$E_v[J]$	L'énergie cinétique de vent
$C_{aer}[N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec}[N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis}[N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em}[N.m]$	Couple électromagnétique

C_{em_ref} [N. m]	Couple électromagnétique référence
$C_{aer_estimé}$ [N. m]	Couple aérodynamique estimé
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
θ_{coord}	Angle coordonnée
E_r [V]	f e m au rotor
E_s [V]	f e m au stator
Ω	Vitesse de rotation électrique ($\omega = p\Omega$)
ω_s	Pulsation électrique statorique
ω_r	Pulsation électrique rotorique
ω_m	La pulsation mécanique de la machine
N_r	Le nombre de spires de bobinage rotorique
N_s	Le nombre de spires de bobinage statorique
S_s [VA]	La puissance apparente au stator
S_r [VA]	La puissance apparente au rotor
P_s [W]	La puissance active au stator
P_r [W]	La puissance active au rotor
Q_s [VAR]	La puissance réactive au stator
Q_r [VAR]	La puissance réactive au rotor
G	Glissement
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator)
$[M_{rs}]$	Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor)
$[V_s]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique
$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique
$[\phi_s]$	Vecteur flux statorique
$[\phi_r]$	Vecteur flux rotorique
V [V]	Tension
I [A]	Courant
ϕ [Wb]	Flux
M [H]	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ($\theta=0$)
l_s [H]	Inductance propre de chaque enroulement du stator
l_r [H]	Inductance propre de chaque enroulement du rotor
M_s [H]	Inductance mutuelle entre deux phases statorique
M_r [H]	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator

L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Flux statorique selon l'axe d,q
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Flux rotorique selon l'axe d,q
V_{sd}, V_{sq}	Tension statorique selon l'axe d,q
V_{rd}, V_{rq}	Tension rotorique selon l'axe d,q
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d,q
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d,q
S	Opérateur dérivé de Laplace
P	Nombre de paire de pole de la MADA
P_m	Puissance mécanique
f_r	Fréquence de rotor
f_s	Fréquence de stator
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI
τ_r	Temps de réponse du système

Turbine

V_1, V_2	Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
P	Densité de l'air à 15°C
M	Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s
R	Rayon de la turbine
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
V	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$P_{aér}$	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
Λ	Vitesse relative de l'éolienne
B	Angle de calage des pales de la turbine
Ω_1, Ω_2	Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur
Ω_s	La vitesse de synchronisme
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de la turbine
$\Omega_{turbine\ estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique
V	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
G	Rapport de multiplication
$J_{turbine} (kg.m^2)$	Moment d'inertie de la turbine
$J_g (kg.m^2)$	Moment d'inertie du rotor de la génératrice
$J (kg.m^2)$	Moment d'inertie totale

$J_{pale}(\text{kg. m}^2)$	Moment d'inertie de pale
$J_h(\text{kg. m}^2)$	Moment d'inertie de l'arbre
Kb	Elasticité de pale
Kh	Elasticité de l'arbre
Dh	Coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur

Introduction Générale

Introduction Générale

Aujourd'hui, il est crucial d'utiliser des alternatives renouvelables comme les cellules solaires, le gaz éthane, l'hydroélectricité et la biomasse, entre autres, en raison de l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie qui épuise les ressources énergétiques conventionnelles et des effets saisissants du changement climatique sur l'environnement.

De plus, l'énergie éthanol est apparue au cours des dernières décennies comme la source d'énergie renouvelable potentielle la plus fiable et la plus développée. Les progrès rapides dans le domaine de l'électronique de puissance, qui est au cœur des systèmes éoliens, le soutien gouvernemental et la sensibilisation croissante du public aux sources d'énergie renouvelables ont tous contribué au développement des systèmes éoliens [1]. En conséquence, le pourcentage de la capacité énergétique éolienne installée a augmenté à l'échelle mondiale.

Le principe du fonctionnement de la génération d'énergie par évaporation est la conversion de l'énergie cinétique linéaire du mouvement des particules en suspension dans l'air en énergie mécanique puis en énergie électrique à l'aide de refroidisseurs par évaporation et de générateurs électriques[2].

La plupart des systèmes EVV et de conversion de puissance utilisent un GADA pour convertir la puissance en variable (GADA). Ce dernier gagne du terrain dans le secteur éolien, notamment pour les turbines multi-gigawatt. La capacité des éoliennes à fonctionner à des vitesses variées est utilisée à diverses fins, notamment la capacité de réduire les sollicitations mécaniques du bâtiment, de réduire le bruit acoustique et de réguler la puissance active et réactive [3].

La majorité des turbines sont des SMA, qui ont l'avantage d'être moins chères, de nécessiter moins d'entretien et d'être bien adaptées aux applications de turbines à grande échelle en raison de leur fonctionnement à vitesse variable, ou GADA.

La beauté des SCEE basés sur GADA est leur capacité à transformer l'énergie en vitesse variable avec une contrainte mécanique minimale et un faible coût en raison de la taille partielle des convertisseurs de puissance nominale nécessaires au contrôle complet de la machine. En raison de ses caractéristiques techniques et économiques avantageuses, cette huile a été rapidement commercialisée dans l'industrie pétrolière contemporaine[4]. En raison de la vitesse changeante du vent et de la nécessité de les intégrer au réseau électrique, ces éoliennes ont besoin d'un contrôle fiable.

De nombreuses approches de contrôle puissantes ont trouvé des applications dans un large éventail de domaines grâce aux progrès de la théorie du contrôle. Ces dernières années, il y a eu des progrès notables dans l'utilisation de l'intelligence artificielle dans les applications techniques. Ces développements ont permis à SCEE d'obtenir un système de contrôle efficace, adaptable, fiable et à un prix raisonnable. Pour les chercheurs et les producteurs, cela continue d'être un défi. Nous avons lancé le projet de recherche actuel dans ce contexte [5].

La CV basée sur des régulateurs traditionnels (réglage à action proportionnelle, intégrale et dérivée) n'est pas toujours en mesure de contrôler les régimes transitoires de la machine et, plus encore, ses fluctuations paramétriques. En revanche, les commandes contemporaines sont moins intelligentes et moins robustes et répondent mieux à ces exigences [6].

Le but de la LF est d'aborder le raisonnement humain en utilisant une représentation appropriée des connaissances. Elle s'intéresse à votre capacité à gérer l'imprécis, l'incertain et l'ambigu. Elle résulte de la capacité de l'homme à agir de manière appropriée et à prendre des décisions malgré l'ambiguïté des informations dont il dispose[7]. D'un autre côté, il est difficile de comprendre un système défaillant. Cela peut prendre beaucoup de temps pour l'ajuster et le configurer.

Ces algorithmes fonctionnent en utilisant une population de fausses réponses et une recherche stochastique globale sur une grande zone. Ces AG utilisent des opérateurs de reproduction et de mutation pour résoudre divers problèmes. L'application de ces algorithmes à la conception de systèmes de contrôle conventionnels ou basés sur un GADA est une approche prometteuse. De plus, la combinaison de l'AG, qui permet la localisation de l'optimum global, avec d'autres méthodes de recherche locales déterminées permet d'améliorer les performances.

L'objectif principal de cette thèse est de compléter le modèle SCEE basé sur un GADA et d'utiliser des techniques de contrôle pour produire un système fiable et résilient.

Structure de la thèse

La méthodologie suivante a été utilisée pour mener la recherche efficacement : Nous décrirons brièvement la capacité d'éthane installée, un large aperçu de la production d'énergie d'éthane, l'évolution du SCEE en puissance nominale d'éthane, et les éléments clés des systèmes de conversion dans ce premier chapitre. les nombreuses topologies, utilisations et caractéristiques des éoliens. Cela nous permet de décider du type de générateur utilisé pour générer de l'énergie électrique.

La modélisation des éoliennes sera abordée au chapitre II, ainsi que les commandes appropriées pour contrôler la vitesse de l'éolienne afin de maximiser et de limiter la capture de puissance à des vitesses de vent faibles et élevées. Nous allons commencer par modéliser le profil de vent qui sera

appliqué à l'éolienne. Le modèle de turbine sera également présenté. Différentes stratégies d'extraction de l'énergie éthane la plus disponible seront alors employées.

Nous modéliserons GADA au chapitre 3 et décrirons son modèle dans le repère d-q lié au tournant du chapitre statique. Ce chapitre couvrira également la modélisation de deux transformateurs statiques et le contrôle du transducteur latéral principal (CCR). Fournit une source d'alimentation réactive au réseau électrique tout en maintenant une tension vectorielle constante (CC) pour permettre au transformateur de dérivation du générateur de fonctionner (GCC). La dernière partie affichera les CV (directs et indirects) des employeurs de la GCC. Ces algorithmes nous permettent de réguler indépendamment les forces actives et réactives produites par GADA à l'aide de régulateurs PI. Toutes ces commandes sont légitimes selon les résultats de la simulation.

Dans le quatrième chapitre, nous aborderons le contrôle vectoriel indirect à l'aide de contrôles flottants. Nous allons commencer par une introduction à la LF. Les règles fondamentales de commande et de réglage LF seront ensuite examinées. Enfin, la commande LF est utilisée pour concevoir les régulateurs de courant rotatifs pour le GADA. Dans le dernier chapitre, nous verrons comment un système d'énergie solaire basé sur GADA peut aider à améliorer la qualité de l'énergie électrique en compensant les courants harmoniques. Pour trouver des harmoniques dans le réseau électrique, nous emploierons des algorithmes sophistiqués.

Ce chapitre discutera de l'utilisation des AG pour augmenter l'efficacité des régulateurs de courant rotatifs et la puissance de GADA. Il y aura une discussion et une comparaison des résultats obtenus par les deux régulateurs améliorés. Les cinq chapitres de cette thèse se concluent par une conclusion générale. De plus, il y a une suggestion pour certaines directions de recherche futures potentielles.

CHAPITRE I

*Etat de l'art des systèmes de
conversion d'énergie éolienne*

I.1. Introduction

Parmi les nombreux générateurs d'ER , l'éolien est le plus développé technologiquement et économiquement, grâce aux avancées de la technologie éolienne. Du coup, pour un même nombre de machines, les nouveaux parcs génèrent de plus en plus d'électricité [1].

Dans ce chapitre, nous présenterons l'état de l'art des SCEEs. En premier lieu, un aperçu de l'évolution globale de l'énergie nucléaire sera fourni, suivi d'un aperçu de l'énergie nucléaire en Algérie et du gisement nucléaire dont elle dispose. Dans un second temps, les technologies courantes de conversion de l'énergie seront présentées, et l'impact de leur intégration sur le réseau sera discuté. Enfin, nous présenterons les structures des éoliennes envisagées pour l'association de stockage électrique afin d'obtenir un générateur éolien capable de participer aux fonctions du système [2].

La connexion des éoliennes au système actuel pose plusieurs problèmes. Les chercheurs ont pu arriver à la conclusion que le couplage électromagnétique du moteur était cyclique par effet de rotation oblique grâce à des modèles de mécanismes mécaniques intervenant dans l'énergie délivrée au rotor d'un moteur d'éolienne. Les oscillations sont plus importantes dans un réseau de faible puissance, selon le réseau électrique [3]. De plus, étant donné que la puissance réactive doit être fournie à l'appareil lors de l'utilisation du MAS en tant que généra.

I.2. Aperçu des systèmes de conversion de l'EE

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

I.2.1.Capacité éolienne installée

L'une des sources d'ER avec la croissance la plus rapide est l'énergie solaire, plusieurs pays connaissent une croissance chaque année [4]. La figure I.1 montre la capacité solaire annuelle et cumulée totale installée dans le monde.

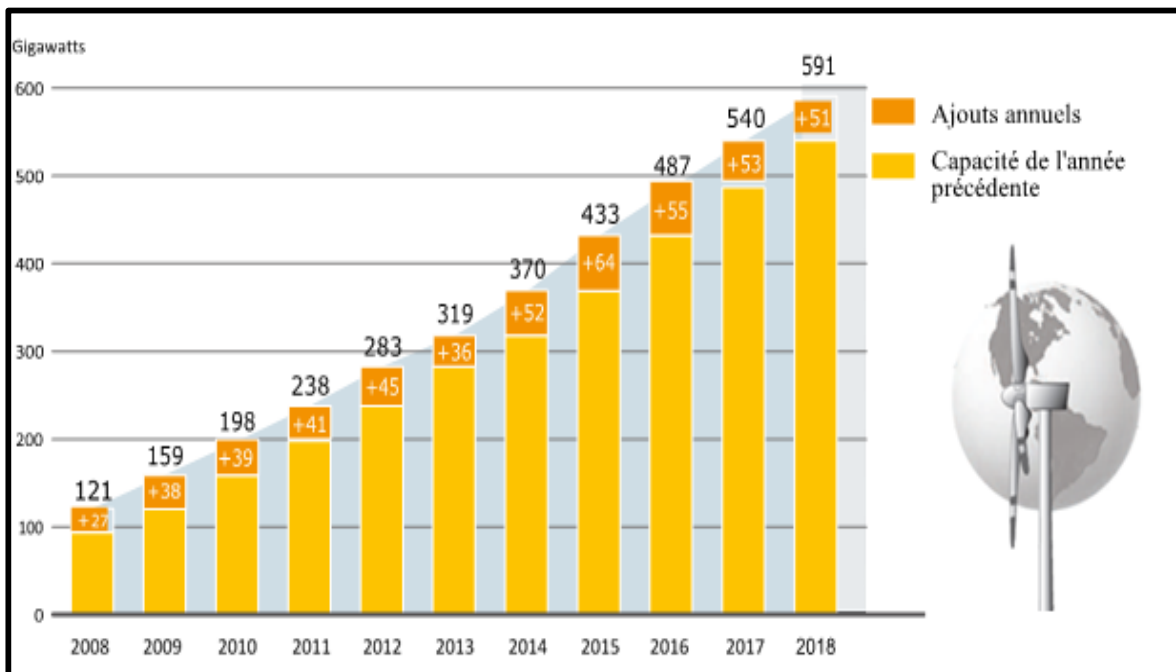


Figure I-1: Capacité mondiale d'EE

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

I.2.2. Aperçu général de la production d'EE

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

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

(plus de 7 %) ont représenté la majeure partie du reste des installations de 2018. La Chine a conservé sa position de tête pour les nouvelles capacités (à la fois sur terre et en mer) et a été suivie de loin par les États-Unis, l'Allemagne, l'Inde et le Brésil, le Royaume-Uni étant proche derrière. Les autres pays qui figurent dans le top 10 des ajouts de capacité sont la France, Mexique, Suède et Canada. Pour la capacité cumulée, les 10 premiers pays sont restés inchangés par rapport à 2017 [5].

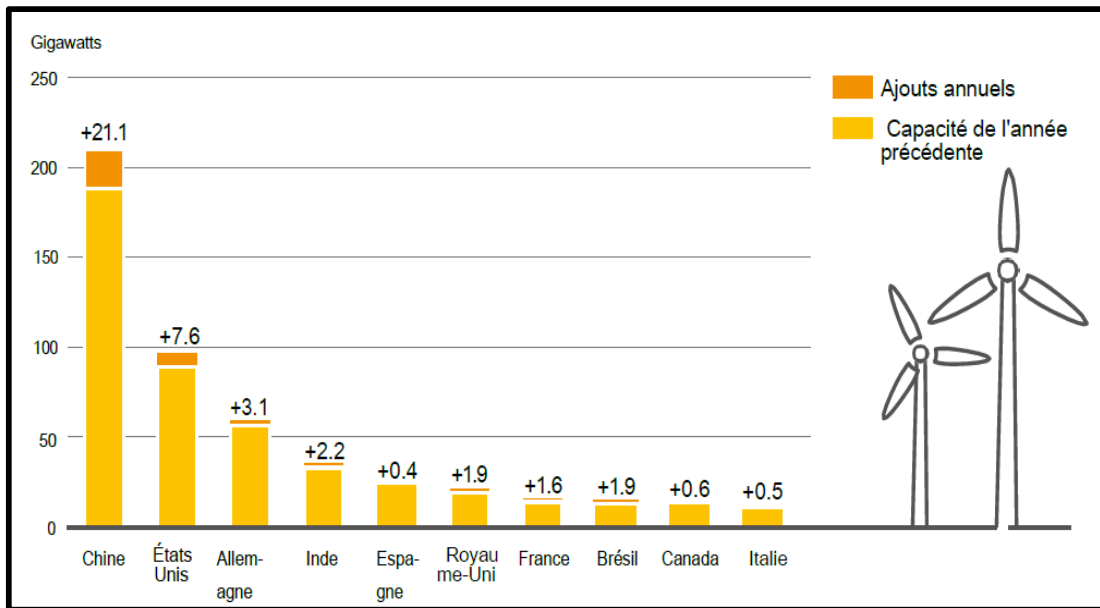


Figure I-2: Capacité de production d'EE et ajouts, 10 premiers pays, 2018 [5].

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

Tableau I-1 : Capacité mondiale d'EE et ajouts du 10 premiers pays 2018 [5].

I.2.3. Évolution du SCEE en puissance

La puissance d'une turbine est inversement proportionnelle au carré du diamètre du rotor et au cube de la vitesse du vent. Des panneaux solaires plus grands peuvent capter plus d'EE tout en coûtant moins cher à installer et à entretenir que des panneaux solaires plus petits. En conséquence, comme le montre la figure I.3, la taille des éoliens commerciaux a considérablement augmenté au cours des 30 dernières années. D'ici 2020, la capacité des turbines passera de 50 kW en 1980 à 15-20 MW [6-7]. Des Turbines de 15 à 20 MW avec des diamètres de rotor supérieurs à 150 m, soit près de deux fois la longueur d'un Boeing 747, devraient être développées dans un avenir proche. Les éoliennes offshore sont également de plus en plus populaires, car des vents plus forts et plus constants peuvent augmenter la production d'électricité.

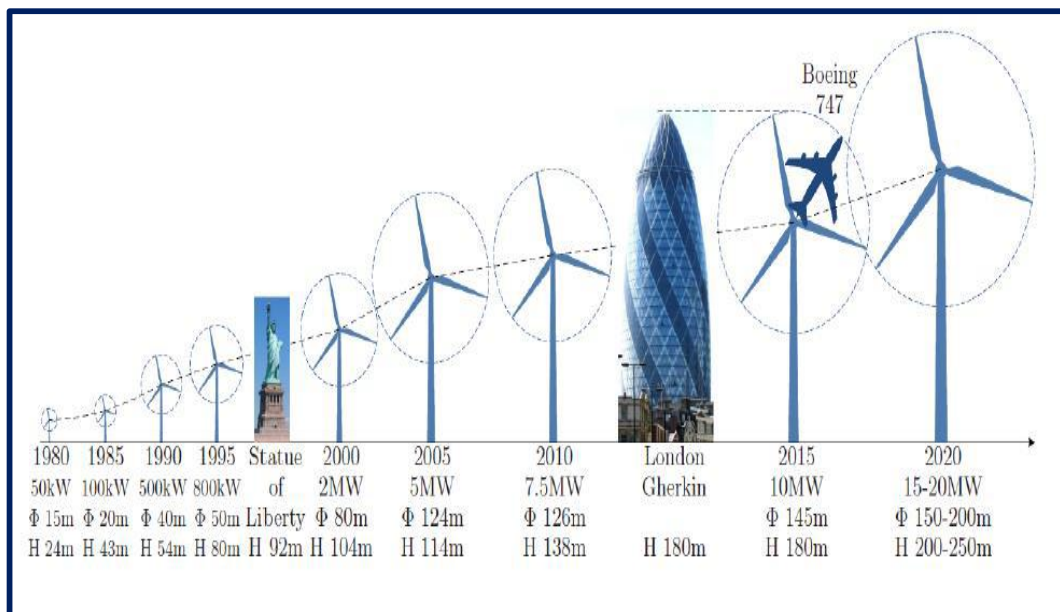


Figure I-3: Évolution de la taille des TE (puissance nominale de sortie de la turbine, son diamètre et la hauteur du moyeu) [8].

I.3. Développement de l'EE en Algérie

Bien que l'Algérie dispose d'un potentiel remarquable qui pourrait la propulser au sommet du peloton mondial, sa capacité installée est de seulement 536 MW occupant le 18e rang des pays africains producteurs d'énergies renouvelables, selon une étude de l'agence internationale

d'énergies renouvelables (Irena) intitulée "Renewable statistiques de capacité 2017". Seul le début de l'investissement peut être vu dans cette position.

Maintenir la position de l'Algérie parmi les nations productrices d'énergie du monde est la clé du problème. Les zones rurales du Grand Sud, où l'électrification photovoltaïque a favorisé l'installation de nouvelles familles, sont un exemple de gestion de la demande énergétique pour suivre la croissance démographique. Parmi les autres enjeux figurent la protection de l'environnement par l'éducation au développement durable et à la maîtrise de l'énergie, la pérennité des énergies fossiles et le développement de nouveaux pôles d'emplois. Outre le fait que l'Algérie se considère comme un futur producteur d'électricité à partir de sources renouvelables, des mesures politiques et financières sont nécessaires pour assurer la sécurité énergétique de toute la nation. la formation des futurs managers conscients des problèmes que génère la lente disparition des énergies fossiles doit commencer aujourd'hui, pour que demain, la société prenne les habitudes indispensables à sa survie en sauvegardant son environnement, son écosystème, tout simplement sa planète [9].

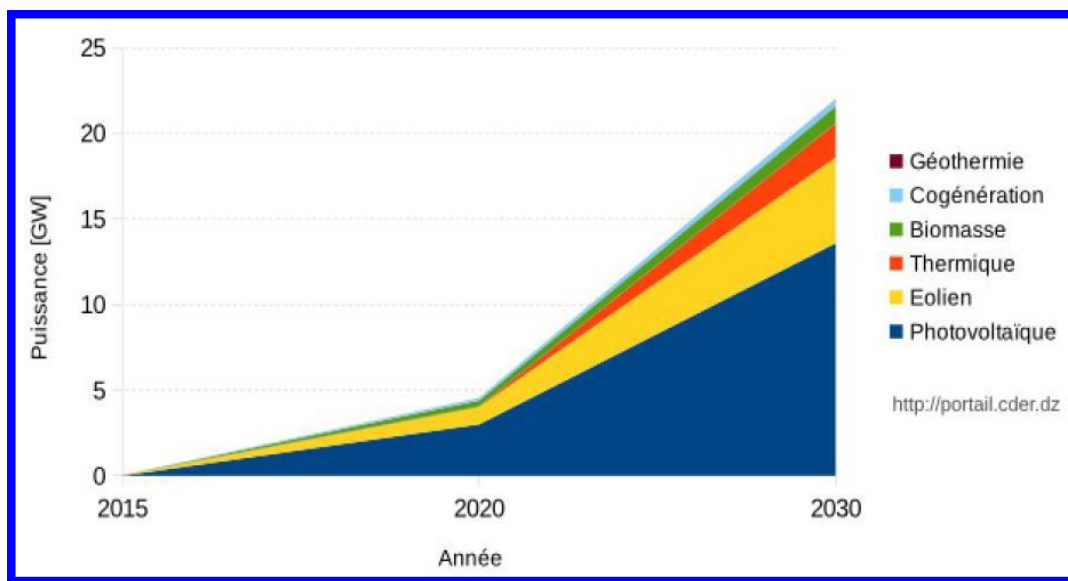


Figure .I-4: Phases du programme algérien des ERs

La croissance du solaire thermique est repoussée à 2021 au profit du développement à grande échelle du photovoltaïque et de l'éolien, ainsi que l'introduction des biocarburants (valorisation des déchets), de la cogénération et de la géothermie. La phase initiale de ce programme a été consacrée à la réalisation de projets pilotes et à l'expérimentation de diverses technologies, période au cours de laquelle des facteurs pertinents relatifs aux avancées technologiques des secteurs considérés sont apparus sur la scène énergétique et ont motivé la révision de ce programme. La mise en œuvre de ce programme national est conforme à la loi

car il est ouvert aux investisseurs tant nationaux qu'étrangers des secteurs public et privé. La cohérence du programme de réduction des émissions doit être mise en œuvre afin de répondre aux exigences du marché national 2 000 MW entre 2015 et 2030. L'installation des capacités d'ER prendra en compte les caractéristiques de chaque région : la région des Hauts Plateaux pour son potentiel ombragé et éolien avec possibilité d'acquérir des terres ; la région côtière pour la disponibilité des mouillages ; et l'utilisation de tous les espaces disponibles, tels que les toits, les terrasses et autres espaces inutilisés. Compte tenu de la disponibilité foncière et de l'important potentiel solaire et pétrolier qui favorise ces régions, le Sud est une localisation idéale pour l'hybridation des centrales existantes et l'alimentation complémentaire des localisations dispersées. L'ensemble de la capacité photovoltaïque comprend des composants supplémentaires pour des secteurs d'application supplémentaires, tels que le résidentiel, l'agriculture, le pompage, les ressources en eau, l'industrie, l'éclairage public et les services [9]. Les cartes du vent créées par [10] (figure I.5) montrent que le sud présente des vitesses plus élevées que le nord, en particulier dans le sud-est. Globalement, on constate que la vitesse moyenne est faible lorsqu'il s'agit du nord. La saison la plus active, avec un vent constant, est le printemps, suivi de l'été au sud et de l'hiver au nord [11].

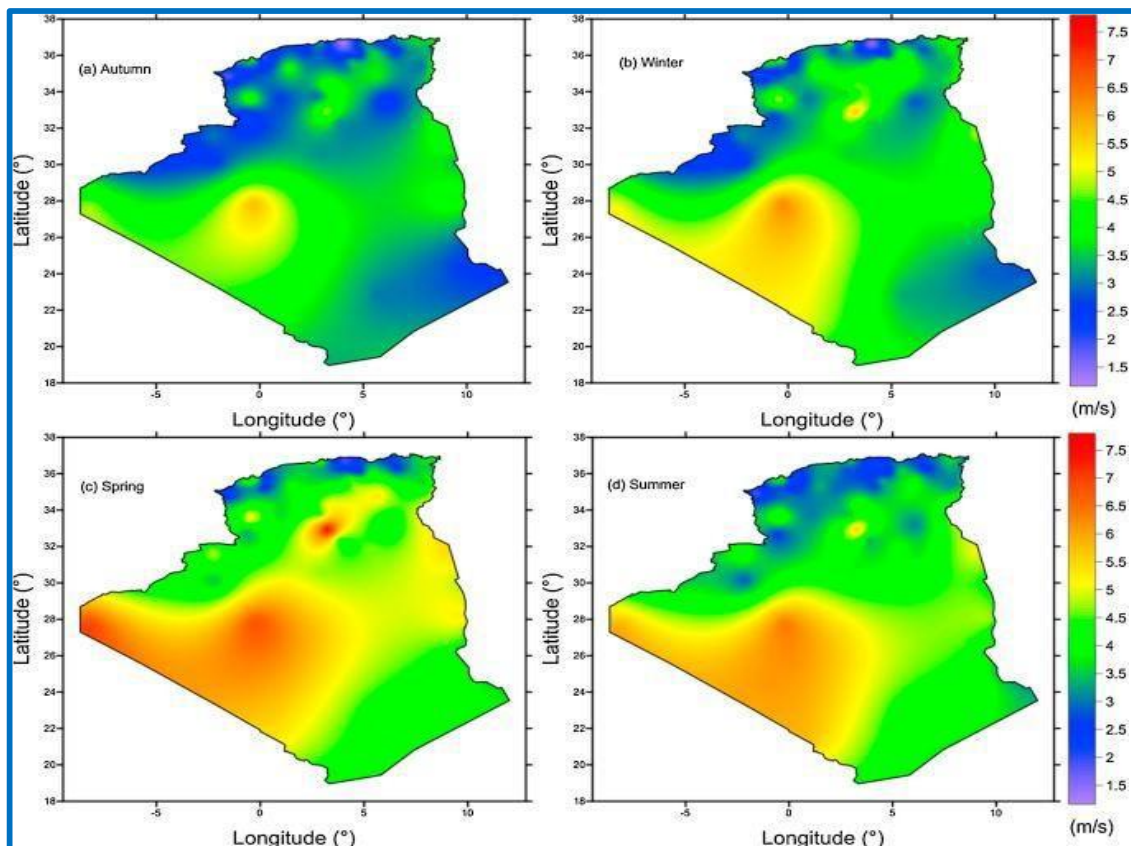


Figure. I-5: Carte des vents de l'Algérie à 10 m d'altitude (m/s)

Malgré d'importants investissements mondiaux réalisés dans l'étude et le développement des éoliens suite à la première marée noire, l'Algérie progresse dans ce domaine en adoptant le programme national de développement des RE, qui a été approuvé en 2011 et mis à jour en 2015. Son objectif est d'atteindre la domination ultime de 22 000 MW d'ici 2030, dont l'éolien représentera 5 010 MW, juste derrière le photovoltaïque (PV) qui représentera 13 575 MW [12].

Le premier projet dans cette zone a débuté en juin 2014 avec la construction du premier parc éolien, d'une capacité de 10 MW et représentant environ 5% de l'alimentation en énergie électrique du réseau local, dans le quartier Kabertène d'Adrar. Voici comment ce programme est réparti par secteur technologique :

Unité : MW	1 ^{ère} Phase 2015-2020	2 ^{ème} phase 2021-2030	TOTAL
Photovoltaïque	3000	10 575	13 575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4525	17 475	22 000

Tableau. I.2. Objectifs du programme algérien des ERs pour 2030

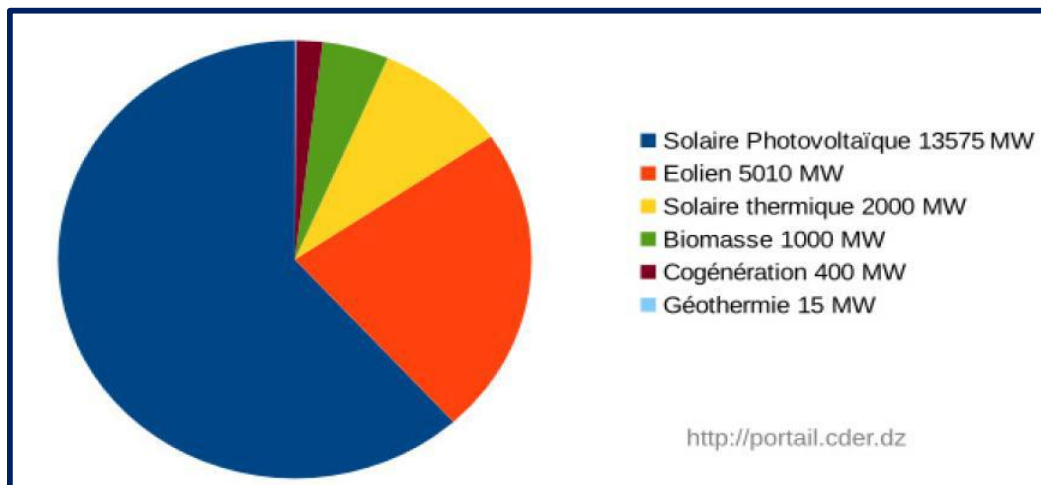


Figure. I-6 : Objectifs du programme Algérien des ERs

D'ici 2030, l'achèvement du programme permettra d'inclure environ 27 % des sources d'énergie renouvelables dans le bilan de la production d'électricité du pays. Les 22 000 MW d'énergie renouvelable permettront d'économiser plus de 300 milliards de m³ de gaz naturel, soit une quantité comparable à 8 fois la consommation du pays en 2014 [9].

I.4. Avantages et inconvénients de l'EE

La croissance de l'EE est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie [13].

❖ Avantages

- L'EE est une ER, ce qui signifie que contrairement aux combustibles fossiles, elle sera toujours disponible pour aider les générations présentes et futures.
- Parce qu'il est entièrement construit en métal et en plastique, l'EE est une source d'énergie propre qui n'a pas d'effets négatifs sur l'environnement, contrairement à d'autres sources d'énergie qui émettent directement et massivement du CO₂.
- EE ne produit pas non plus de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'exploitation de l'EE n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- C'est une source d'énergie de proximité qui satisfait la demande dans la région.
- Les pertes en ligne causées par de longs transferts de puissance sont ainsi réduites.
- De plus, cette source d'énergie pourrait stimuler l'économie régionale, en particulier dans les régions rurales. C'est le RE le moins cher à fabriquer.
- L'hiver (lorsque les vents sont plus forts) est celui où la production est la plus élevée, coïncidant avec la saison où la demande est la plus forte.
- Parce qu'elles sont composées d'acier, les éoliennes peuvent être recyclées dans une large mesure. Il est totalement démontable après sa durée de vie opérationnelle (environ 20 ans), et vous pouvez même retirer le socle en béton si nécessaire. Il peut être simplement changé et n'aura laissé aucun contaminant.

Une étude de ces inconvénients est nécessaire pour s'assurer qu'ils n'empêchent pas la croissance de cette source d'énergie.

❖ Inconvénient

- Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :
- Cependant, l'impression esthétique continue d'être une préférence personnelle.
- Bruit : Il a incontestablement diminué, en particulier le bruit mécanique, qui a presque entièrement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.

- Concernant le bruit aérodynamique, celui-ci doit être maîtrisé car il est lié à la vitesse de rotation du rotor.
- L'effet sur les oiseaux : la recherche indique qu'ils restent à l'écart des éoliennes.
- Selon d'autres recherches, les parcs éoliens ne devraient pas être construits près des lieux de migration des oiseaux afin que les éoliennes ne les attrapent pas.
- La qualité de l'énergie électrique : Parce que le vent est imprévisible et la source d'EE stochastique, la création de l'énergie électrique est instable.
- Le coût de l'EE par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que l'énergie éolienne puisse concurrencer la plupart des sources d'énergie conventionnelles sur les meilleurs emplacements, ou là où il y a le plus de vent, son coût est toujours supérieur à celui des sources conventionnelles sur les sites moins venteux.

I.5. Aérogénérateur

I.5.1. Principe de fonctionnement

Une éolienne, aussi appelée générateur d'air, est simplement un dispositif qui capte et convertit l'énergie, convertissant une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre moteur puis en énergie électrique via un générateur. Le processus de conversion d'une éolienne est divisé en deux étapes [14]:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique disponible du vent et la convertit en énergie mécanique.
- Dans le générateur, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique, qui est ensuite transmise au réseau électrique. Le processus général est représenté sur la figure I.7 l'ensemble de la chaîne de conversion nécessite un large éventail de domaines et pose des problèmes d'aérodynamique, de mécanique, d'électricité et d'automatisation.

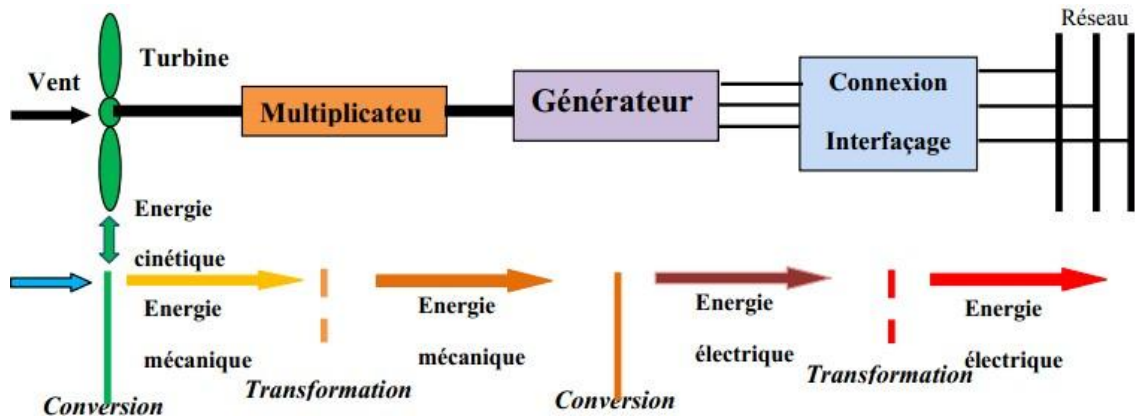


Figure I-7 : Principe de la CEE.

Les éoliennes sont classées en trois types selon leur puissance nominale [15] :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 KW.
- Eoliennes de moyenne puissance : entre 40 KW et quelques centaines de KW.
- Eoliennes de grande puissance : supérieure ou égale à 1 MW.

I.5.2. Constitutions d'un aérogénérateur

Les éoliennes à axe horizontal sont couramment utilisées dans l'industrie pétrolière. La figure I-8 fournit une représentation schématique de la structure interne de l'éolienne, y compris ces principaux composants [16].

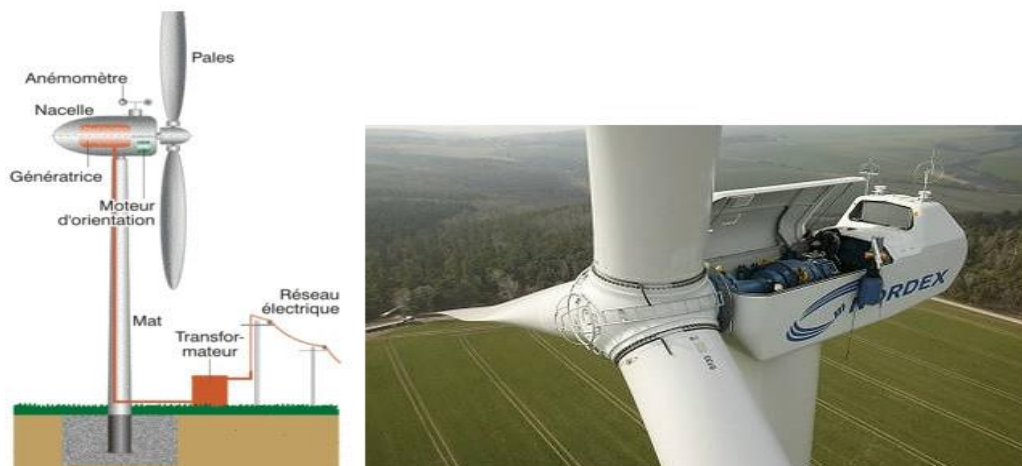


Figure I-8 : Schéma descriptif d'un TE de grande puissance

En général, les éoliennes sont constituées de composants mécaniques et électriques, comme illustré à la figure I.8. Chacun de ces composants doit être soigneusement étudié et modélisé

afin d'obtenir des performances et une fiabilité du système plus élevées tout en maintenant un faible coût d'investissement [17].

La fondation : La plupart du temps, la fondation est en béton armé. Elle doit être suffisamment solide pour supporter le poids des autres composants tout en maintenant l'ensemble éolien. Dans le cas des éoliennes offshore (installations marines), elle doit non seulement résister à diverses contraintes, mais également à celles imposées par la puissance des vagues et des courants marins sur le mât.

La tour ou le mât : Supporte les principaux composants de la turbine : la nacelle et le rotor. Souvent, un tube en aluminium apporte la rigidité nécessaire à l'ensemble de la construction. Il doit être le plus haut possible pour éviter les turbulences près du sol. Cependant, la quantité de matériaux utilisés est un coût inévitable, et le poids doit être limité, mais son volume croît parallèlement à celle de l'éolienne. Plus le rotor haut, meilleures sont les performances de l'éolienne.

Le rotor : C'est l'élément mécanique qui convertit la force cyclique du vent captée par les pâles en rotation, qui est ensuite convertie en électricité dans la nacelle. Il est typiquement composé de trois pâles et se situe devant la nacelle [18].

La nacelle : se compose de tous les composants mécaniques nécessaires pour relier le rotor éolien au générateur : arbres lents et rapides, rotors et multiplicateurs. Le frein à disque et aérodynamiques permettent d'arrêter le système en cas de surcharge. Souvent, le générateur est une MS ou asynchrone [19].

Le système d'orientation des pâles : Il est utilisé pour la régulation de puissance (réglage aérodynamique) [20].

Le multiplicateur : vise à adapter la vitesse d'un TE à celle d'un générateur électrique [21].

I.6. Prédiction optimale de l'énergie

Selon leur mode de fonctionnement, les éoliennes sont classées en deux types : les EVFs et les EVVs.

I.6.1. Fonctionnant à vitesse fixe

Les premières éoliennes développées étaient des EVFs. Le générateur asynchrone étant directement connecté au réseau grâce à cette technologie, sa vitesse est déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles utilisées (figure I.9) [22].

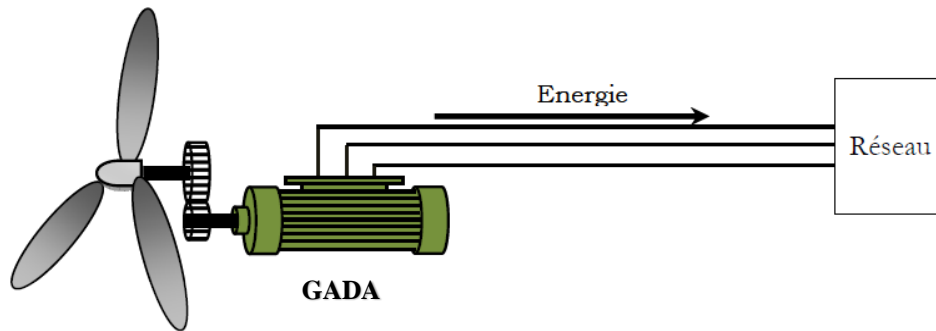


Figure I-9: Eolienne a vitesse fixe

Le couple d'un moteur mécanique (génééré par la turbine) tend à augmenter la vitesse du générateur. Ce dernier fonctionne dans un état de synchronisation excessive et alimente électriquement le réseau. Il existe deux types d' EVF: les éoliennes asymétriques et les éoliennes orientables [23].

I.6.2. Systèmes de génération EVV

L'énergie cinétique du vent est effectivement convertie en énergie électrique par les EVV. En conséquence, les différentes parties d'un système éolien sont construites pour maximiser la conversion de puissance et, d'une manière générale, les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et celles du générateur électrique doivent bien correspondre. Le MAS à rotor bobiné est utilisé dans les systèmes de production d'énergie EVV d'une manière nouvelle et créative. Cette approche est plus séduisante en toutes circonstances lorsque les changements de vitesse sont limité à un domaine particulier. Afin de minimiser les pertes et de réduire les dépenses, un transducteur avec un volume de seulement 20 à 30 % de la puissance totale du système doit être obtenu à partir du point de synchronisation [24]. La configuration, qui est encore affinée dans les systèmes EVV et GADA, est illustrée à la figure I.10. Il s'agit de connecter le stator directement au réseau et d'entraîner le rotor à travers un transformateur [25].

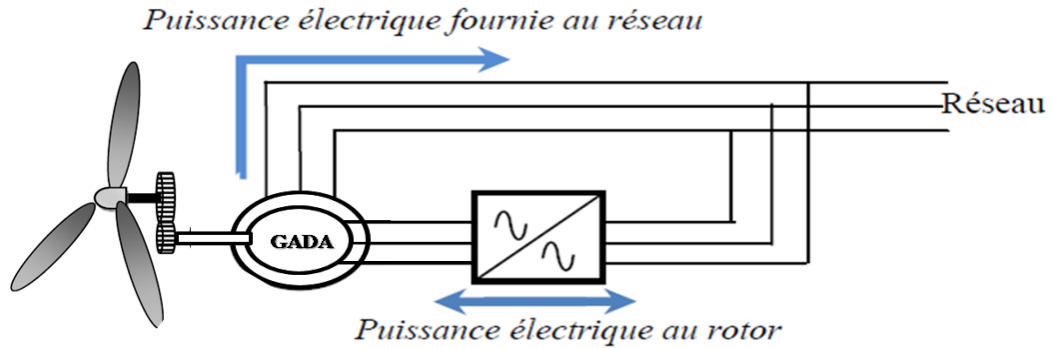


Figure I-10: Schéma de l'alimentation de la GADA pour une application génératrice

Le fonctionnement à vitesse variable se caractérise par [26]:

- ❖ Efficacité énergétique accrue.
- ❖ oscillations de couple réduites dans le groupe motopropulseur.
- ❖ réduire l'effort demandé par le groupe motopropulseur.
- ❖ Production d'électricité de meilleure qualité.

I.7 . Machines utilisées dans les systèmes éoliens

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par les éoliennes. La vitesse de rotation de l'éolienne est alors ajustée à l'aide d'un multiplicateur de vitesse (de 10 à 200 tr/min). La fonction d'un générateur, contrairement à un générateur typique, est de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut alors être relié au réseau directement ou indirectement. S'il est directement connecté au réseau, il doit fonctionner à vitesse constante [27]. Le générateur est directement relié au réseau par un câble si la vitesse est très variable transducteur. Ce type de chaîne permet l'utilisation de chaînes synchrones, asynchrones ou mixtes privée. En conséquence, la production d'énergie dans le système a augmenté.

I.7.1. Eoliennes à vitesse variable commandées par le rotor

Cette technologie éolienne utilise une GADA, qui est une MAS à rotor bobiné dont le principe de fonctionnement est d'un grand intérêt dans les applications de forte puissance. Dans cette configuration (figure I.11), un multiplicateur relie la turbine à la machine ; son stator est directement couplé au réseau, tandis que son rotor est connecté au réseau via des convertisseurs statiques.

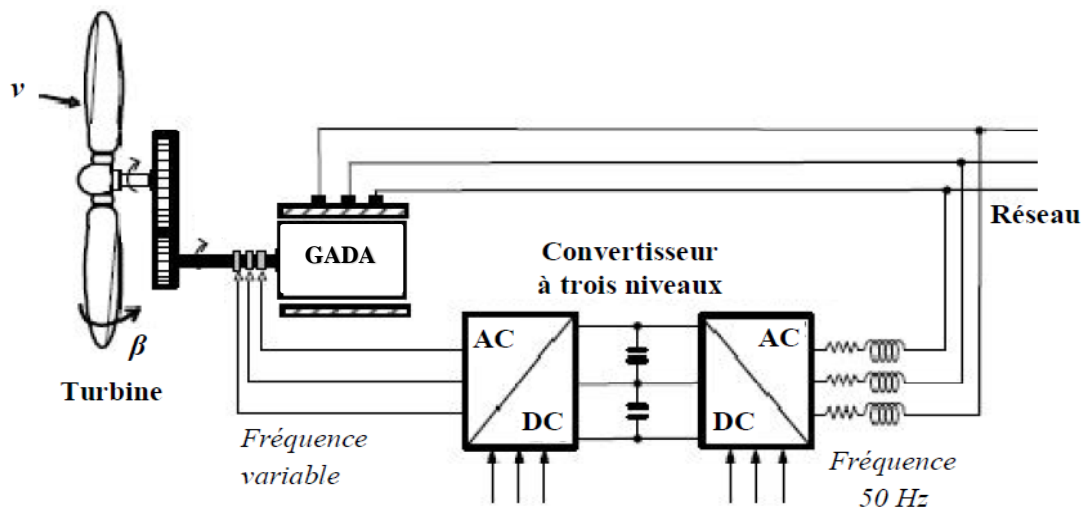


Figure I-11 : Eolienne à vitesse variable à base d'une GADA

Une vue plus détaillée du fonctionnement de cette chaîne éolienne sera présentée dans le chapitre suivant. Comparée à la structure commandée par le stator, cette technologie présente les avantages suivants [28]:

- ✚ La GADA permet d'avoir une large plage de variation de la vitesse de rotation, de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme.
- ✚ Du fait que le convertisseur n'est dimensionné que pour un quart de la puissance nominale de la machine (puissance glissante), il est moins encombrant et a un coût moindre.
- ✚ En conséquence, les pertes liées aux transformateurs sont réduites et l'efficacité du système de production est améliorée.
- ✚ La taille du filtre a été réduite, donc leur coût s'en trouve amoindri.
- ✚ Les puissances active et réactive produites statoriquement peuvent être contrôlées indépendamment par les tensions rotoriques, ce qui simplifie la gestion éolienne et lui permet de participer aux services du système.

a. Structure à énergie rotorique dissipée

La figure I.12 illustre le concept de vitesse variable. Le stator est connecté directement au réseau, tandis que la partie mobile est connectée au redresseur de courant. Puis une charge résistive est placée en sortie du redresseur à travers un hacheur IGBT ou GTO [29]. Le contrôle

du IGBT permet de modifier la quantité de puissance dispersée par l'enroulement du rotor et de fonctionner à une vitesse différente tout en restant dans la section couple/vitesse stable de la MAS . De ce fait, la RAM change en fonction de la vitesse de rotation de la machine.

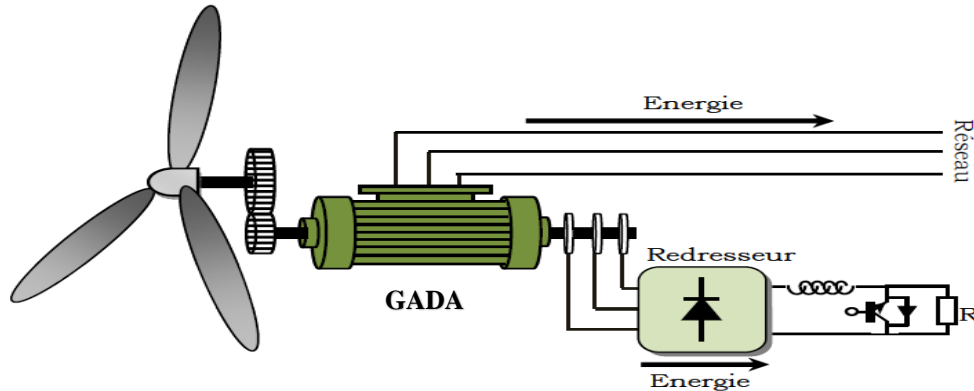


Figure I-12: GADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor augmente et est complètement dissipée dans la résistance R, réduisant les performances du système. De plus, cela augmente la taille de la résistance et la quantité de puissance traversant le transformateur [30].

b. Structure de KRAMER

Cette structure est également appelée structure à pont de diodes et thyristor. Les contraintes entre les extensions sont soulagées par le pont de diodes. L'onduleur à thyristor applique une tension au redresseur qui varie avec l'angle d'amorçage du thyristor. Ce dispositif permet de moduler le champ de conduction de la diode, ce qui module la puissance extraite du circuit tournant et, par conséquent, le mouvement asynchrone du générateur (première figure I.13). Le principal avantage est que l'onduleur est plus classique et moins cher, car c'est un onduleur non autonome dont les conversions sont assurées par le réseau [31].

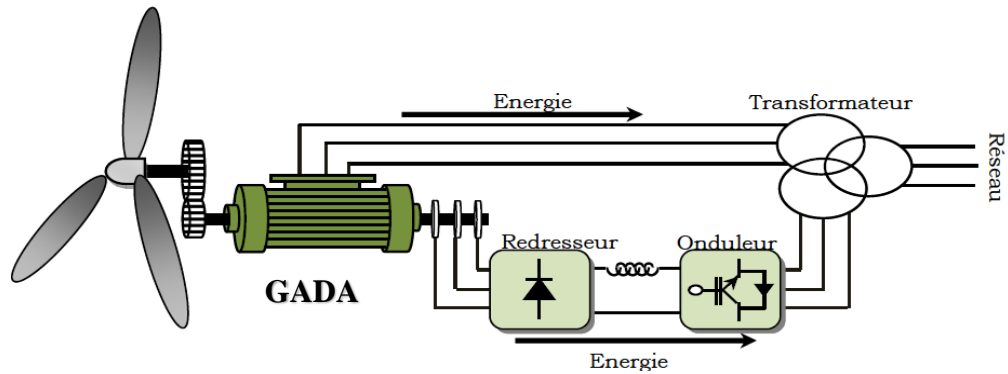


Figure I-13: Structure de KRAMER pour la GADA

c. Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur

La relation redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo convertisseur pour permettre un flux de puissance bidirectionnel entre le rotor et la matrice (figure I.14). Par conséquent, la structure entière est appelée structure de Scherbius [32]. Cet arrangement est également connu sous le nom de « structure statistique de SCHERBIUS ». En fait, le principe de SCHERBIUS repose sur l'utilisation d'une machine tournante au lieu de transducteurs.

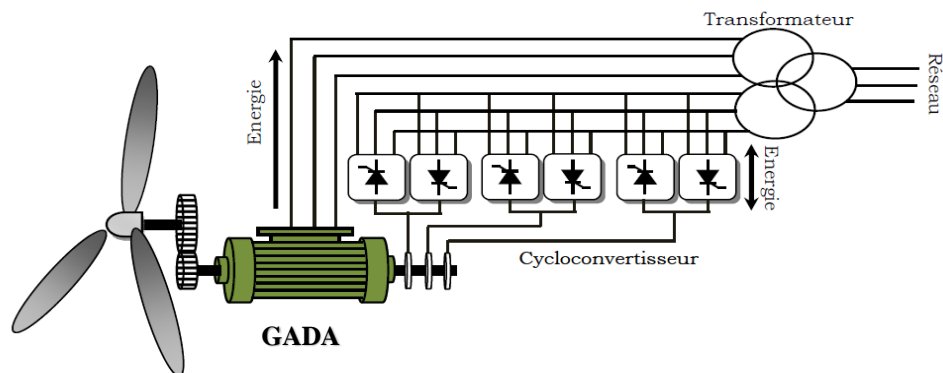


Figure I-14: Structure de SCHERBIUS avec cyclo convertisseur.

Le principe SCHERBIUS est reproduit dans ce montage à l'aide d'un cyclo-convertisseur. De ce fait, son utilisation entraîne des perturbations harmoniques importantes qui affaiblissent le facteur de puissance de l'appareil. Les progrès de l'électronique de puissance ont permis à une structure avec deux convertisseurs IGBT avec commandes MLI de remplacer le cyclo convertisseur [33].

d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI

Un autre dispositif intéressant (figure I.15) utilise deux interrupteurs IGBT triphasés commandables en ouverture et en fermeture dont la fréquence de commutation est supérieure à celle du GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet de créer des profils de signal de sortie basés sur la modulation de longueur d'impulsion, ce qui permet de réduire les perturbations en modulant le spectre de fréquence du signal [34]. Cette option permet de contrôler les flux de puissance active et réactive côté réseau ainsi que la puissance et la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone côté machine. Les qualités de la construction précédente sont reprises dans cette conception force de rotation dans les deux sens. Le rotor collecteur du transformateur permet un fonctionnement excessif et asynchrone ainsi qu'une gestion du facteur de puissance du réseau. Mais il faut souligner que la procédure du commutateur réseau en PWM permet de collecter des signaux de meilleure qualité [35].

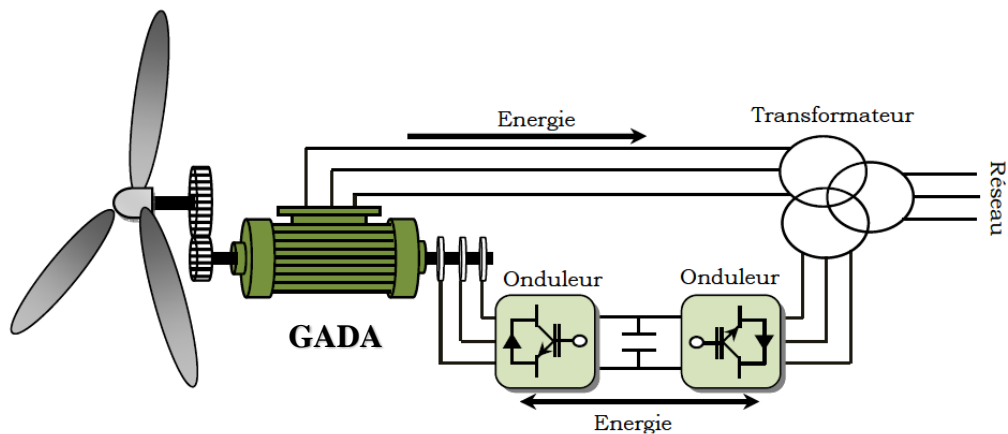


Figure I-15: Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.

C'est pourquoi nous nous intéressons particulièrement à cette dernière version de la GADA, du fait de ses bonnes caractéristiques inhérentes telles que :

- La capacité de fonctionner à des vitesses variables.
- Un convertisseur de puissance à petite échelle.
- Un faible niveau de fluctuation mécanique.
- La possibilité de fonctionner en hypo et hyper synchronisme, permettant au stator d'envoyer de l'énergie au réseau ainsi qu'au rotor d'envoyer de l'énergie au réseau.
- Contrôle simultané de la puissance réactive et active.

I.8. Configuration du mode de fonctionnement et stratégie de commande de la GADA

Nous examinerons trois fonctions différentes de GADA dans cette section. Nous fournirons l'étude de l'auteur sur le type de force et la méthode de contrôle employée pour chaque composition.

I.8.1. Fonctionnement en moteur avec un seul convertisseur

Dans ce mode de fonctionnement, l'organe mobile est relié à son propre transformateur, qui peut être un transformateur circulaire ou un onduleur, tandis que le stator est relié à un réseau à fréquence et tension constantes. La résistance du convertisseur est considérablement réduite par cette approche. Le schéma de catégories GADA est illustré à la figure I.16.

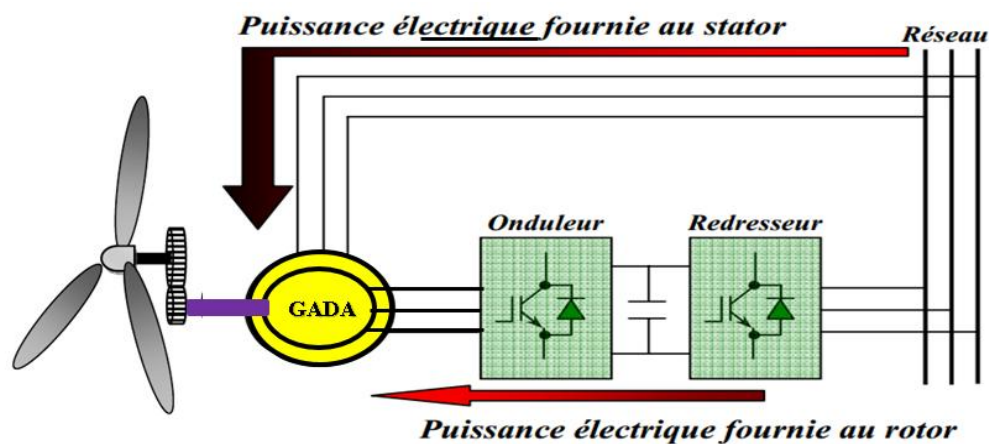


Figure I-16 : Schéma d'un système utilisant une GADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

Dans, HELLER propose GADA comme remède potentiel pour le secteur du pompage. Utilisant le concept de variations mineures autour d'un seul point opérationnel, il évalue la stabilité de GADA. Il peut trouver les colonnes du système en utilisant cette technique. Le mode de fonctionnement choisi est le démarrage moteur (figure I.16), qui relie le rotor à un onduleur pour réguler le sens du flux stator et le stator au réseau. Les résultats de l'expérience, qui ont été acquis à l'aide d'une machine de 33 kW, sont ensuite présentés.

MOREL affirme que l'utilisation d'un onduleur pour alimenter le rotor et la connexion du stator au réseau augmente de 20 % la puissance du transformateur du rotor [36]. Il examine la direction du sol. Il prévoit trois étages pour un moteur ou un générateur à vitesse variable : Dans

les modes 1, 2 et 3, le stator est connecté au réseau et le moteur est démarré avec des enroulements de stator en circuit fermé. En mode 3, GADA fournit une tension et une fréquence constantes au stator et, via un transformateur, au rotor. Les résultats expérimentaux attestent de la capacité du système à fonctionner dans une variété de modes.

Une étude de la GADA en mode de fonctionnement moteur, se concentrant sur les applications nécessitant un changement de vitesse, a été proposée par HOPFENSBERGER [37]. Il propose deux manières de calculer l'angle de rotation de la bobine rotorique (dirigée dans le sens de l'écoulement au stator) en l'absence de capteur de position : la première repose sur la mesure et l'expression des constantes de courant de la bobine tournante, tandis que la seconde fait appel à la mesure des forces actives et réactives statiques. Les résultats de ses expériences ont été utilisés pour étayer ses conclusions.

Dans l'auteur reprend la même étude, mais cette fois en utilisant la théorie des champs orientée vers l'évaporation co-rotative. Les résultats des expérimentations sont présentés de manière originale. Expérimental.

I.8.2. Fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs

Ce type de nutrition peut prendre plusieurs formes :

- ✓ deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs, comme indiqué sur la figure I.17 ;
- ✓ deux onduleurs fonctionnant en parallèle par un redresseur commun ;
- ✓ Cyclo transformateurs.

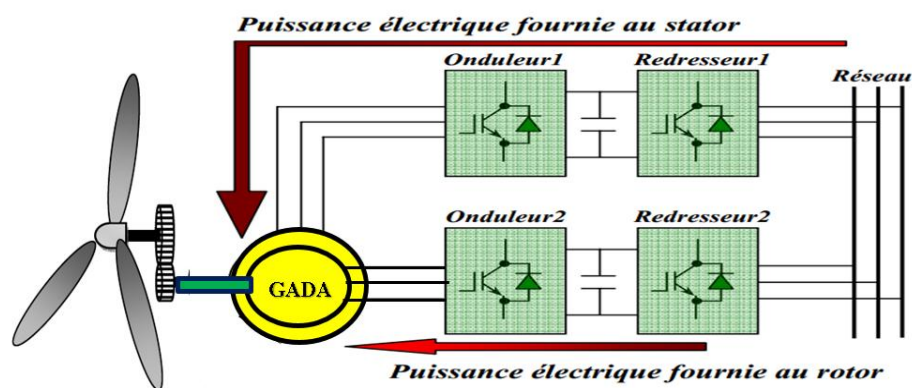


Figure I-17 : Schéma d'un système utilisant une GADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

L'étude présentée par LECOCQ dans porte sur le cas où la partie tournante et le stator sont

reliés à deux onduleurs indépendants (figure I.17). Il privilégie la théorie des champs, qui elle s'applique aux écoulements stationnaires et suppose la vitesse, le débit, le facteur de puissance et le glissement. L'auteur émet l'hypothèse que GADA a quatre degrés de liberté : flux, couple, fréquence et facteur de puissance, et qu'il peut contrôler le flux d'entrée indirectement en introduisant un courant magnétique. Ce qui vient ensuite régit les courants.

Les résultats expérimentaux de cette étude sont présentés dans la section suivante. VIDAL a été réintroduit LECOCQ présente l'ordre des vecteurs dans [38]. Il tente de développer de nouvelles lois de gouvernance linéaires et non linéaires basées sur un modèle d'état basé d'abord sur les courants puis sur les flux. L'alimentation GADA est assurée par un onduleur MLI. Il est possible de déterminer les couplages en travaillant dans le modèle choisi en analysant le comportement de GADA en mode permanent. Il promulgue une loi sur le partage du pouvoir et impose des frais. Fréquence de fonctionnement minimale pour le contrôle linéaire, on en conclut que la modélisation des écoulements donne les meilleurs résultats. En l'absence de linéarité, sélectionne la commande au moyen de modèles glissants. Enfin, il a mentionné que cette stratégie produit des résultats exceptionnels par rapport à la commande standard.

Al-Masmoudi croyait que GADA disposait de deux alimentations variables indépendantes, l'une au stator et l'autre au rotor, selon ses écrits. Elle s'intéresse particulièrement aux transferts d'énergie qui ont lieu dans un interféromètre entre les bobines du rotor et du stator. Gardez une trace du fonctionnement des freins, de l'alternateur et du moteur. Enfin, l'auteur propose d'examiner les valeurs intrinsèques de la matrice dynamique en réaction aux changements des paramètres électriques afin d'examiner la stabilité. Deux convertisseurs de tension de stator et de rotor alimentent la nouvelle méthode de DRID pour contrôler le GADA dans [39]. Sa méthode est basée sur la régulation des flux stator et rotor dans les deux sens. La machine peut être démontée avec plus de couple grâce à la commande linéaire, qui résulte de la forte orthogonalité des deux flux. L'auteur revient ensuite sur les résultats de ses simulations. Dans sa thèse, Ramos propose d'utiliser le montage GADA pour alimenter le moteur dans des situations où la "première transformation de l'aluminium" a lieu, comme la traction. Deux transformateurs séparés font fonctionner les enroulements du stator et du rotor de GADA. Le flux est contrôlé par des vecteurs. Il montre les résultats expérimentaux pour le premier scénario utilisant un contrôle basé sur un cadre tournant connecté à un flux continu ; pour le deuxième scénario, le contrôle est basé sur la direction du signe de la trace du flux entrant [40].

I.8.3. Fonctionnement en génératrice

Dans ce mode de fonctionnement, le stator est relié au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur, comme le montre la figure I.18. La tension et la fréquence peuvent être utilisées avec cette méthode. Continues même lorsque la vitesse change. Dans ce cas, le stator distribue la majorité de la puissance directement au réseau, moins de 30 % de la puissance totale passant par le convertisseur de puissance via le rotor. Cela permet d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux [41].

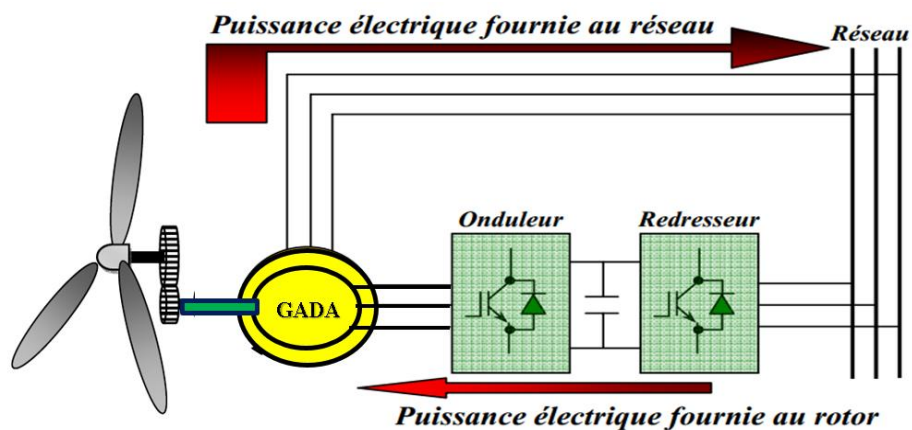


Figure I-18: Schéma d'un système utilisant une GADA en alternateur

Alimenté par un seul convertisseur

PERESADA mène des recherches dans le cadre du processus intergénérationnel GADA en [42]. Les enroulements du stator sont connectés au réseau et le rotor est connecté à un onduleur de tension. Il fournit une régulation "approximative" des forces actives et réactives du stator en régulant les courants actifs et réactifs du stator. Il est situé dans un cadre tournant associé à une tension statique. Pour être le plus général possible, il précise qu'il ne négligera pas les termes résistifs. Il montre, à travers des études expérimentales et de modélisation, que le système résiste aux changements paramétriques et à l'erreur mécanique de position du rotor.

En 22-24, Pena a fait une étude sur la GADA en tant que générateur associé à des éoliennes. Les fenêtres fixes sont connectées à un triple réseau en reliant l'adaptateur PWM-PWM au rotor. Cette caractéristique de conception doit permettre le réglage indépendant du fournisseur d'énergie, ainsi que le fonctionnement sur une large plage.

Dans Hofmann propose un générateur d'application pour la GADA où les rouleaux fixes sont connectés au réseau et les torsions rotatives sont connectées à la moyenne. Sa courbe de

couplage mécanique change avec la vitesse. Cela fait partie de l'hypothèse selon laquelle ses appareils sont pilotés par un contrôle vectoriel basé sur la direction du flux de l'entreprise. Étudie les différences de courants, de pertes et de débit à l'aide de la simulation. Cela indique que le contrôle de la perte de perte est efficace.

Dans son article KELBER étudie le fonctionnement de la GADA en tant qu'un moteur entraînant une pompe et un générateur alimenté par une turbine hydraulique. Il couvre à la fois le principe de la régulation du courant inverse et l'analyse de la stabilité de la machine. Conclusion l'auteure est que la GADA en tant que générateur contient des colonnes à faible flux avec une impulsion proche de la fréquence de tension, mais l'utilisation d'une vue à faible portée des anneaux de courant élimine le problème. Il montre qu'en utilisant la GADA comme générateur, il est possible de travailler rapidement aux quatre quarts et de contrôler l'énergie. Les résultats expérimentaux sont affichés. Les différentes structures évoquées sont utilisées pour produire de l'électricité à l'aide d'un moteur éolien ou hydraulique. Cette comparaison conduit à la recommandation de la GADA comme étant la meilleure solution. Poitiers GADA étudie dans ses thèses où la partie dure est reliée au réseau et le vertigineux relié à un réflecteur. Il établit un contrôleur de convoyeur rotatif relié à un flux statique. L'étude compare un contrôleur PI traditionnel avec un contrôleur RST adaptatif. Ces paragraphes sont liés à l'organisation du débit statique et du couple. Les réponses temporelles sont comparées à un spéculateur. Les normes incluent la recherche de la meilleure force active et la capacité à s'adapter aux changements soudains de vitesse et de durabilité pour les changements de paramètres. Les résultats montrent que l'organisateur RST produit les meilleurs résultats en termes de durabilité face aux fluctuations des paramètres. Le travail qui a été exécuté au cours de cette thèse a été alloué au contrôle de la GADA en mode de naissance non autonome, qui est géré par réflecteur pour la tension sur le rotor, tandis que la partie fixe est directement connectée au réseau. Le facteur de force est régi d'une manière qui rend toujours le pôle unique du point de vue de l'état. Premièrement, la stratégie de contrôle sera utilisée pour le sens de flux ferme de la GADA. Il s'agit d'un contrôle de trace du couple existant (suivi du couple). Le couple de référence électromagnétique doit être négatif pour obtenir un mode générateur, donc le débit de référence est en fonction de ce couple de référence. Les techniques d'intelligence artificielle seront utilisées à l'avenir [43].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art des SCEE. Tout d'abord, l'évolution de la production mondiale d'éthanol a été montrée et discutée, sur la base des statistiques les plus récentes du Conseil mondial de l'énergie. Malgré le fait que la capacité éolienne installée de l'Algérie soit désormais modeste, les études de son gisement éolien montrent qu'elle dispose de zones énergétiques éoliennes prometteuses.

Au cours de notre recherche dans la littérature, nous avons trouvé un nombre important d'études et d'articles de recherche sur la GADA. Ces enquêtes se concentrent principalement sur la façon dont il fonctionne en tant que générateur d'EE ou en tant que moteur avec une variété de modes d'alimentation et de contrôle.

Nos recherches se sont concentrées sur l'utilisation d'une GADA en mode de génération non autonome. Il s'agit d'une configuration avec un onduleur de rotor, et le stator est directement connecté au réseau.

La modélisation et le contrôle sont nécessaires pour utiliser correctement une GADA dans cette application. Le chapitre suivant est consacré à la modélisation et à l'analyse du système de conversion de la GADA.

CHAPITRE II

*commande d'un système éolien à vitesse
variable basé sur une GADA*

II.1. Introduction

Les turbines à vitesse variable sont parmi les technologies disponibles les plus importantes pour produire du pétrole, à la fois sur la ligne de transmission et en énergie électrique à l'aide de générateurs asynchrones à double alimentation, qui sont les plus fréquemment utilisés dans l'industrie pétrolière, en particulier pour les grandes turbines [44]. Pour contrôler la force aérodynamique, les éoliennes seront modélisées et contrôlées dans ce chapitre de différentes manières, dont la commande PI et la logique floue [45]. Nous allons d'abord démontrer le modèle éolien appliqué à la raffinerie de pétrole. Ensuite, nous examineront les différentes commandes permettant d'extraire le plus d'énergie électrique possible à basse vitesse et de réduire cette énergie lorsque la vitesse du vent augmente. Grâce à l'utilisation de diverses techniques d'optimisation énergétique, les éoliennes seront recherchées et comparées. Enfin, des résultats de simulation seront présentés afin de valider les commandes étudiées [46].

II.2. Les éoliennes à vitesse variable

La géométrie des panaches détermine leurs performances aérodynamiques ainsi que les matériaux qui les composent (à l'heure actuelle, les matériaux composites comme le verre et plus récemment la fibre de carbone sont largement utilisés en raison de leurs propriétés de légèreté et de haute résistance mécanique) [47].

II.3. Description du système

La GADA numéro une utilisée dans cette étude est validé sur la figure II.1 par un mécanisme de boîte de vitesses et d'accouplement d'arbre, qui relie mécaniquement l'éolienne à une GADA. Chacun des composants alimente la génératrice à induction à rotor bobiné. Le stator est instantanément relié au secteur, tandis que le composant mobile est envoyé depuis le bas du dos vers des transducteurs PWM supplémentaires à quatre roues motrices (RSC et GSC) qui sont alimentés par une batterie logée dans la liaison à courant continu du condensateur [48].

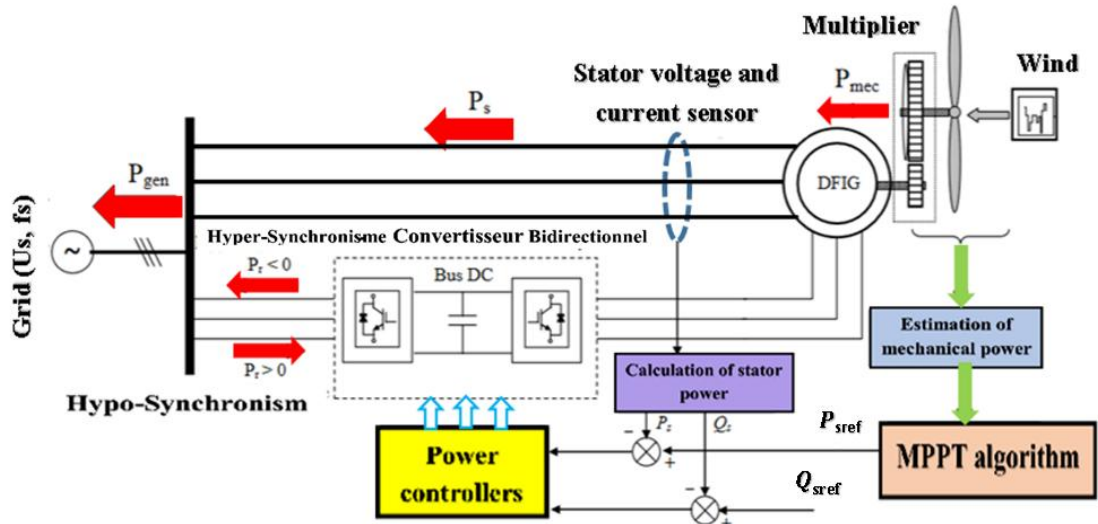


Figure II-1: Configuration d'un système éolien contrôlé connecté au réseau.

La figure II.1 montre un diagramme schématique d'un ordinateur normal pour commuter les puissances entre GADA, les commutateurs et le réseau. Le transducteur latéral rotatif fournit un contrôle dynamique et réactif de la force discrète du stator, P_s et Q_s , compatible avec le couple de référence fourni par la commande MPPT.

Sur la figure II.2, nous montrons la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent pour une turbine réelle Schelle de 1,5 MW basée sur une turbine asynchrone à rotor à double alimentation . Sur cette figure, on constate que la puissance est plafonnée à sa valeur nominale à une vitesse du vent de 12 m/s. Le positionnement des pales est impeccable dans ce cas .

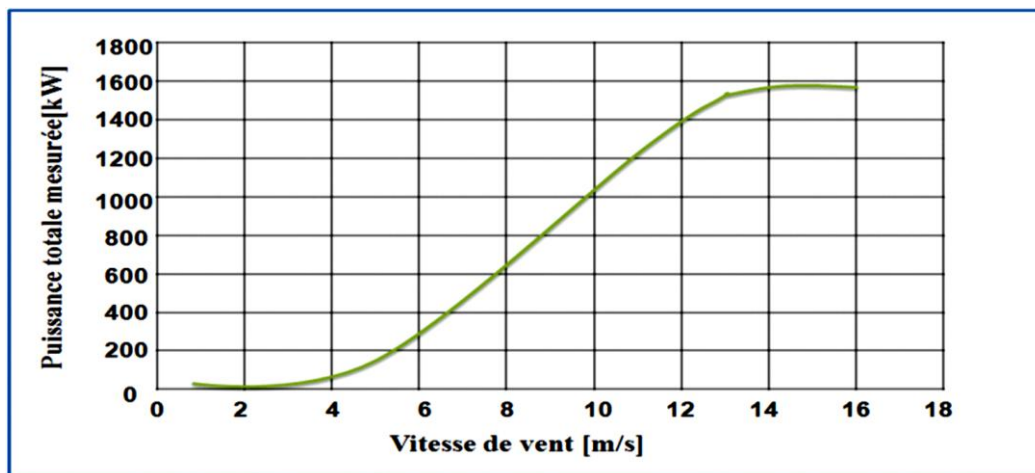


Figure II-2: Puissance totale générée mesurée en fonction de la vitesse du vent.

II.4. Les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse variable

Les principaux avantages et inconvénients de ce type sont [49]:

II.4.1. Avantages

- ❖ La captation d'énergie est maximisée grâce à la capacité du rotor à être maîtrisé en vitesse.
- ❖ Contrôle de la puissance et de l'énergie autogénérée envoyée au réseau.
- ❖ Réduction des contraintes mécaniques imposées par le groupe motopropulseur.
- ❖ Il est possible d'absorber les turbulences du vent et les rafales ; en conséquence, l'énergie captée du vent est utilisée pour entraîner l'inertie mécanique de la turbine, réduisant les oscillations de couplage .
- ❖ production d'énergie électrique de meilleure qualité.
- ❖ Ce type de machine fournit une constante de temps plus élevée pour le système de contrôle de l'angle de calage, ce qui diminue sa complexité .
- ❖ La réduction du bruit acoustique.

II.4.2. Inconvénients

- ✓ Utilisation d'équipements spécialisés
- ✓ Coûts additionnels plus cruciaux (convertisseur, commande,...).
- ✓ Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- ✓ Gestion de la transmission de puissance entre les convertisseurs et positionnement au pic de puissance de la turbine.

II.5. Modélisation de la turbine éolienne

La turbine qui sera modélisée à trois pales de longueur R qui sont fixées à un axe de rotation qui tourne à une certaine vitesse et entraîne une génératrice (GADA) à travers un multiplicateur de vitesse avec un gain G .

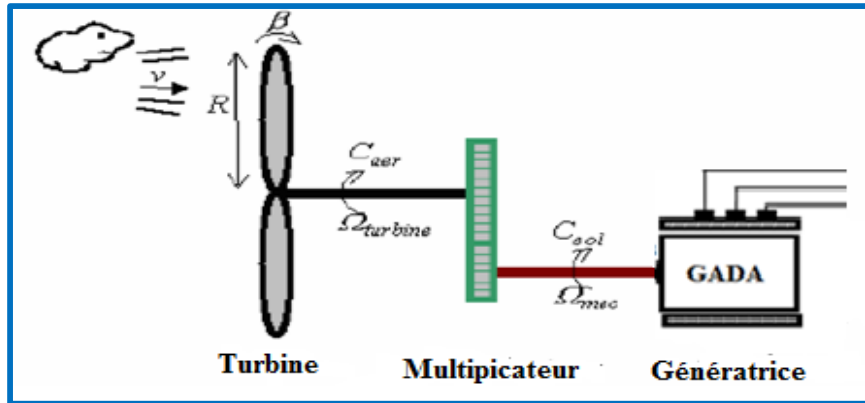


Figure II-3 : Schéma d'une turbine éolienne

Nous utiliserons une variété d'hypothèses simplificatrices, qui sont les plus souvent utilisées, pour modéliser la turbine. Donc, en supposant que [50] :

- Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air.
- Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support.
- La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable.
- La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

II.5.1. Modèle du vent

La ressource éolienne est essentielle pour un projet éolien du point de vue de sa répartition statistique et joue un rôle important dans l'estimation de la production et de la faisabilité de l'énergie. En mathématiques, la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Cependant, une éolienne à axe vertical n'est pas adaptée à la direction du vecteur vitesse du vent. Même pour une petite turbine triangulaire orientée horizontalement, cette orientation n'est pas prise en compte dans le modèle de turbine [51].

Parce qu'il est contrôlé par la dérivation sur la file d'attente de la turbine. Les expressions qui ne sont que des expressions déterminées ne peuvent décrire adéquatement le vent. Il est difficile de modéliser facilement le vent car les variables spatiales vont de quelques kilomètres à quelques centimètres et ceux entre une seconde et plusieurs mois. La vitesse du vent peut être modélisée comme une fonction déterminée par la somme de plusieurs

harmoniques .

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \sin(b_n \cdot w_v \cdot t)) \quad (\text{II.1})$$

Avec : A : une constante, a_n et b_n w_v : représentent respectivement : l'amplitude et la pulsation de l'échantillon du vent.

Le profil du vent doit répondre à deux exigences dans un contexte de modélisation théorique :

- 1) Afin d'accélérer le temps de simulation, la durée du profil doit être restreinte.
- 2) Le profil de vent doit refléter avec précision les caractéristiques du vent, telles que l'intensité, la variabilité, la distribution statistique, etc.

La composante $V_v(t)$ est donnée par :

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

La figure II.4 représente le profil du vent simulé.

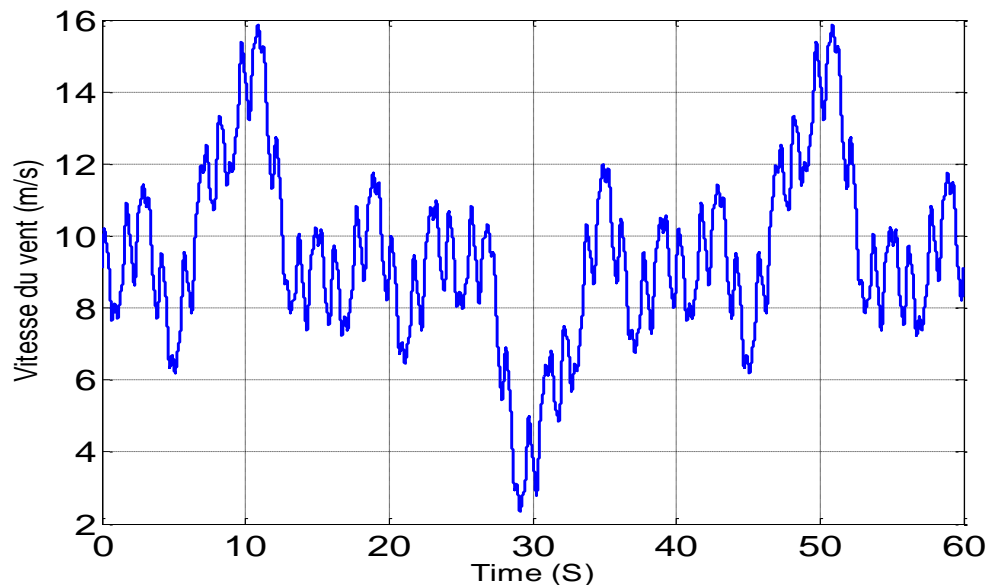


Figure II-4: Profil de la vitesse du vent.

II.5.2. Modèle aérodynamique

Le vent de vitesse V_v , appliquée sur les aubes de la turbine la fait tourner et génère une force mécanique qui est notée. P_{aero} , s'exprimant par :

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

La définition de la vitesse spécifique du vent, également connue sous le nom de rapport de vitesse, est la relation entre la vitesse linéaire du vent des particules. (Ω_t, R) et la vitesse du vent V_v :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_v} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- ρ : La densité de l'air.
- Ω_t : est la vitesse de rotation de la turbine.
- β : Angle d'orientation des pâles ou angle de calage.
- S : Surface circulaire balayée par la turbine.
- V_v : La vitesse du vent en (m/s).
- R_t : Rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

La relation entre la vitesse de ponctuation et l'angle de passage des pales détermine fréquemment le coefficient de puissance. Pour soutenir cette thèse, nous appliquerons la formule donnée dans les articles de recherche pour une centrale solaire de 1,5 MW comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{\frac{-18.4}{\lambda_i}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.02\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.6})$$

La figure II-5 montre la relation entre C_p , β et λ .

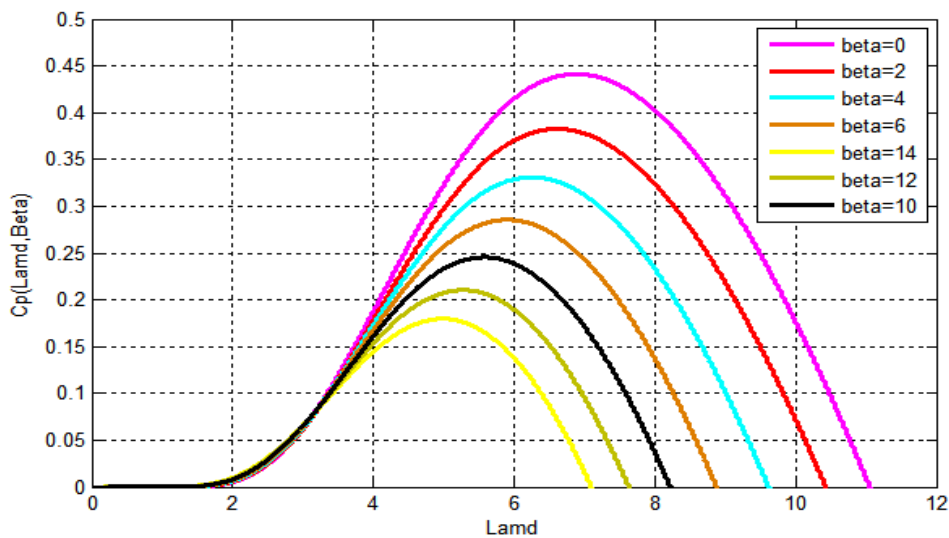


Figure II-5 : Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ de la turbine de la puissance 1.5 MW .

L'équation suivante permet de calculer le couplage mécanique C_t disponible sur l'axe principal de la turbine en fonction de la vitesse de rotation de la turbine :

$$C_t = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^3 \cdot V_v^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.7})$$

II.5.3. Modèle de la partie mécanique

Le composant mécanique de la turbine comporte trois pales réglables en longueur. R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{turb} , relié à un multiplicateur de gain G [52]. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique.

En raison de la distribution uniforme de la vitesse du vent sur les trois pôles, on suppose que les trois pôles sont de même conception et que toutes les pressions de poussée sont égales. Ceci fait, il est possible de considérer les trois plaques comme un seul système mécanique qui possède toutes les caractéristiques mécaniques listées dans la figure II.6.

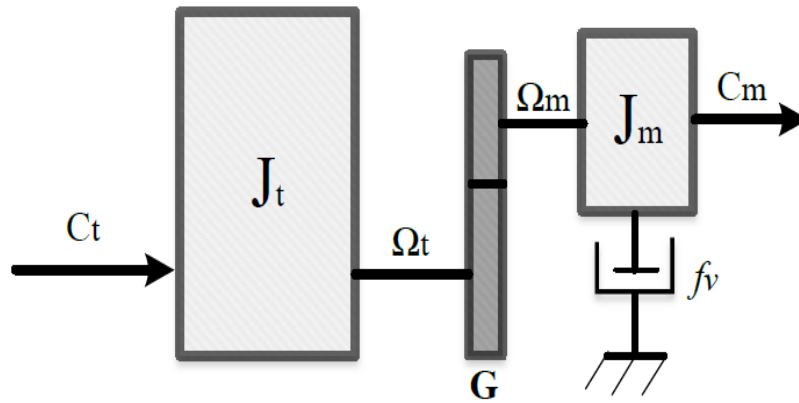


Figure II-6 : Partie mécanique de l'éolienne.

Le multiplicateur est alors représenté par les deux équations présentées à la figure II-6 :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.8})$$

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.9})$$

De plus, ce qui suit est l'équation fondamentale du système dynamique du système mécanique basée sur la mécanique de l'arbre de la GADA :

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m - C_{em} - f_v \Omega_m \quad (\text{II.10})$$

On pose : $J = \frac{J_t}{G^2} + J_m$

Avec :

- J : Moment d'inertie total du SCEE .
- J_t : Moment d'inertie de la turbine égal aux inerties des trois couches d'ozone.
- J_m : Moment d'inertie de la GADA .
- f_v : Coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA .
- C_m : Couple mécanique sur l'arbre de la GADA .
- C_{em} : Couple électromagnétique généré par la GADA .
- G : Gain du multiplicateur.
- Ω_m : Vitesse mécanique de rotation de la GADA .
- $C_f = f \Omega_{mec}$: Couple de frottement visqueux de la GADA.

Compte tenu de l'inertie et des frottements plus pâles, la voilure peut se manifester comme dans la figure. II.7

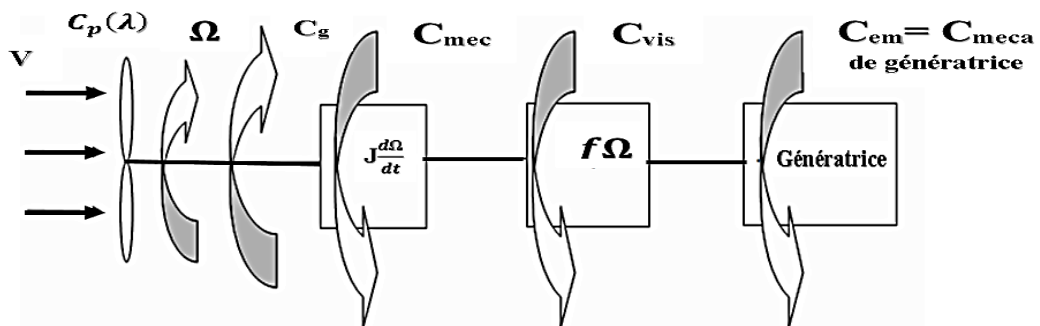


Figure II-7: Modèle d'une turbine éolienne

L'équivalent électrique d'un système illogique similaire est illustré sur la figure. II.8.

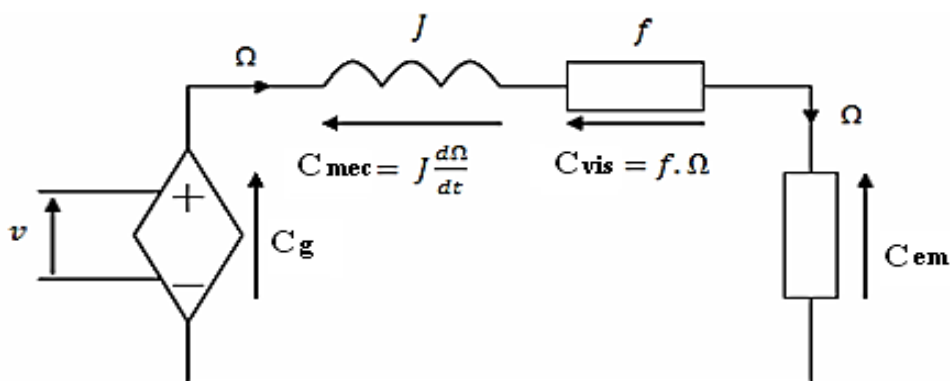


Figure. II-8: Schéma électrique équivalent de la turbine d'une éolienne

On peut enfin construire le schéma synoptique de l'éolienne représenté sur la figure II.8 en reliant les équations aérodynamiques et mécaniques.

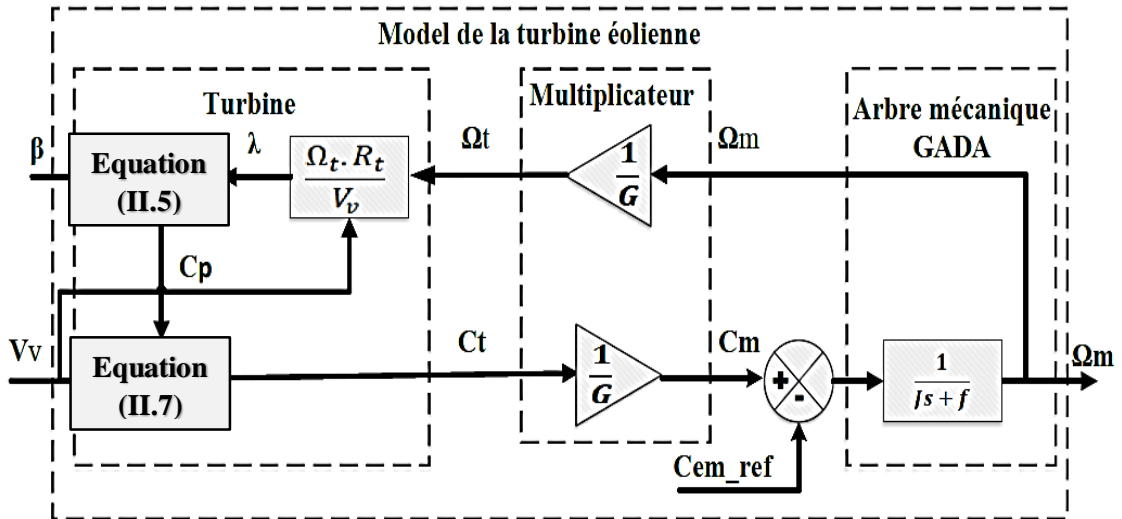


Figure II-9 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

D'après le schéma bloc de la figure II.9, la vitesse mécanique de l'arbre de la GADA résulte de l'application du couple mécanique disponible à la sortie du multiplicateur auquel s'oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette vitesse peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

II.6. Modes d'opération du système éolien à vitesse variable

Afin de gérer le vent et de capter le plus d'énergie possible tout en préservant les composants de la turbine, le système de contrôle de la turbine est essentiel. Globalement, la puissance peut être gérée en modifiant la vitesse de rotation de l'ensemble de la turbine, l'angle de passage réglable du préchauffeur et la vitesse du générateur [53]. La figure II.10, décrit les caractéristiques typiques d'un brûleur à mazout qui fonctionne à différentes vitesses de vent, où P_m et V_m représentent respectivement la puissance mécanique et la vitesse mécanique de l'huile. La création de courbes consiste à définir l'angle d'attaque idéal pour les pales.

($\beta=0$).

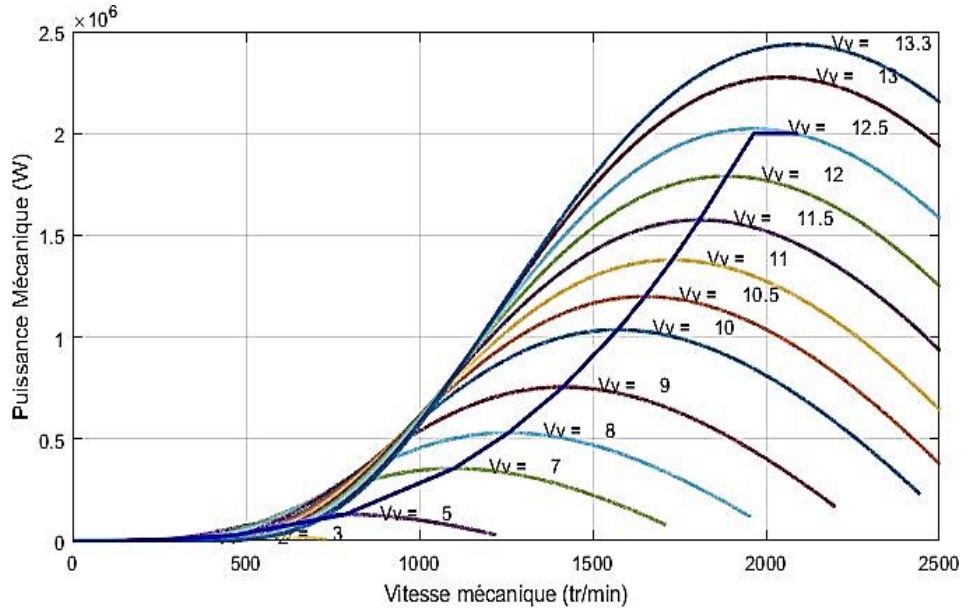


Figure II-10 : Variation de la puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique.

En fonction de la vitesse du vent et de la puissance requise par la GADA, un système de La conversion de l'énergie solaire basée sur la GADA à vitesse variable et fixe peut fonctionner dans trois zones opérationnelles uniques. La figure II.11 représente les trois zones de fonctionnement d'une turbine à vitesse variable.

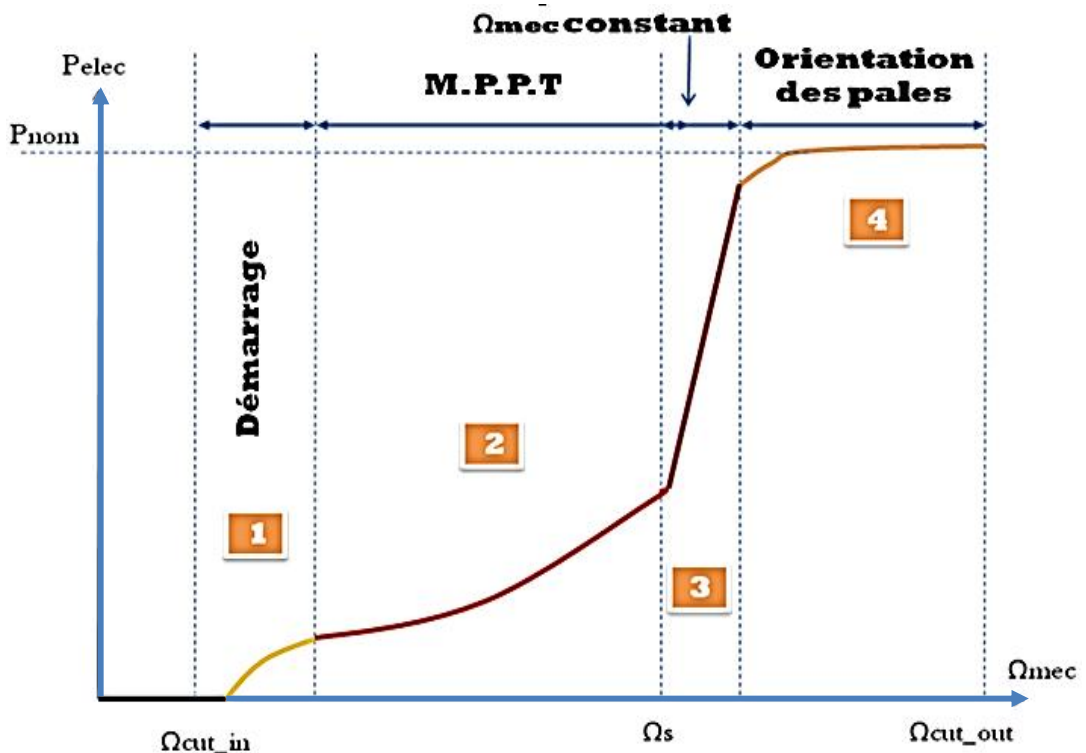


Figure II-11: Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.

Où :

La zone I : La vitesse du vent est insuffisante pour démarrer la turbine; de ce fait, la puissance mécanique et la vitesse de rotation sont nulles.

La zone II : Lorsque la vitesse du vent dépasse un certain minimum v_{\min} , la turbine se met à tourner. Une fois opérationnel, la turbine fonctionnera pour extraire la plus grande puissance possible pour de meilleures performances jusqu'à ce que la vitesse du vent atteigne le niveau souhaité. Valeur nominale v_n , qui correspond aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .

Zone III : Pour éviter la détérioration de l'huile lorsque le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse normale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues aux niveaux spécifiés. L'efficacité de la turbine peut être réduite, par exemple en limitant l'angle des pales pour imposer ces restrictions.

Zone IV : L'angle maximal d'orientation des pales a été atteint dans cette région, où le couplage électromagnétique est typiquement maintenu à sa valeur nominale, nécessitant l'arrêt de la turbine à l'aide de freins hydrauliques ou électriques.

II.6.1.Zone II : Extraction de la puissance maximale du vent (MPPT)

Différentes stratégies de contrôle sont disponibles en zone II pour réguler le couplage électromagnétique de la GADA afin de contrôler la vitesse de rotation et de maximiser la puissance électrique. Ce concept est connu sous l'acronyme MPPT. Il existe deux modes de contrôle distincts :

- le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

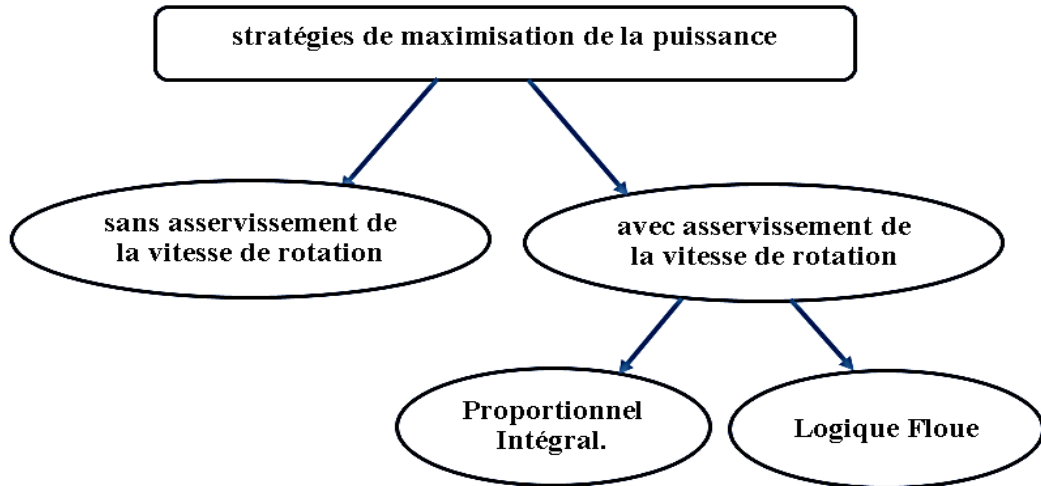


Figure II-12: Stratégies de commande de la turbine

À l'appui de cette théorie, nous porterons une attention particulière à un certain nombre d'aspects opérationnels de la zone II de la turbine.

II.6.2.Zone III : Contrôle des variations du pas des pales (limitation de la vitesse et la puissance)

Pour maintenir la puissance de sortie de la génératrice à sa valeur nominale, un contrôleur est fait pour tourner tous les pales au même angle ou indépendamment. dans cette zone les unes des autres. Cette régulation indépendante donne plus de latitude au système de contrôle, réduit les contraintes sur le terrain et renforce l'intelligence du système de contrôle pour les éoliens. De nombreuses forces et relations sont impliquées pendant qu'un ami se déplace, dans l'analyse d'un système de contrôle dynamique. Il est crucial de reproduire à la fois la structure dynamique du pôle et le flux d'air autour des pales afin de représenter avec précision ces paires. Contrôle MPPT en tenant compte de la vitesse de rotation. La stratégie de contrôle consiste à ajuster le couplage électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse de rotation mécanique à une vitesse de référence qui permettra à la turbine de produire sa puissance maximale. Par conséquent, il est nécessaire de faire une évaluation de la vitesse de rotation de la GADA. Pour un certain point de fonctionnement ((vitesse du vent fixe), la puissance mécanique est à son maximum si la valeur maximale du coefficient C_p est atteinte. Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} [54].

L'équation suivante décrit comment la vitesse de rotation de référence de la turbine est déterminée:

$$\Omega_{t_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R_t} \quad (II.11)$$

Nous pouvons obtenir la vitesse de rotation de la GADA en prenant en compte le gain du multiplicateur :

$$\Omega_{m_ref} = G \Omega_{t_ref} \quad (II.12)$$

La figure II.13 illustre les principes fondamentaux de cette stratégie de contrôle, où la vitesse du vent mesurée V_v est utilisée pour générer la vitesse de référence de la génératrice Ω_{m_ref} basée sur le rapport de la vitesse optimal λ_{opt} . Les convertisseurs de puissance sont chargés de réguler la vitesse de génératrice, qui sera égale à sa vitesse de référence une fois le MPPT atteint. Deux types différents de régulateurs ont été utilisés dans ce travail pour contrôler la vitesse lors de l'utilisation de ce style de pilotage : l'un est un régulateur de type PI, et l'autre est un régulateur de type LF.

II.6.3. Contrôle avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI

En raison de sa forme simple et de sa mise en œuvre simple, l'algorithme du contrôleur PI est sans aucun doute l'algorithme de contrôle de processus le plus fréquemment utilisé dans l'industrie. L'activité de ce type de régulateur est à la fois proportionnelle et intégrale [55]. Elle a, en effet, amélioré à la fois les états stables et transitoires. Ce contrôle PI détermine une valeur "d'erreur" comme la différence entre un point de référence souhaité et une variable de procédé mesurée. Le principe du schéma de la commande MPPT avec préservation mécanique de la vitesse de rotation est illustré à la figure II.13.

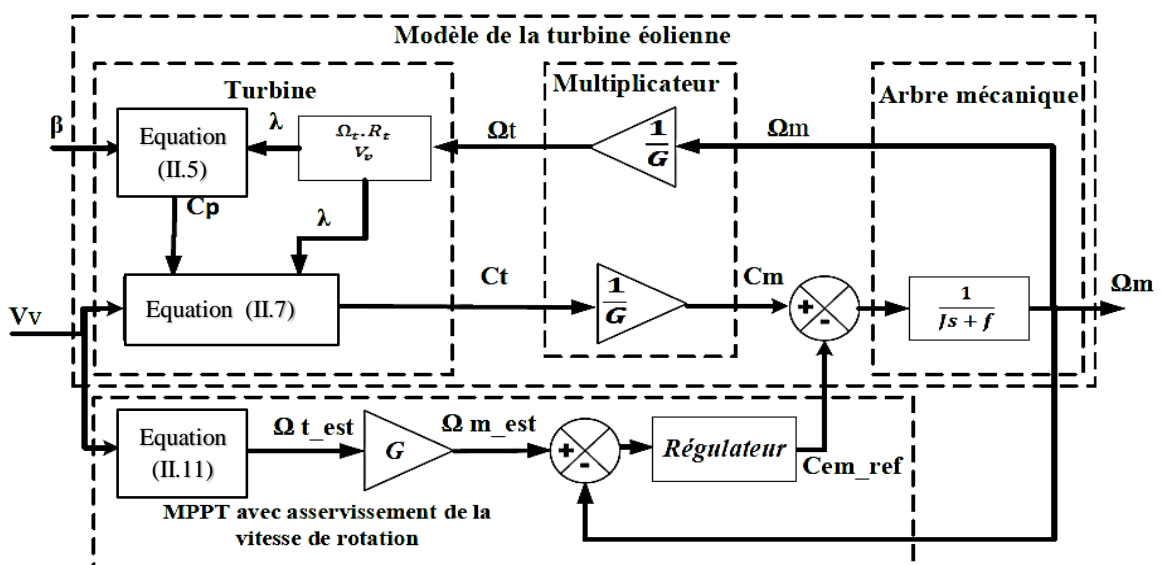


Figure II-13: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

La vitesse de rotation sera gérée dans cette partie par le contrôleur (PI). Une restriction sur le couple de référence à la sortie de l'unité de contrôle est utilisée pour éliminer tout dépassement de couple qui pourrait nuire aux performances du système tout en réduisant l'erreur statistique et en accélérant le temps de réponse.

En raison de leur efficacité technique, l'utilisation de contrôleurs à virgule flottante est fortement conseillée lorsque le modèle mathématique du système est non linéaire ou lorsque l'obtention d'un modèle mathématique est difficile. Ces contrôleurs deviennent de plus en plus courants, notamment dans les procédés industriels.

Sans même avoir besoin d'un modèle détaillé ni d'aucune connaissance préalable du système à contrôler, la méthode de commande BF permet de générer des lois de réglage souvent très efficaces. Au lieu de traiter une relation mathématique clairement définie, le régulateur à logique floue (RLF) utilise de nombreuses règles incohérentes et basées sur des éléments linguistiques. Il est possible de créer diverses incohérences de règles en utilisant l'expertise dont disposent les opérateurs d'une certaine opération technologique [56]. Nous passerons en revue les idées fondamentales derrière la structure de commandement logique du flux ainsi que les étapes impliquées dans la création d'un paramètre à l'aide de cette commande. Nous examinerons les avantages et les inconvénients ainsi que les procédures impliquées dans la création à l'aide d'un RLF pour contrôler la vitesse de la turbine.

II.6.4.Principes généraux d'une commande par LF

L'illustration ci-dessous décrit la structure de base d'un RLF. La fuzzification, la base de connaissances, le moteur d'inférence et la défuzzification sont ses quatre principaux éléments de construction [57].

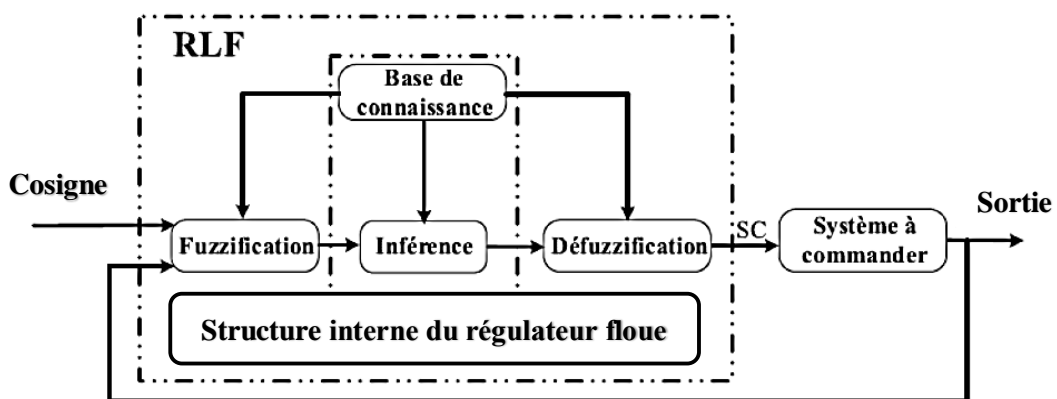


Figure II-14 : Configuration de base d'un régulateur par LF.

Un RLF doit transformer les entrées numériques en valeurs flottantes, les traiter à l'aide de

règles flottantes, puis modifier le signal de commande de valeurs flottantes en valeurs physiques à appliquer au système puisque le système de contrôle n'accepte que des valeurs physiques. Les tâches suivantes pour chaque bloc peuvent être résumées [58] :

II.6.4.1.Fuzzification

La première étape consiste à relier un sous-ensemble spécifique qui a été ignoré à la valeur d'une variable spécifiée (vitesse, couple, courant, tension, etc.). Afin d'exprimer quantitativement les variables linguistiques, des "fonctions d'appartenance" sont utilisées, qui quantifient les incertitudes associées à l'appartenance de la variable à ce groupe. Les entrées et les sorties d'un système utilisant des mots du langage naturel comme valeurs sont des variables linguistiques. Ce sont des variables non numériques, utilisées pour définir des déclarations factuelles. Ces variables linguistiques ont été choisies pour simuler les observations d'un être humain qui classe les phénomènes comme positifs, négatifs, nuls, grands, petits ou moyens. Cette collection crée un univers de discours. Le bloc de fuzzification remplit les fonctions suivantes [59] :

- Détermine, en fonction des valeurs des variables d'entrée, détermine les plages de valeurs des fonctions d'appartenance.
- Transforme les données d'entrée en valeurs. supprimer le point pouvant être utilisées comme étiquettes d'ensembles flous et linguistiquement correctes.

II.6.4.2.Base de connaissance

La base de connaissances contient des détails sur la sortie attendue de la commande et sa portée. Il comprend une « base de données » et une « base de règles de commande linguistiquement ambiguës ». Alors que la base de règles représente la stratégie de commande et le but recherché à l'aide de règles de commande linguistiques, des définitions sont faites par la base de données afin de fournir des règles de fonctionnement et de contrôler les données flottantes dans un RLF [60]. Les règles erronées sont exprimées par les termes SI conditionnel et ALORS déductible. Ils permettent d'inclure des conditions finales. Lorsqu'une règle comporte plusieurs critères, ils sont reliés les uns aux autres à l'aide de l'opérateur AND.

II.6.4.3.Inférence

La variable de sortie mesurée de manière erronée, il s'exprime aussi de manière linguistique, est reliée à la quantité d'entrée mesurée de manière incorrecte par flexion, qui est basée sur des règles erronées. L'inflexion d'un RLF est considérée comme son cerveau.

Il a la capacité de simuler la prise de décision humaine et d'identifier les actions de commande incorrectes en utilisant des règles d'implication et d'inflexion incorrectes [61].

II.6.4.4. Défuzzification

La défuzzification est le processus consistant à transformer des données erronées résultant d'interférences en données correctes pouvant être utilisées immédiatement. Il exerce les missions suivantes [62] :

- Détermine, En fonction des valeurs des variables de sortie, plages de valeurs pour vos fonctions d'appartenance.
- Applique une défuzzification au signal inféré pour créer un signal de contrôle non flottant.

La méthode de défuzzification la plus populaire utilise la relation suivante pour identifier le centre de gravité de la fonction d'opposition résultante :

$$V_R = \frac{\int_{-1}^1 X_K U_R(X_K) dX_K}{\int_{-1}^1 U_R(X_K) dX_K} \quad (\text{II.20})$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de surface. Cette méthode sera appliquée à un cas concret dans la section suivante.

II.6.5. Avantages et inconvénients de la commande par LF

Comme toutes les autres commandes, la commande par la LF présente des avantages et des inconvénients. Les avantages les plus significatifs sont les suivants [63]:

- L'absence de besoin de modélisation.
- La capacité de combiner l'expertise du langage de l'opérateur de processus avec sa maîtrise des comportements avec une logique sophistiquée (souvent non linéaire et difficile à modéliser et à prévoir).
- atteindre régulièrement des performances dynamiques améliorées.

Les inconvénients de la commande par régulateur à LF sont :

- L'absence d'instructions détaillées pour la conception des paramètres (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- La mise en œuvre des connaissances de l'opérateur est souvent difficile ; l'absence d'un modèle fiable pour montrer la stabilité globale du circuit de contrôle.
- La possibilité de cycles limités résultant d'un fonctionnement non linéaire.

- La cohérence des infractions n'est pas garantie (l'émergence de règles de flexion contradictoires est possible).

II.6.6 . Conception des régulateurs flous pour le réglage de la vitesse de rotation

La figure II.15 décrit le schéma de fonctionnement du système utilisé avec le contrôleur flottant, qui dans ce cas a deux entrées et une sortie. Le couple électromagnétique de référence est la grandeur de sortie et les deux valeurs d'entrée sont l'erreur (E) entre la vitesse de référence et la vitesse mesurée et la variation de l'erreur (E).

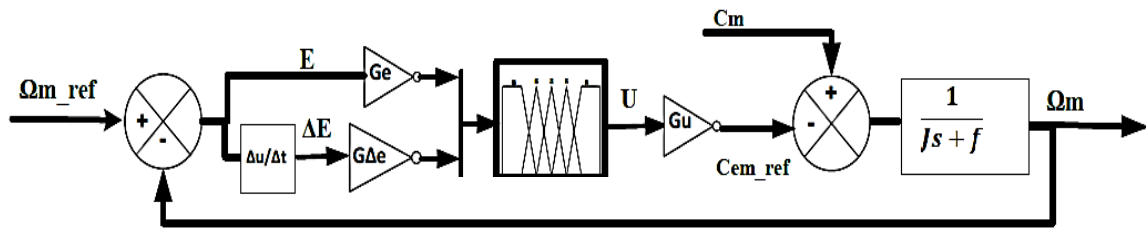


Figure II-15 : Régulation de la vitesse mécanique en boucle fermée à l'aide d'un contrôleur flou.

Selon le schéma fonctionnel de la régulation de vitesse, G_e , $G_{\Delta e}$ et G_u sont des gains associés respectivement à E , ΔE et U . Ces gains jouent un rôle dans la garantie de l'évolutivité, de la stabilité et de l'établissement des performances dynamiques et statiques souhaitées.

Pour trouver la meilleure performance d'ajustement dans ce travail, qui est représenté par un ensemble de fonctions, nous avons utilisé un régulateur qui a équilibré trois groupes, comme le montre la figure II.16.

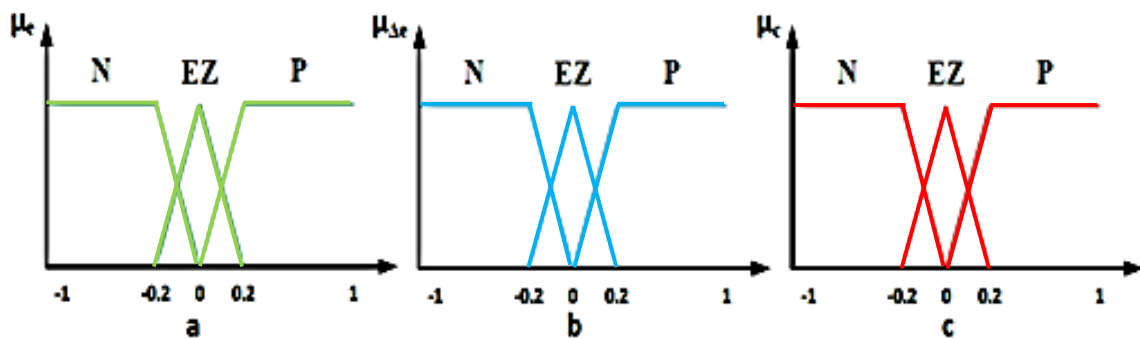


Figure II-16: Fonctions d'appartenances utilisées pour RLF pour les deux boucles descourants. (a) : Erreur, (b) Dérivée de l'erreur et (c) : La commande.

Le signal de sortie du régulateur peut être déterminé à l'aide des règles flottantes basées sur les signaux entrants. Elle utilise des contraintes linguistiques qui tiennent compte de l'expérience d'un opérateur humain pour traduire les signaux de sortie en signaux d'entrée. Par exemple, si l'erreur et sa variation sont toutes deux très négatives, le signal de sortie doit également être très négatif. Cependant, si l'erreur et la variation sont proches de zéro, l'ordre restera le même. Ces réflexions nous ont incités à créer un tableau qui résume les règles sur lesquelles nous nous sommes finalement arrêtés.

Commande		Erreur		
		N	EZ	P
Dérivée d'erreur	N	N	N	EZ
	EZ	N	EZ	P
	P	EZ	P	P

Tableau II-1 : Table de règles pour le RLF des courants rotoriques.

II.7 . Résultats simulation de la turbine en MATLAB/SIMULINK

Le couple électromagnétique de référence permettant d'avoir une vitesse de rotation égale à sa valeur de référence obtenue en sortie du régulateur de vitesse. Des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI), Logique Floue (LF) permettent augmentant ainsi la vitesse de rotation et atténuant l'effet de la paire GADA, qui est considérée comme une perturbation. Dans ce travail, deux types d'asservissement sont envisagées pour égaler la vitesse mécanique à la consigne qui est fonction de la vitesse du vent.

- une régulation basée sur une loi linéaire de type PI .
- une régulation basée sur la technique non linéaire par logique floue.

Le modèle de la turbine se déduit aisément des les équations en-dessus . Il est représenté sur la figure II.17

puissance TE pour les deux ordres examinés. La variation de puissance mécanique est égale à la variation de vitesse de la GADA et à la variation de vitesse du vent, respectivement. Équivalente à la variation de vitesse mécanique. Où les résultats sont extrêmement proches des valeurs de référence et le taux d'erreur est toujours négligeable et proche de zéro. Les résultats finaux de cette stratégie montrent de fortes performances statiques et dynamiques, ce qui soutient l'utilisation de la méthode MPPT pour contrôler la turbine.

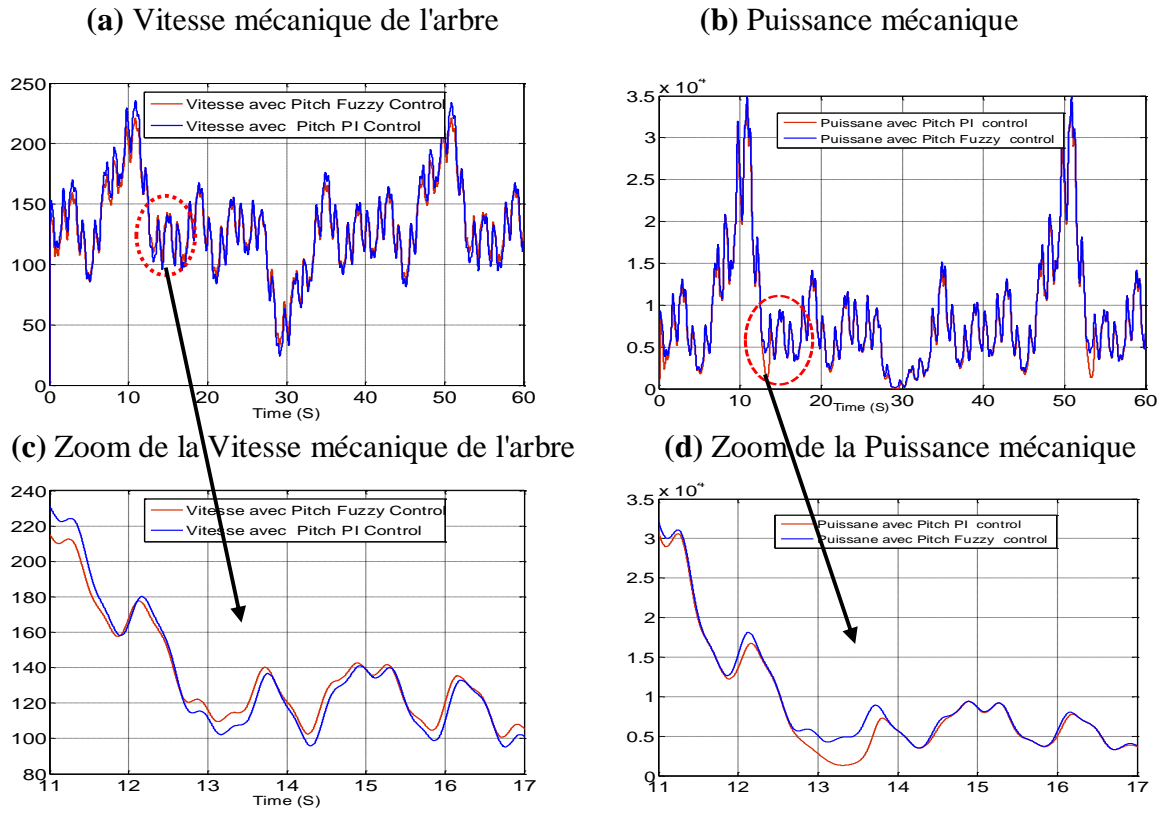


Figure II-19 : Vitesse mécanique Ω_m et Puissance mécanique avec asservissement de la vitesse à base des régulateurs PI et flous

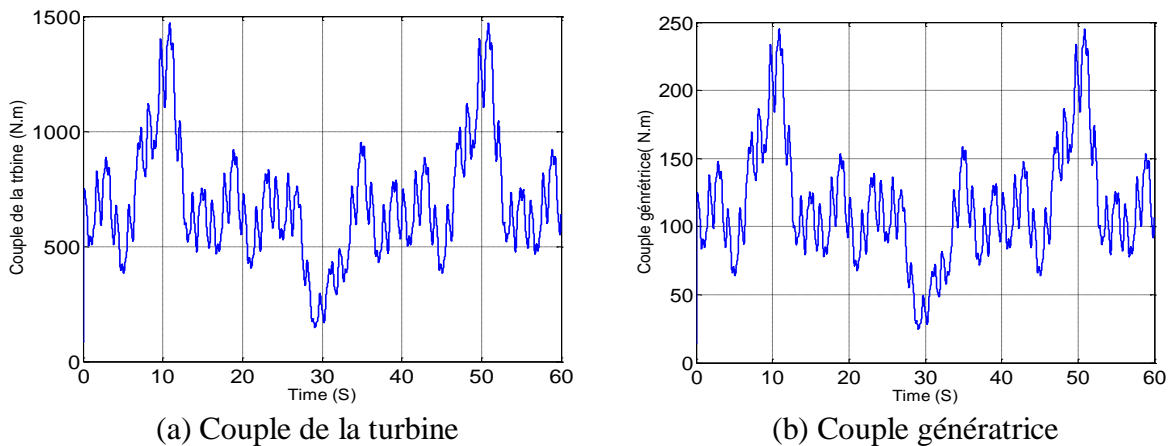


Figure II-20 : Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

II.8 . Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle mathématiquement simplifié de TE. Ensuite, en utilisant des méthodes de contrôle MPPT , nous avons abordé la question du contrôle MPPT pour SE fonctionnant à des vitesses variables. Il est basé sur deux régulateurs, l'un de type PI et l'autre de type LF. De plus, l'objectif de notre travail était de développer et de tester une chaîne basée sur la GADA pour convertir l'éthane en énergie. Le processus examinera et simulera la CV. Nous pouvons avoir des meilleures performances en termes de stabilité, de temps de réponse, de dépassement des limites et de systèmes plus efficaces grâce à l'étude précédente des résultats. Les essais de simulation faits sur la commande la vitesse mécanique de l'éolienne en zone 2 nous ont permis de comparer les deux commandes. Or la méthode permet une meilleure poursuite de la vitesse de rotation optimale, et donc l'obtention d'un meilleur rendement aérodynamique.

CHAPITRE III

*commande classique du système de
conversion à base d'une GADA*

III.1.Introduction

L'une des techniques les plus fréquemment utilisées pour contrôler les équipements électriques. Elle est basée sur une loi de commande qui a une caractéristique de régulation ressemblant à un courant continu à excitation isolée [64]. Le contrôle vectoriel du GADA impliquera la gestion des échanges d'énergie, y compris les transferts de puissance active et réactive qui se déplacent sur le réseau.

Dans ce cas, le point de référence (d, q) est basé sur le flux statique. La commande, naturellement, concerne les puissances envoyées à travers le réseau; par conséquent, le stator (générateur de convention) est à l'origine de la commande et le rotor à l'origine de la commande (récepteur de convention) [65].

Le but de ce chapitre est d'introduire des algorithmes de contrôle vectoriel pour le contrôle de la puissance active et réactive générée basé sur un générateur asynchrone à double alimentation (GADA), où les phases statoriques de ce dernier sont reliées par une sinusoïdale triphasique. Ce type de régulateur est encore le plus fréquemment utilisé pour contrôler le GADA et dans de nombreux systèmes de régulation industriels [66].

III.2. Modélisation de la GADA

Voici un modèle de la double machine asynchrone alimentée par un onduleur MLI. Nous avons besoin d'avoir un modèle de la machine avec une compréhension plus ou moins précise des composants qui la composent pour la faire fonctionner, un peu comme beaucoup d'autres processus. Mathématiquement, le GADA peut être représenté par un modèle dont les sorties sont sous forme de fonctions de transfert ou encore sous forme d'équations à variables d'état.

Les équations électriques de la GADA dans le repère dq peuvent s'écrire [67] :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

Avec:

$$\omega_r = \omega_s - P \cdot \Omega \quad (\text{III-2})$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

$L_s = l_s - M_s$, $L_r = l_r - M_r$: inducteurs cycliques de la phase statorique et du rotor ;

$[l_s], [l_r]$: Inductances adaptées aux phases stator et rotor;

M_s, M_r : Inductances Entre deux phases de stator et de rotor respectivement;

M : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique (les axes des deux phases coïncident).

L'expression du couple électromagnétique GADA en fonction des flux et des courants statoriques s'écrit :

$$C_{em} = P(\phi_{ds}, i_{qs} - \phi_{qs}, i_{ds}) \quad (\text{III-4})$$

Avec P : nombre de paires de pôles de la GADA.

Les forces statiques et rotatives actives et réactives de GADA s'écrivent comme suit [68] :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

Le flux statorique est perpendiculaire à l'axe d. En conséquence, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} = \Phi_s \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

Selon la condition d'orientation du flux et l'équation du flux stator, les courants statoriques sont décrits comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = -P \cdot \frac{M}{L_s} \phi_{ds}, i_{qr} \quad (\text{III-8})$$

Les machines de puissance moyenne à élever sont fréquemment utilisées dans la production d'énergie éolienne. Par conséquent, nous ne prenons pas en compte la résistance du stator. En partant du débit constant du stator, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

V_s : est la tension du réseau.

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \Phi_s = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s \cdot i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

La CV du GADA permet d'écrire des expressions de puissance.

$$\begin{cases} P_s = v_{qs} i_{qs} = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} = V_s \left(\frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \right) = \frac{V_s \cdot \Phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

III.3. Lois de la commande vectorielle appliquée à la GADA

L'objectif principal du contrôle vectoriel des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique en employant un cadre de contrôle similaire aux machines à courant continu. Il faudra donc déterminer la quadrature naturelle entre courant et flux pour une machine à flux continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas, le couplage se produit entre la puissance active et réactive du stator. La méthode orientée flux consiste à sélectionner un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction souhaitée du flux, qui peut être rotorique, statorique ou directionnelle. Cette représentation nous permet d'avoir deux composantes directes disposées quadratiquement, l'une pour le flux statique et l'autre pour le courant tournant [69].

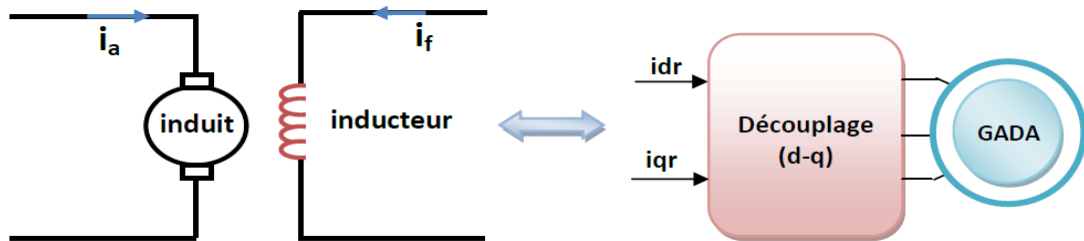


Figure III-1: Principe de la commande vectorielle d'une GADA

III.4. Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique

Afin de développer les équations qui relient les valeurs des tensions et courants rotoriques générés par un onduleur aux puissances statoriques actives et réactives, nous nous intéresserons à un contrôle indépendant des puissances actives et réactives [70]. La figure III.2 montre comment la tension et le flux statorique sont orientés.

Dans cette étude, on sélectionne l'orientation du flux statorique selon l'axe d de référence biphasé. (d, q) lié au champ tournant [71].

On a donc: $\phi_{ds} = \Phi_s$ et $\phi_{qs} = 0$

L'équation GADA est alors exprimée sous forme d'équations (III.1) et (III.3).

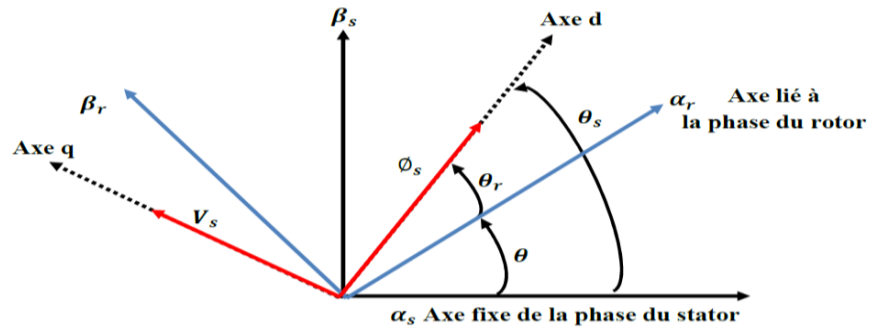


Figure III-2: Orientation de la tension et de flux statorique.

III.5 . Stratégie de commande en puissance active et réactive de la GADA

La possibilité de fonctionner à vitesse variable conformément à la caractéristique de puissance optimale de l'éolienne était un avantage de l'utilisation du GADA. Cette caractéristique démontre qu'il existe une vitesse de rotation idéale (correspondant à la plus grande valeur du coefficient de puissance C_p) pour chaque vitesse de vent, permettant à l'éolienne de fonctionner à son niveau de rendement le plus efficace. La turbine doit avoir un certain couple mécanique résistant, ou puissance active, pour pouvoir tourner à cette vitesse idéale à une certaine vitesse de vent par la GADA. La machine peut alors être gérée en exploitant cette référence de puissance. Pour ce faire, nous identifierons les équations qui relient les puissances statoriques actives et réactives aux variables rotoriques avec lesquelles nous opérons pour réguler la machine [72].

III.5.1. Objectif du contrôle des puissances et des courants

Le concept de contrôle vectoriel de puissance est appliqué. Il s'agit de faire suivre au GADA une consigne de puissance avec la dynamique électrique optimale, tout en tenant compte de la limite de fréquence de découpage des interrupteurs du convertisseur de puissance. La figure III.3 représente le schéma fonctionnel de la CV. Des régulateurs de puissance de type PI sont utilisés. Ils permettent d'atteindre à la fois une bonne dynamique et une bonne résilience. Nous maintenons un facteur de puissance unitaire côté stator pour parvenir [73].

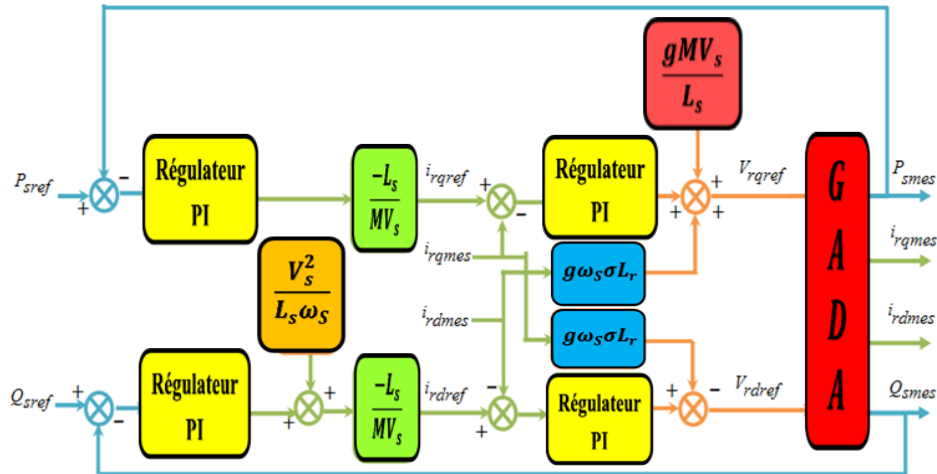


Figure III-3: Schéma de principe de la CV en Puissance de la GADA

III.6. Convertisseur MLI

Le rotor du GADA est alimenté par un onduleur DC à tension constante, et la tension de ce dernier est régulée par une technologie de MLI qui permet d'ajuster en même temps la fréquence et la tension de sortie de l'onduleur [74].

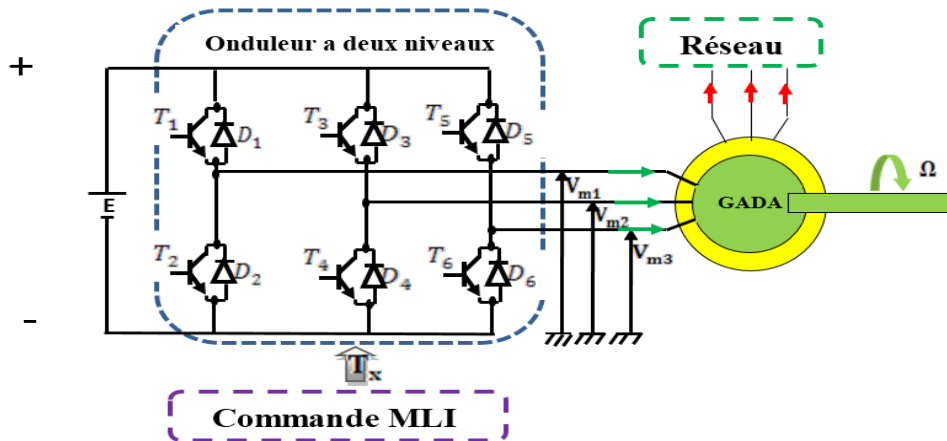


Figure III-4 : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

III.6.1. Onduleur a deux niveaux

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui convertit le courant alternatif en CC. Il utilise une commutation forcée et est généralement construit avec des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT). Il peut être contrôlé à l'aide de l'approche

traditionnelle ou de la technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM). L'approche PWM est utilisée pour réguler l'onduleur de tension dans cette étude [75].

L'onduleur est le cœur battant du système électrique. Il est composé de trois leviers distincts, chacun avec deux interrupteurs. Le transformateur est composé d'un transistor et d'une diode. Il permet de soumettre le dispositif à des tensions ou courants variables d'amplitude et de fréquence. La figure III.5 représente le schéma de base d'un onduleur triphasé alimentant la machine.

Un convertisseur de tension à deux niveaux équipé de dispositifs semi-conducteurs ouverts et fermés entraîne le rotor GADA. Pour faciliter la modélisation des transducteurs, les commutateurs à semi-conducteurs sont supposés sans défaut [76].

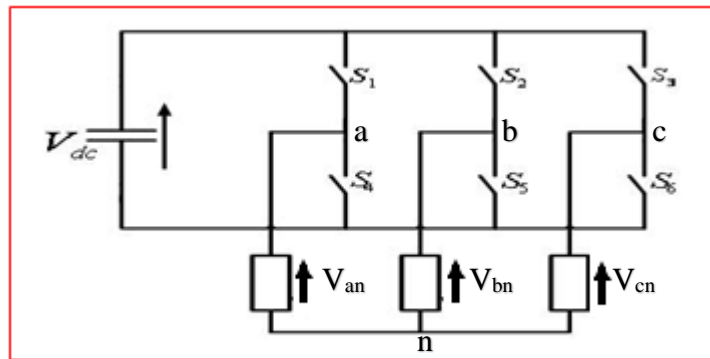


Figure III-5 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Alors les tensions composées à la sortie du transformateur s'expriment par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-14})$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technologie de MLI sinusoïdale triangulaire (PWM) qui permet une modulation simultanée de la fréquence et de la valeur efficace de la tension de sortie [77].

III.6.2. Stratégie de commande à MLI

La méthode de modulation de taille d'impulsion triangulée consiste à comparer un signal triangulé à chaque instant ωt de fréquence f_P Quelque chose que nous appellerons le "portable", avec trois signes de commande notés V_a, V_b et , ces signaux V_i avoir les images de stress que l'on voudrait appliquer à chaque étape. Les commutations d'interrupteurs ont lieu lorsqu'il y a égalité de type [78]- [79].

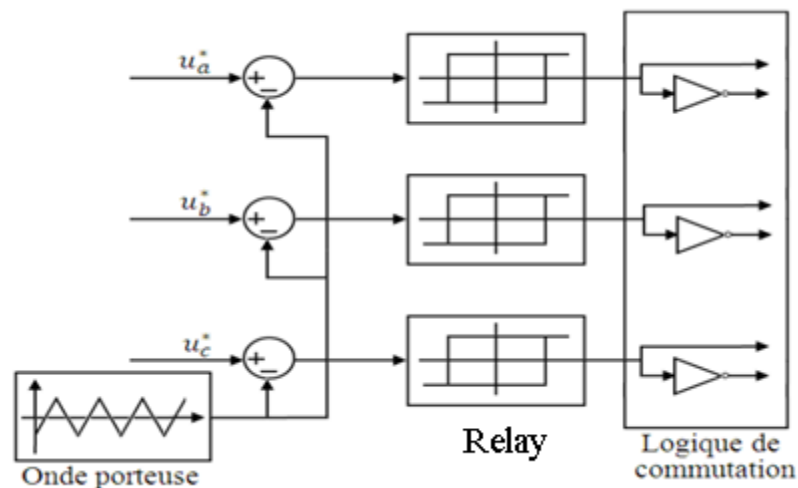


Figure III-6 : Principe de la commande MLI.

$$V_i(t) = w(t) \quad (\text{III.15})$$

Cette stratégie se caractérise par deux facteurs :

- ❖ L'indice de modulation « m » est décrit comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_P sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_P}{f} \quad (\text{III.16})$$

- ❖ Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V) et Celle de la porteuse (U_P) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_P} \quad (III.17)$$

On peut éliminer les harmoniques d'ordre trois, qui sont un inconvénient de cette approche, en choisissant un indice de modulation « m » multiple de trois. Cependant, le taux de modulation « r » varie en fonction de la référence imposée.

III.6.3. Algorithme de commande

Deux étapes peuvent être utilisées pour résumer la méthode de commande de stratégie triangulée sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras [80] :

❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_P \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{ref} < U_P \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (III-18)$$

Tel que V_{dc} est la tension du bus continue.

❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (III-19)$$

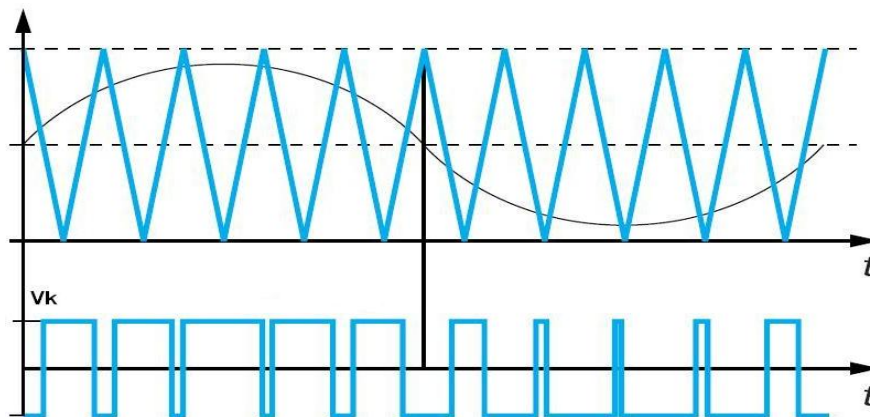


Figure III-7 : Principe de fonctionnement de la technologie PWM trigonométrique sinusoïdale à vecteur unique

La tension composée d'une phase à la sortie de l'onduleur.

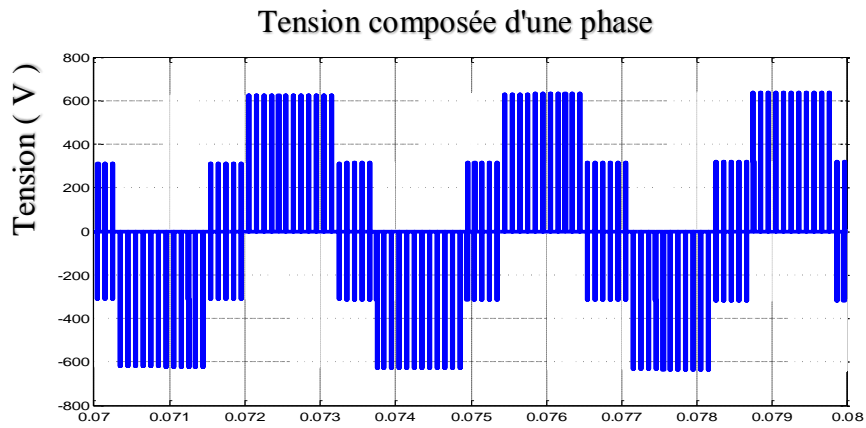


Figure III-8: Tension composée à la sortie de l'onduleur

Un schéma fonctionnel dans le repère d – q est présenté dans la figure III.9.

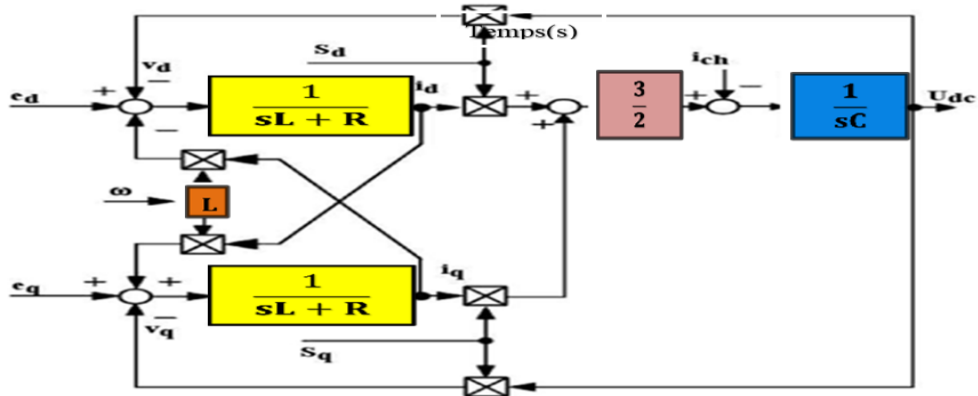


Figure III-9 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI de tension dans le référentiel tournant d – q

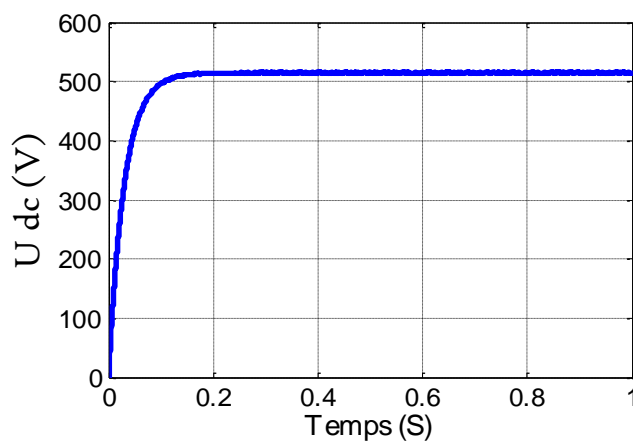


Figure III-10 : Tension du bus DC

L'évolution de la tension vectorielle continue est illustrée à la figure III.10, qui montre ce qui suit:

- Dans un temps de réponse plus rapide et sans dépassement, la tension du bus continu atteint la consigne de 514,6 V.
- La forme de la tension vectorielle continue est plus douce, ce qui a l'avantage de modifier la vitesse du vent. Le rotor, en maintenant le vecteur continu dans une phase de tension constante et en utilisant la puissance réactive QL en chargeant à zéro. La tension vectorielle continue dans la figure III.11, qui est représenté comme un spectre harmonique :

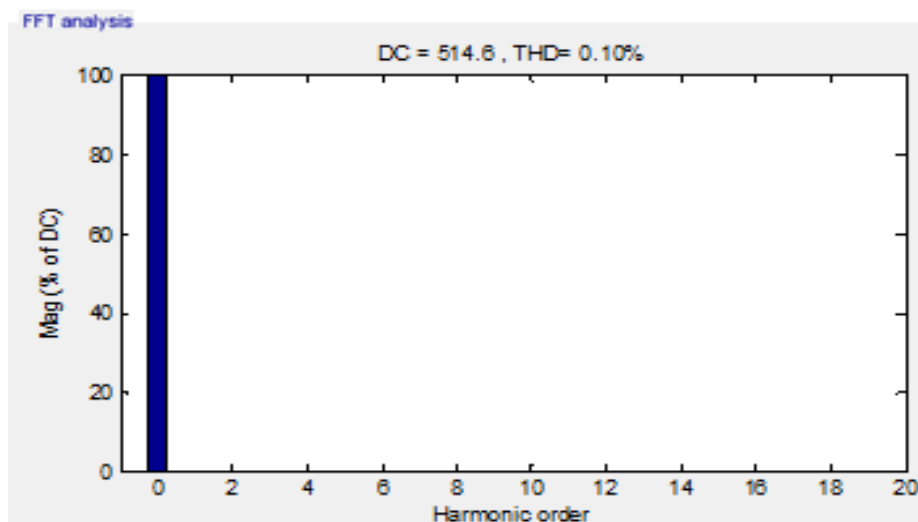


Figure III-11: Spectre d'harmoniques de contrôle de tension de bus DC.

Le spectre harmonique de cette tension a un très faible THD de 0,10 %, comme illustré sur la figure III.11. De plus, les ondulations de cette tension sont assez modestes.

III.7. Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

Pour le réglage de la puissance active, le régulateur proportionnel intégral (PI) est utilisé. Il est facile à déployer, rapide et réactif à la GADA, offrant performance satisfaisante Pour un examen global du système éolien, c'est ce qui a retenu notre attention [81].

III.7.1. Calcul des régulateurs des courants rotoriques

Dans cette méthode, nous commençons par la synthèse des correcteurs PI de la boucle intérieur, à savoir les courants dans ce cas. Si le découplage réussit, on obtient :

$$\frac{i_{dr}^*(s)}{V_{dr}^*(s)} = \frac{1}{Y_r + s} \quad (\text{III} - 20)$$

Le schéma synoptique de la figure III.12 représente la boucle de régulation de courant i_{dr}^* :

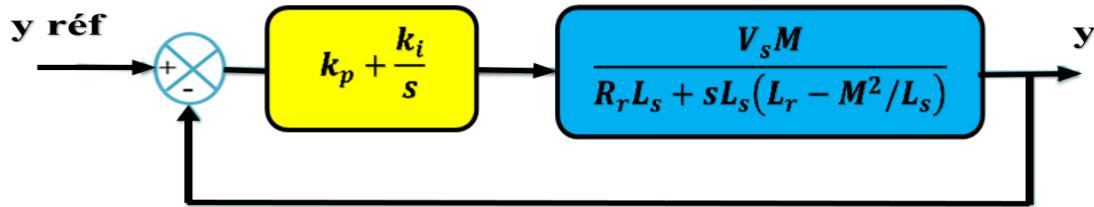


Figure III-12 : Schéma fonctionnel de régulation du courant i_{dr}

La fonction de transfert en boucle fermée (BF) est :

$$\frac{i_{dr}(s)}{i_{dr}^*(s)} = \frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (Y_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} \quad (\text{III-21})$$

Pour que le système basse fréquence se comporte comme un système du premier ordre dont la

fonction est de convertir $\frac{1}{1 + \tau \cdot s}$; Il faut que :

$$\frac{k_{pdr} \cdot s + k_{idr}}{s^2 + (Y_r + k_{pdr}) \cdot s + k_{idr}} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{III-22})$$

Après simplification on aura :

$$k_{pdr} = \frac{1}{\tau}, \quad k_{idr} = \frac{Y_r}{\tau}$$

Avec : $\tau < \tau_e$

τ_e : La constante de temps électrique du système.

Dans notre cas $\tau_e = L_r/R_r = 0.03$ s.

Nous avons choisi $\tau = 0,002$ s pour avoir une dynamique plus rapide du processus. L'application numérique nous dit : $k_{pdr} = 500$, $k_{idr} = 62040$. Les deux coefficients k_{pdr} , k_{idr} seront déterminés de la même manière que l'idr actuel, $k_{pdr} = 500$, $k_{idr} = 62040$.

III.7.2. Calcul des régulateurs des puissances

La fonction de transfert en boucle fermée est la même pour les deux axes de puis nous calculons les Ps et Qs des puissances .ne pas répéter les calculs, nous utilisons Y(s) au lieu de

Ids ou Iqs.

$$FTBF = \frac{Y^*}{Y} = \frac{PI(s)*H(s)}{1+PI(s)*H(s)} \quad (III-23)$$

Avec :

$$PI(s) = \frac{K(T_i s + 1)}{s} \quad (III-24)$$

$$H(s) = \left(\frac{1}{R_r + L_r \sigma s} \right) = \frac{\frac{1}{R_r}}{\frac{L_r \sigma}{R_r} s + 1} = \frac{H_0}{T_r s + 1} \quad (III-25)$$

Tel que : $T_r = \frac{L_r \sigma}{R_r}$ et $H_0 = \frac{1}{R_r}$

Si on pose $T_i = \frac{L_r \sigma}{R_r}$; on compense la constante du temps du système, on trouve :

$$\frac{Y^*}{Y} = \frac{K}{R_r s + K} = \frac{1}{\frac{R_r}{K} s + 1} = \frac{1}{T s + 1} \quad (III-26)$$

Par comparaison : $T = \frac{R_r}{K} \Rightarrow K = \frac{R_r}{T}$; un Le choix optimal de T donne K.

Boucle de la puissance active Ps :

La figure III.13 montre le schéma utilisé pour la synthèse du PI.

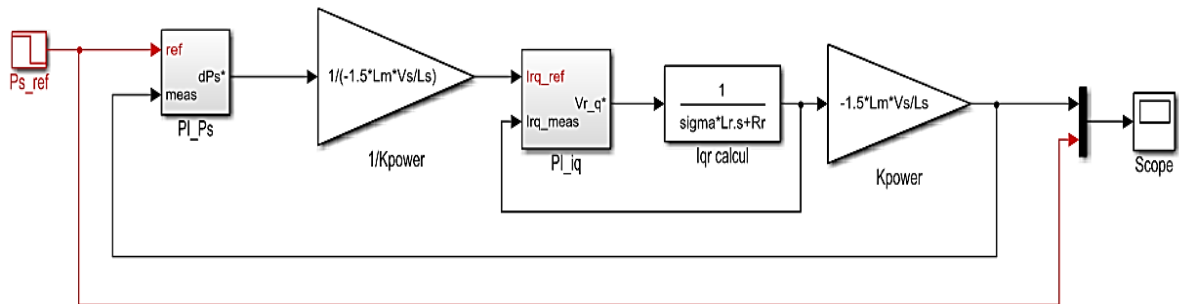


Figure III-13 : schéma bloc de synthèse du PI de la puissance active

La fonction de transfert en boucle fermée de la puissance statorique est :

$$\frac{P_s^*}{P_s} = \frac{PI_{P_S} * \frac{1}{K_{power}} * \left(\frac{K}{R_r s + K} \right) * K_{power}}{1 + PI_{P_S} * \frac{1}{K_{power}} * \left(\frac{K}{R_r s + K} \right) * K_{power}} = \frac{PI_{P_S} * K}{(R_r s + K) + PI_{P_S} * K} \quad (III-27)$$

Avec : $PI_{P_S} = \frac{K_{P_S} (T_{i_{P_S}} s + 1)}{s}$

$$\frac{P_S^*}{P_S} = \frac{\frac{K_{P_S}(T_{i_{P_S}}s+1)}{s} * K}{(R_r s + K) + \frac{K_{P_S}(T_{i_{P_S}}s+1)}{s} * K} = \frac{K_{P_S}(T_{i_{P_S}}s+1)}{\left(\frac{R_r}{K} s + 1\right)s + K_{P_S}(T_{i_{P_S}}s+1)} \quad (III-28)$$

Si on pose $T_{i_{P_S}} = \frac{R_r}{K}$; on compense la constante du temps du système, on trouve :

$$\frac{P_S^*}{P_S} = \frac{K_{P_S}}{s + K_{P_S}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{P_S}}s + 1} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (III-29)$$

Par comparaison : $T = \frac{1}{K_{P_S}} \Rightarrow K_{P_S} = \frac{1}{T}$; un choix judicieux de T donne le K_{P_S} .

Boucle de la puissance réactive Q_s :

La figure III. 14 montre le schéma utilisé pour la synthèse du PI.

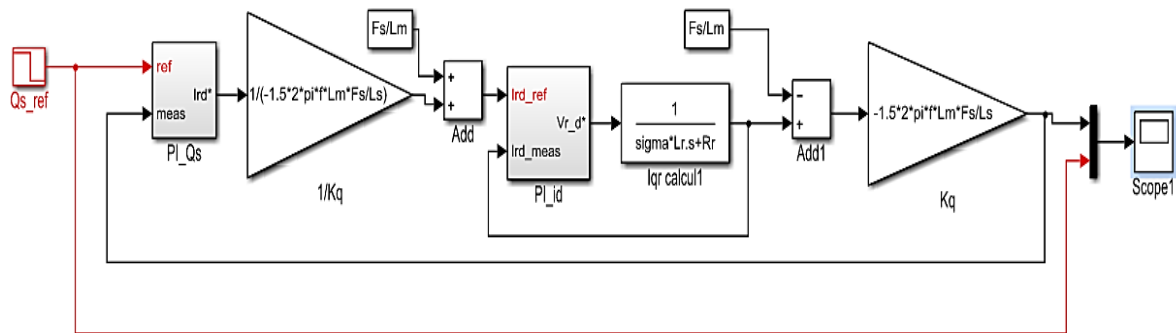


Figure III-14 : schéma bloc de synthèse du PI de la puissance réactive

III.8. Commande par régulateur PI de la GADA

Selon les deux axes de la figure III.15, les deux composantes de courant correspondent respectivement aux deux puissances active et réactive. Or, même si la régulation de la tension dans la liaison CC se traduit par la référence du courant à l'axe d, la référence à l'axe q est imposée en fonction du facteur de puissance souhaité.

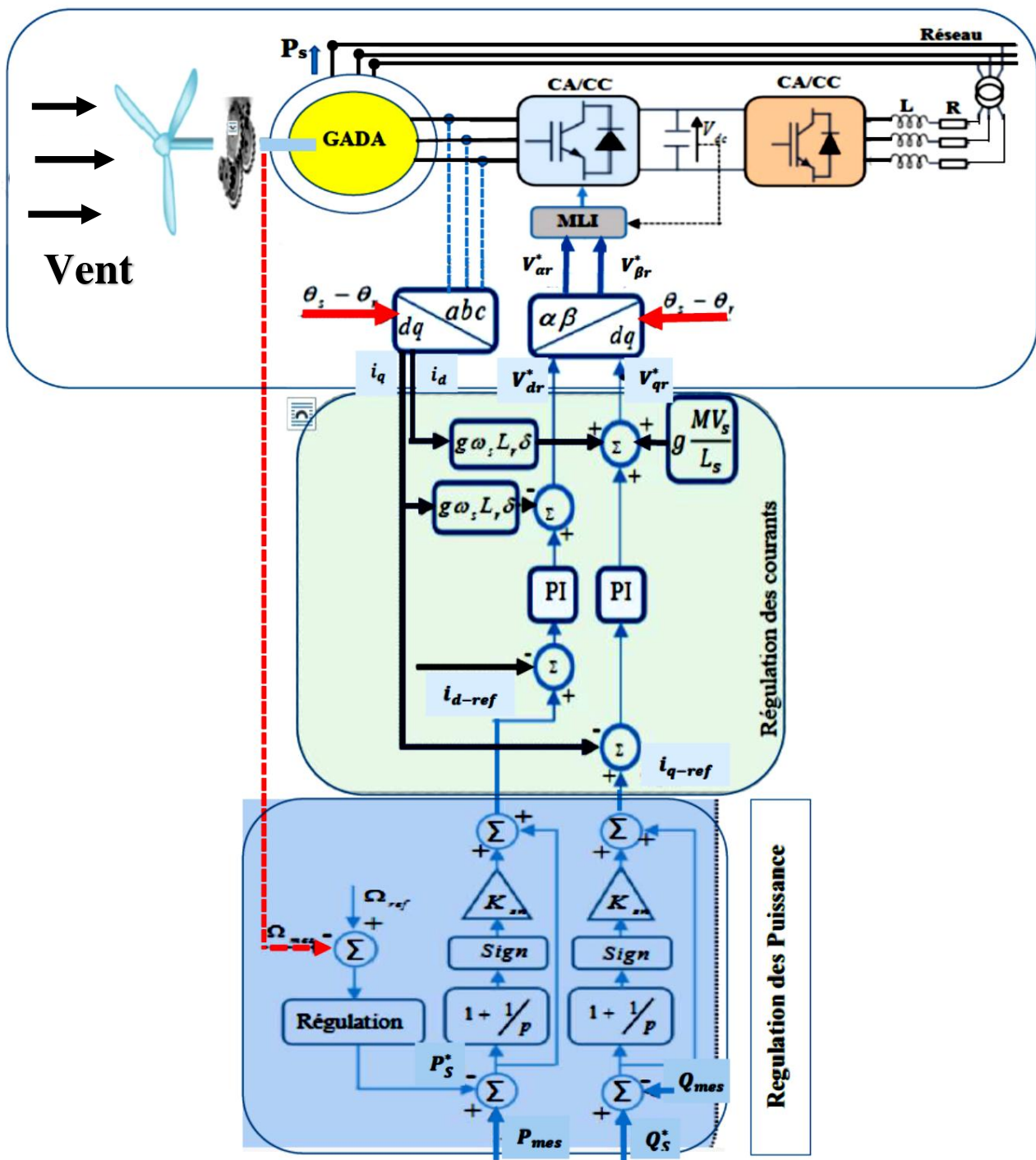


Figure III-15 : Schéma global de la commande par régulateur PI de la GADA

L'ensemble du modèle du système éolien a été simulé dans un environnement Matlab/Simulink. Le modèle comprend les pièces suivantes : un brûleur à mazout, un GADA et deux convertisseurs de puissance qui relient le rotor au réseau.

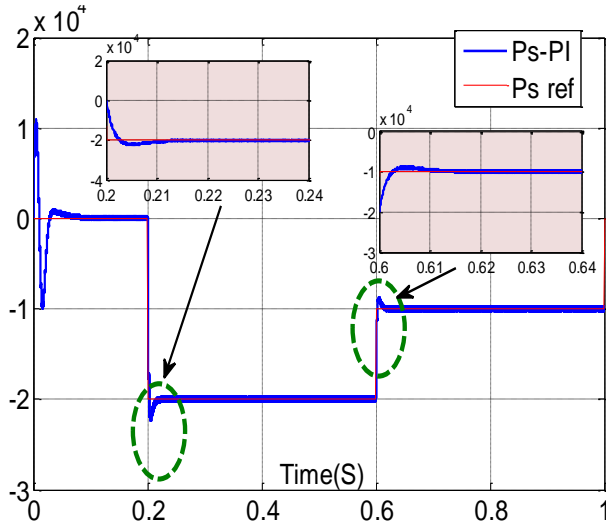


Figure III-17: puissance active statorique.

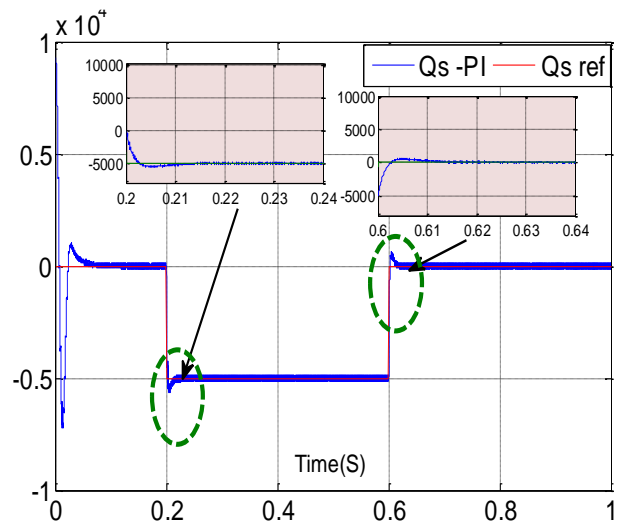


Figure III-18 : puissance réactive statorique.

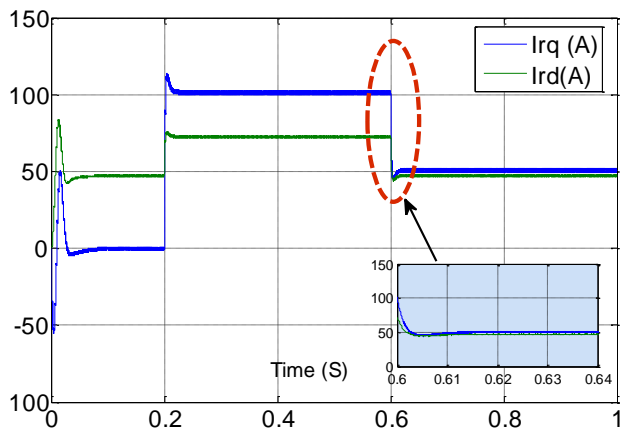


Figure III-19 : Les courants directs et quadrature rotoriques.

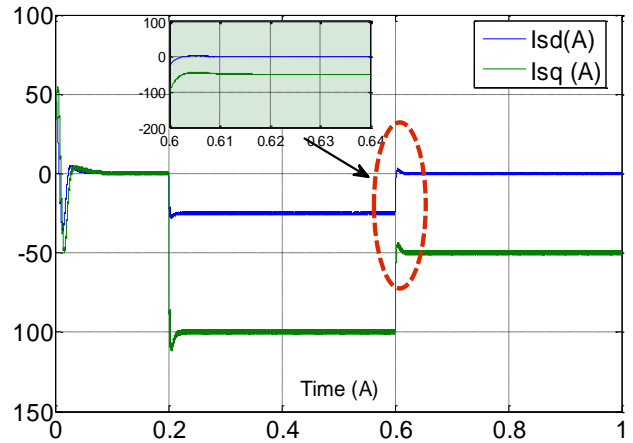


Figure III-20 : Les courants directs et quadrature statoriques.

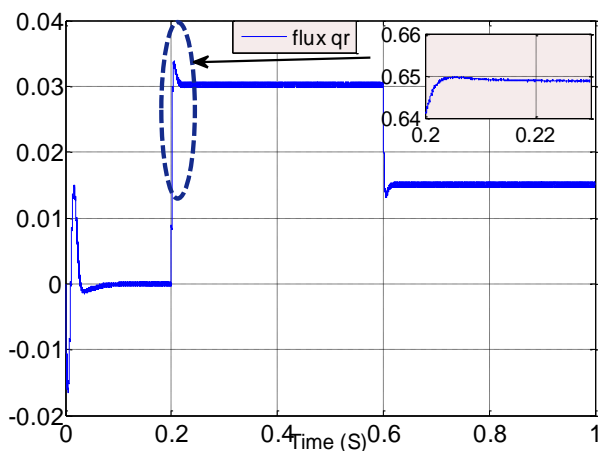


Figure III-21: Flux quadrature rotorique.

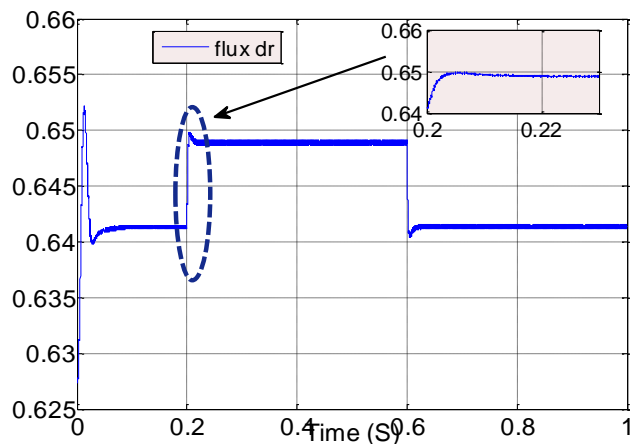


Figure III-22 : Flux direct rotorique.

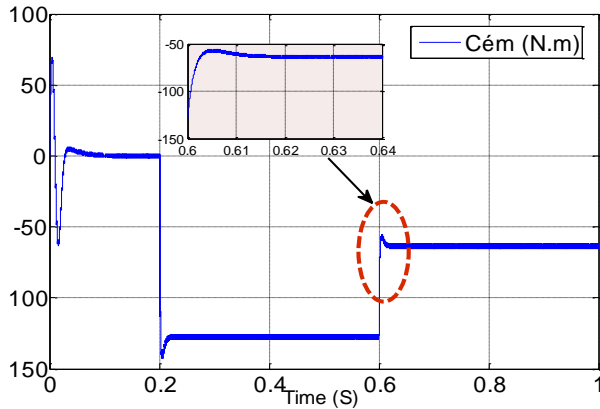


Figure III-23 : Couple électromagnétique.

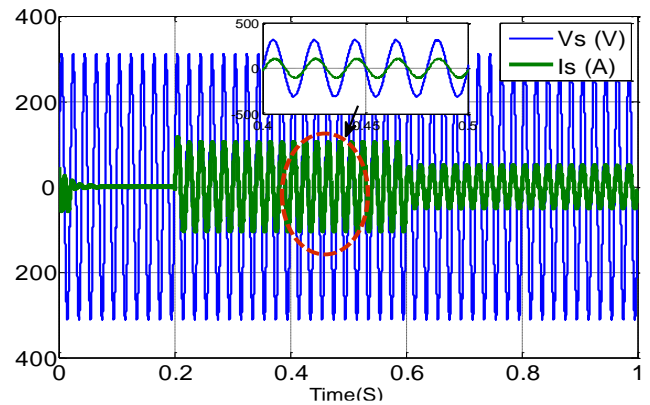


Figure III-24: Le courant et la tension statoriques.

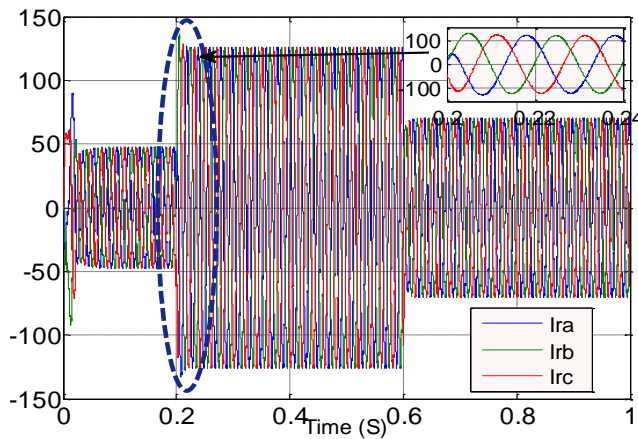


Figure III-25: Courant triphasé rotoriques.

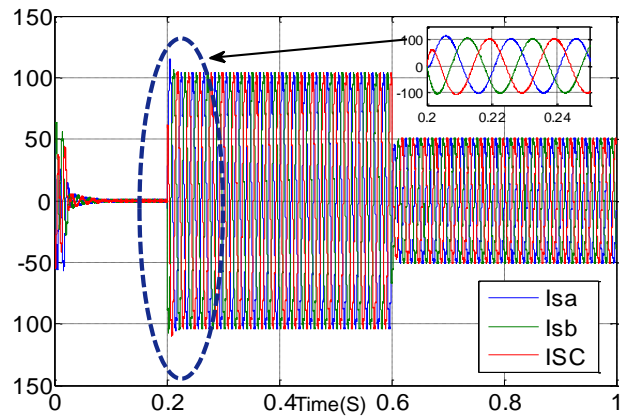


Figure III-26: Courant triphasé statoriques.

Les graphiques illustrent les performances du contrôle vectoriel en puissance statorique active et réactive lorsqu'il est appliqué au GADA. Les figures III.17 et III.18 représentent respectivement la puissance active et réactive d'un stator. La résilience du contrôle de puissance du GADA est démontrée. Les figures III.19 et III.20 montrent que les performances de poursuite du courant rotor et stator sont bonnes ; néanmoins, il y a un dépassement en régime transitoire (au démarrage et lors du changement de consigne), indiquant que le régulateur PI ne régule pas le régime transitoire. Les deux composantes du flux de la GADA selon les deux axes d-q sont données par Les figures III.21 et III.22. On remarque que les composantes du flux rotorique quadratique et directe poursuivent sa référence. La figure III.23 représente le couple électromagnétique du GADA. Les formes d'onde de tension et de courant d'un stator sont illustrées à la figure III.24. On peut voir que la tension du stator est la même que la tension du réseau et que les puissances active et réactive sont couplées à la forme d'onde du courant.

Les courants obtenus au stator et au rotor augmentent tous deux avec la vitesse du vent, comme le montrent les figures III.25 et III.26. De plus, les courants statoriques ont des formes sinusoïdales mais présentent de fortes oscillations, indiquant la présence d'harmoniques importantes dans les courants statoriques produits par le GADA et injectés dans le réseau.

III.10. Résultats pour un profil vent Aléatoire

Utilisation du profil de vent de la figure II.4 pour un essai simulé. vitesse mécanique, comme le montre la Fig. III.27. Un profil de vent dans la zone Adrar-Algérie, tel qu'illustré à la Figure II.4, d'environ 9,2 m/s, a été utilisé pour imiter l'ouvrage de contrôle. Nous affichons les résultats de l'approche de contrôle employée. L'angle de la lame est maintenu à sa plus petite valeur, c'est-à-dire $\beta=2^\circ$. Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{optim}=6.9$, ce qui correspond au maximum du coefficient de puissance $Cp-max=0.506$ quel que soit la vitesse du vent.

Les résultats de nombreuses expériences de modélisation réalisées sur une éolienne, une boîte de vitesses et l'arbre du générateur pour extraire la puissance MPPT maximale sans régulation mécanique de la vitesse par un régulateur proportionnel et intégral (PI).

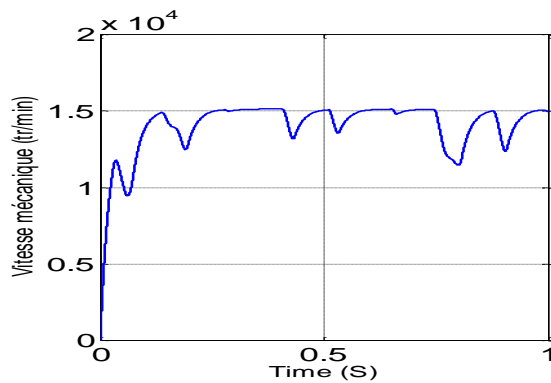


Figure III-27 : Vitesse mécanique.

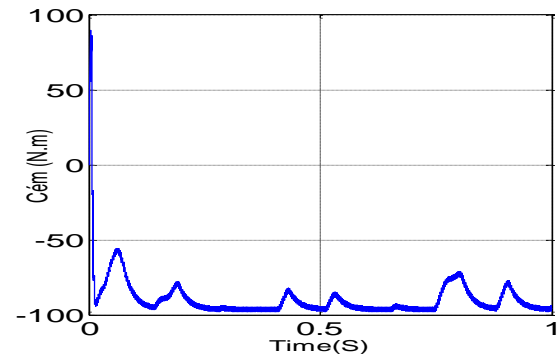


Figure III-28 : Couple électromagnétique.

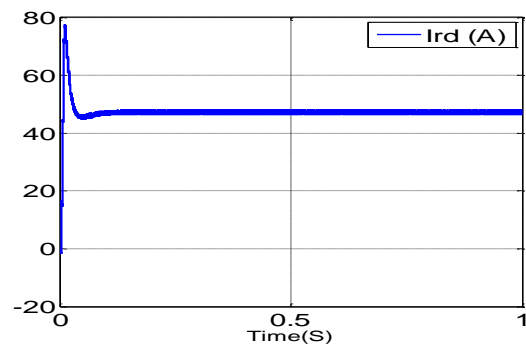
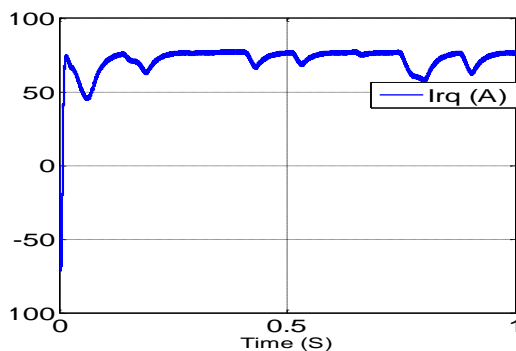


Figure III-29: Les courants rotorique.

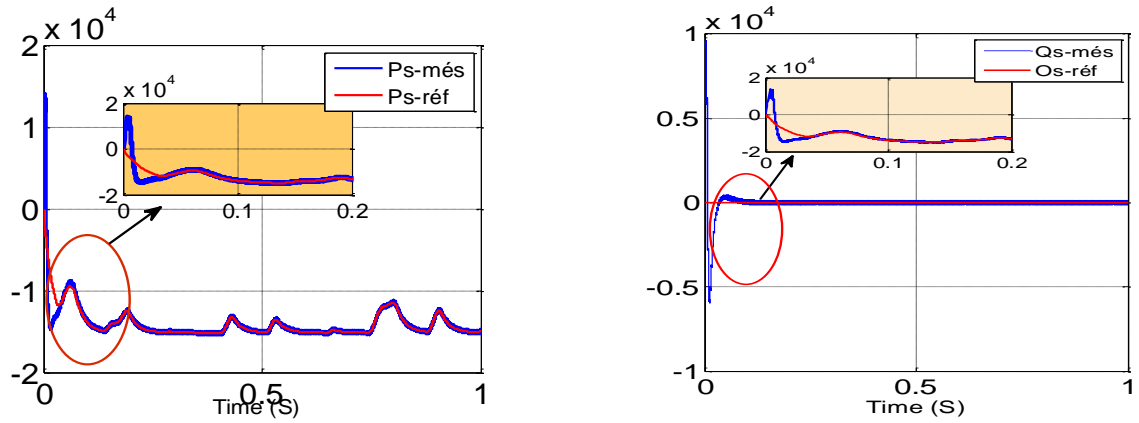


Figure III-30: La puissance active et réactive statorique.

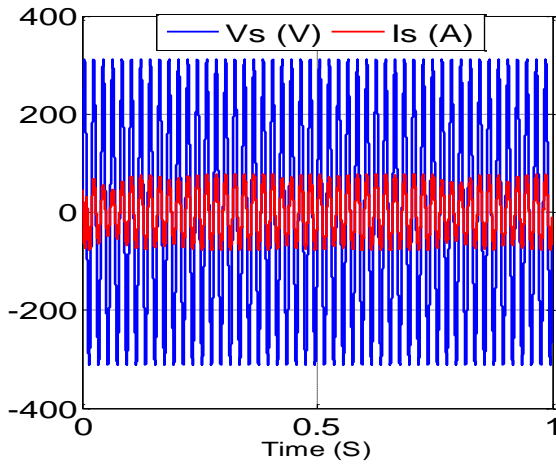


Figure III-31 : Le courant et la tension statoriques.

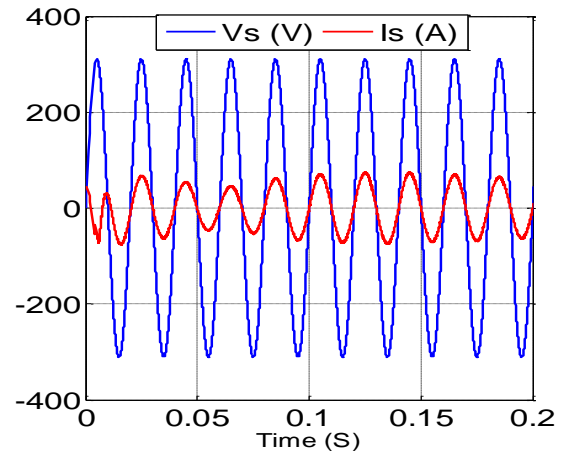


Figure III-32: Zoom sur le courant et la tension statoriques

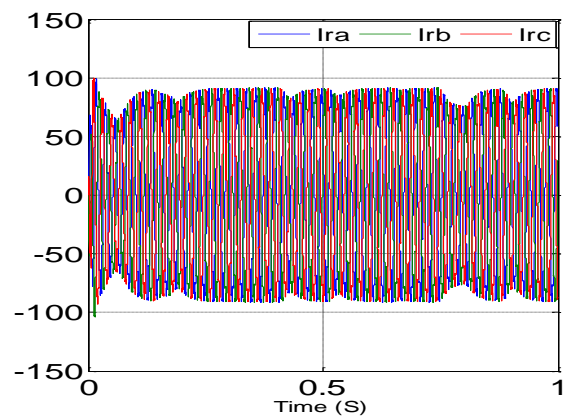
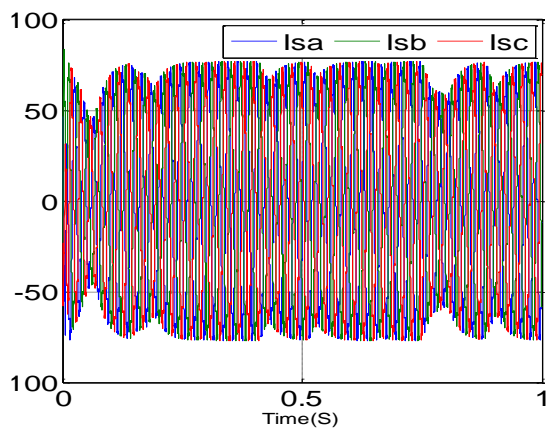


Figure III-33 : Les courants statorique et rotorique triphasés.

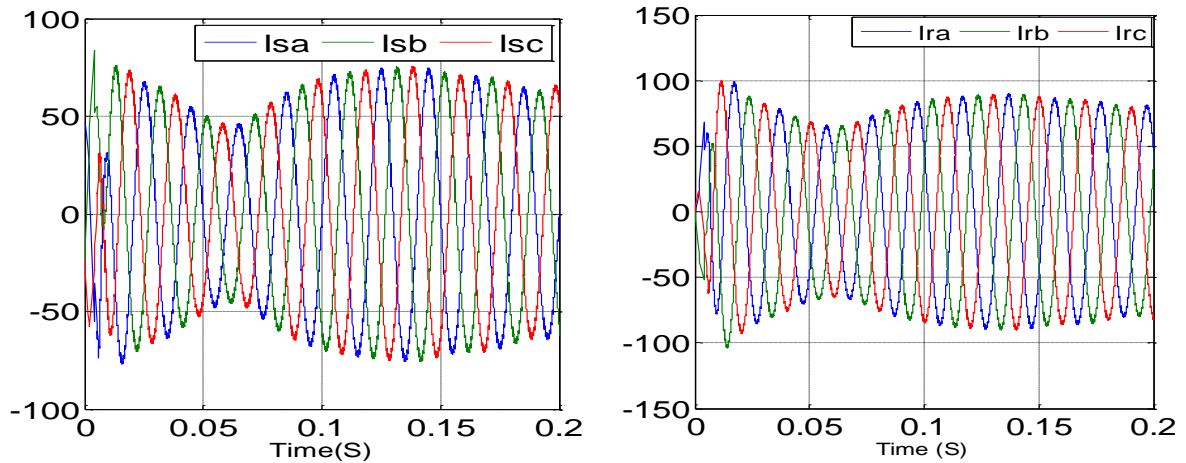


Figure III-34 : Les courants statorique et rotorique avec zoom.

III.11. Conclusion

Nous avons pu concevoir un réglage pour l'unité de contrôle GADA qui régule l'échange de puissance active et réactive entre le stator du générateur et le réseau. Ces contrôleurs sont réglés sur un seul mode "indirect" sans cordon d'alimentation électrique. Nous aborderons les améliorations apportées par le contrôleur dans ce chapitre. Proposé où nous avons examiné la structure de contrôle du système de contrôle proportionnel intégré pour servir de référence. La boucle de puissance étudiée avec un régulateur PI est représentée dans les résultats de la simulation indirecte. En raison de sa rapidité et de sa simplicité, la synthèse du régulateur PI a été utilisée pour stabiliser le système. Afin d'améliorer les performances dynamiques de GADA Selon les résultats de la simulation, le régulateur proposé fonctionne bien. Dans le chapitre suivant, nous suggérons d'utiliser la stratégie de contrôle LF pour réguler les forces actives et réactives du stator.

CHAPITRE IV

*Commande par la logique floue d'un
système éolien a vitesse variable basé sur
une GADA*

IV.1. Introduction

La commande adaptative indirecte, qui utilise des systèmes flous pour estimer la dynamique inconnue du système non linéaire à contrôler afin de synthétiser des lois de commande basées sur ces estimations [82], et la commande adaptative directe, qui utilise des systèmes flous pour approximer un contrôleur idéal inconnu, sont les deux principales classes de méthodes de conception de commande d'action pour le contrôle adaptatif flou qui ont été introduites [83].

Ce chapitre décrit un processus piloté par une instruction en modifiant les variables qui caractérisent le processus, mais il adopte une approche différente de l'automatisation conventionnelle. L'objectif de ce chapitre est de fournir aux lecteurs un rappel rapide sur les EF, un examen général de la LF et une explication de la façon dont elle peut être utilisée pour, pour la première fois, remplacer le régulateur de puissance de contrôle conventionnel par un régulateur flou pour modifier l'actif et le réactif. pouvoir alimenter le réseau électrique GADA [77]. Afin de modifier les courants rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation, un contrôleur à logique floue (FLC) est utilisé. Nous synthétisons les choix potentiels pour les nombreux paramètres du FLC, puis nous tirons les conclusions de la simulation et de l'analyse effectuées à l'aide de Matlab et Simulink.

IV.2. Principe et Historique de la logique floue

Les premières approches de l'idée d'incertitude de Heisenberg établies par les chercheurs américains dans les années 1920 et 1930 ont donné lieu à la logique floue. Cependant, le professeur Lotfi Zadeh n'a avancé les fondements théoriques de ce raisonnement qu'en 1965 où il a introduit son fameux article *evolving fuzzy systems* avec le titre EFs. Depuis, cet automaticien reconnu a produit plusieurs contributions théoriques qui ont contribué à la modélisation floue des phénomènes, dans le but de s'affranchir des contraintes des modèles d'équations différentielles classiques dues aux incertitudes. Voici l'essentiel de l'histoire de la LF [72] :

- ✓ En 1973, Lotfi Zadeh propose d'appliquer la LF pour résoudre les problèmes de réglage.
- ✓ En 1975, le professeur Mamdani propose à Londres, une première application très encourageante du réglage par la LF et développe une stratégie pour le contrôle d'une chaudière à vapeur.

- ✓ En 1978, c'est la société danoise F.L. Smidth-Fuller qui réalise le contrôle d'un four à ciment : c'est la première véritable application industrielle de la LF [84] .
- ✓ En 1983, c'est un épurateur d'eau à commande par la LF qui est mis au point avec succès
- ✓ A partir de 1985, la LF est introduite par le chercheur M. Suegno au Japon. Ce type de commande fut alors l'objet des premières réalisations remarquables développées à la fin des années 80 et au début des années 90 telles que le métro Sendai (1987) et le lave-linge asiago Payer floue de Matsushita (1990).

Depuis, la LF connaît au Japon un véritable essor dû au fait que les sociétés japonaises ont vite compris ses avantages, à la fois techniques et commerciaux [56] :

- Implantation facile.
- Solutions de problèmes multi variables complexes.
- Robustesse vis-à-vis des incertitudes.
- Possibilité d'intégration du savoir-faire de l'expert.

On voit alors apparaître une véritable panoplie de produits estampillés «LF à l'intérieur», dont on Veuillez utiliser les exemples suivants :

- Appareils électroménagers (comme une machine à laver, un aspirateur, une cocotte-minute, etc).
- Systèmes embarqués dans les véhicules (suspension, climatisation, etc).
- Systèmes audio-visuels (appareil photographique autofocus, caméscope à stabilisateur d'image, photocopieur, ... etc) .
- systèmes de transport (train, métro, ascenseur, etc).

Enfin, il est intéressant de noter que depuis quelques années des processeurs flous sont apparus sur le marché, et sont de véritables processeurs dédiés à des applications de réglage par la logique floue [57].

IV.3. Contrôleur à base de la logique floue

Les contrôleurs basés sur la logique floue sont complémentaires aux systèmes de contrôle traditionnels et sont particulièrement utiles lorsqu'il n'y a pas d'autre alternative. lorsqu'il n'existe pas de modèle mathématique précis du processus à réguler ou lorsque celui-ci présente des non-linéarités ou des erreurs importantes. En outre, l'intérêt de ces contrôleurs résidait dans leur capacité à gérer l'ambiguïté et l'incertitude. Par conséquent, le succès de la commande par logique floue est principalement attribuable à sa capacité à transformer la stratégie de commande d'un opérateur professionnel en un ensemble de règles de langage compréhensibles

[85]. La logique floue inspire ces caractéristiques du raisonnement humain. Elle est basée sur la constatation que la plupart des phénomènes ne peuvent être représentés à l'aide de variables booléennes qui ne peuvent prendre que deux valeurs 0 ou 1.

IV.4. Notions de base de la logique floue

Cette section fournit simplement quelques concepts fondamentaux de la logique floue de manière abrégée plutôt que de tenter de présenter une liste complète de la logique floue [86].

IV.4.1. Ensemble flou

Un ensemble déséquilibré est défini par une fonction d'attribut qui peut accepter n'importe quelle valeur réelle entre 0 et 1. C'est l'élément fondamental de la logique illogique. Cette dernière idée vise à minimiser la transition brutale entre les classes en permettant des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ou en permettant à un élément de s'affilier plus ou moins solidement [87]. Les fonctions d'appartenance des ensembles à un domaine continu les définissent. Alors que dans le cas discret, les ensembles flottants sont des valeurs discrètes dans l'intervalle.

IV.4.2. Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'attachement, qui équivaut à l'idée de fonction caractéristique dans la théorie logique classique et permet de quantifier le degré d'attachement d'un élément à l'ensemble flou. Une définition générale d'une fonction d'appartenance pour un ensemble flottant est $\mu(x)$. L'argument x se rapporte à la variable caractérisée, tandis que l'indice x désigne le sujet entier. Les fonctions d'appartenance peuvent prendre de nombreuses formes différentes. Triangulaires ; Trapézodales ; Monotones (croissantes ou décroissantes); En forme de cloche (Gaussiennes). De manière générale, les fonctions trapézoïdales ou triangulaires sont les plus utilisées [88].

IV.4.3. Variables linguistiques

L'idée de variables linguistiques a un impact significatif sur le domaine du raisonnement illogique. Une variable linguistique, comme son nom l'indique, est une variable définie sur la base de mots ou de phrases par opposition à des nombres. De plus, des mots ambigus comme « quelque », « beaucoup », « souvent », « chaud », « froid », « rapide », « prêt », « grand » et

« peu » sont fréquemment utilisés dans les descriptions de situations spécifiques, phénomènes ou processus [89]. Cette classe de phrases constitue ce que l'on appelle les variables linguistiques de la logique illogique.

IV.4.4. Opérateurs de la logique floue

Suite à la définition des ensembles flous, des procédures mathématiques relatives à ces ensembles ont été créées. Les opérateurs mathématiques créés ont beaucoup en commun avec ceux que l'on trouve dans la théorie des ensembles traditionnelle. Les opérateurs \cap , \cup , NON et ALORS traduisent respectivement les opérateurs d'intersection, d'union, de complémentation et d'implication. Donner deux ensembles flous A et B fonctions d'appartenance de A (x) et B (y), respectivement.

IV.4.5. Règles floues

Une relation entre deux propositions floues est utilisée pour représenter la règle floue. Considérons, par exemple, deux variables linguistiques (V1, Tv1), (V2, U, Tv2) et les énoncés « V1 est A » et « V2 est B », où A et B sont deux ensembles flous de V1 et V2, respectivement. Si V1 est A et V2 est B, la règle floue est définie comme telle.

- L'implication est soumise à l'énoncé "V1 est A"
- La conclusion de l'implication est l'énoncé « V2 est B ».

Dans la plupart des cas, plusieurs règles floues sont nécessaires pour résoudre un scénario. Dans le domaine du contrôle et de la réglementation, un certain nombre de règles floues retiennent notre attention. Il existe de nombreuses méthodes pour décrire les règles floues :

IV.4.5.1. Linguistiquement :

Dans ce cas, les règles sont énoncées explicitement comme dans l'exemple ci-dessous : Utilisez beaucoup de couple si l'accélération et la vitesse sont faibles.

IV.4.5.2. Symboliquement :

Dans ce cas, la désignation des ensembles flous est remplacée par des symboles, tels que PG, P, etc., signifiants (Positif Grand, Positif Petit, etc.).

IV.4.5.3. Par matrice d'inférence

Dans ce cas, nous compilons toutes les règles désignées symboliquement dans un tableau appelé « matrice d'inférence ». Les éléments du tableau montrent les degrés auxquels les variables linguistiques appartenant aux entrées des différents ensembles flous sont membres. Et l'ensemble flou de sortie déterminé par la règle est produit par l'intersection d'une colonne et d'une ligne.

IV.5. Structure de base d'un contrôleur flou

Dans un processus de chaînage avant les règles, un contrôleur flou est une sorte de système à base de connaissances qui emploie un raisonnement borné (activation de règles par des règles). Une illustration d'un diagramme de représentation est montrée ici [60] :

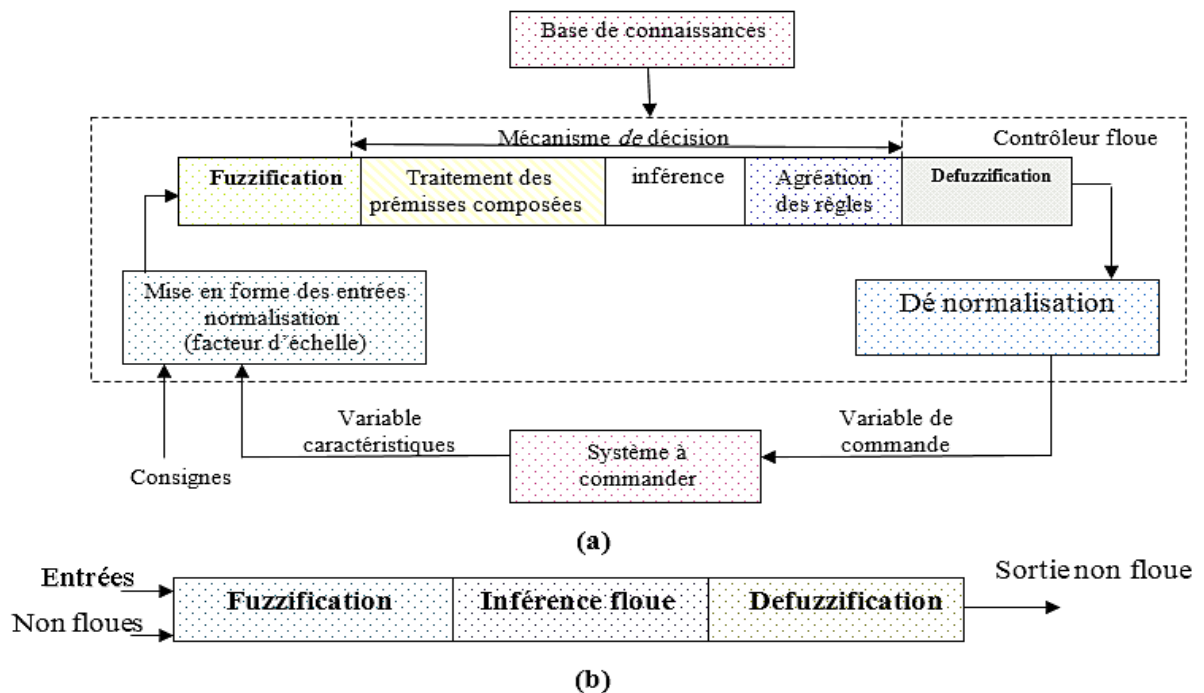


Figure IV-1: a) : Schéma synoptique d'un CF

b) : configuration d'un CF.

IV.5.1 Commande par logique floue

L'utilisation de la logique floue se développe. En fait, cette approche permet la création d'une règle d'ajustement qui est souvent assez efficace sans nécessiter une modélisation poussée. Le régulateur de logique floue fait des hypothèses basées sur des facteurs linguistiques

plutôt que sur une relation mathématique clairement établie. Il est possible de considérer les expériences acquises par les opérateurs d'un processus technologique en tirant des conclusions à l'aide d'une variété de critères. Un problème est souvent traité à l'aide de la logique floue en trois étapes :

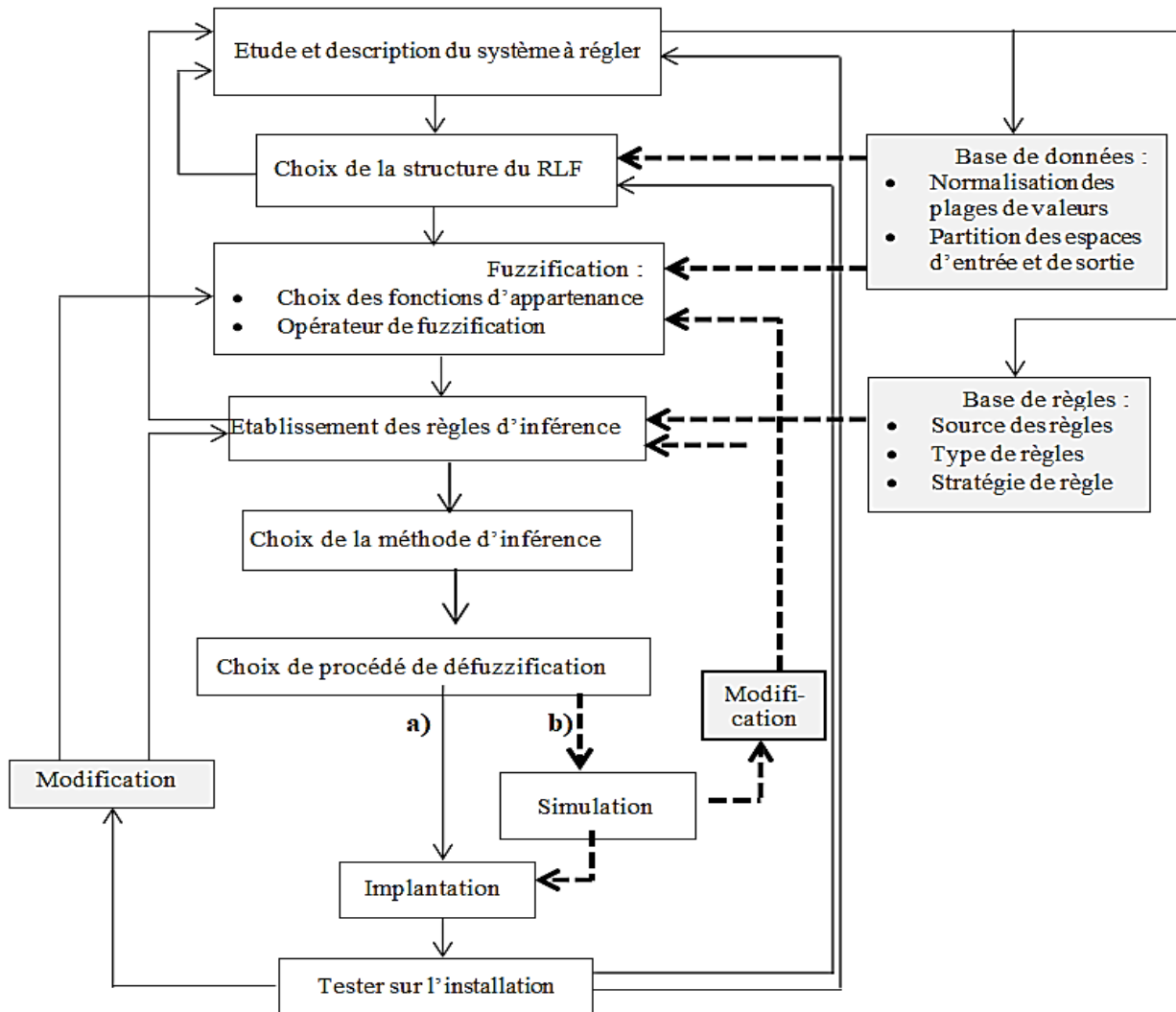


Figure IV-2: Méthodologie de la synthèse d'une commande floue.

IV.5.1.1 Fuzzification

La fuzzification est l'opération d'attribution d'un degré d'appartenance à chaque sous-EF à chaque entrée physique. En d'autres termes, c'est l'opération qui permet de convertir des variables numériques (quantités physiques) en variables symboliques (variables floues) [90].

Pour démontrer le mécanisme de fuzzification, La figure IV.3 illustre le résultat de la fuzzification.

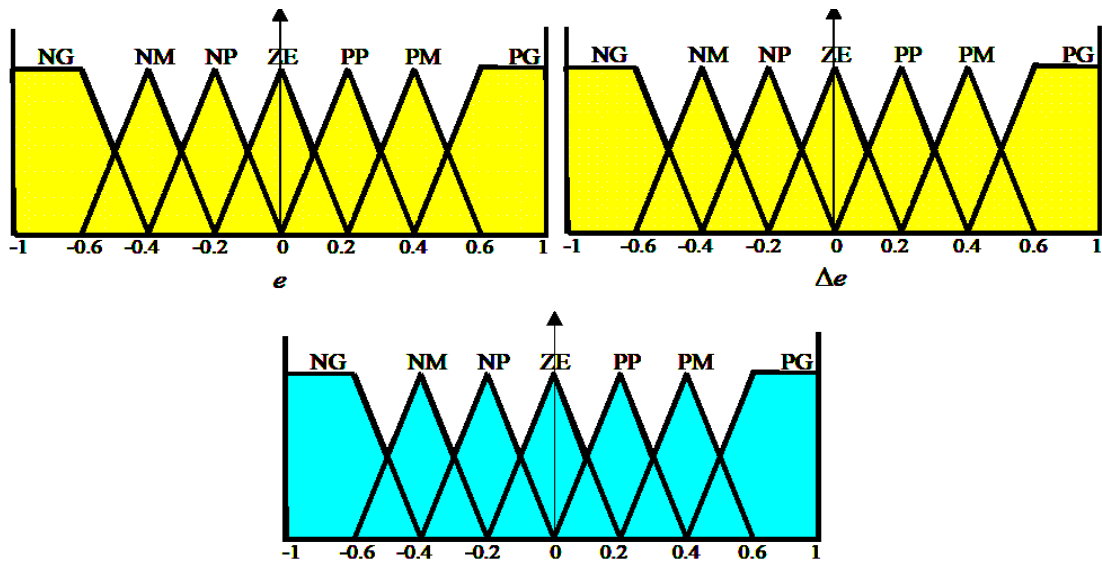


Figure IV-3: Forme de la fonction d'appartenance

IV.5.1.2 Règles d'inférence floue

Les règles d'inflexion peuvent être expliquées de plusieurs manières, y compris linguistiquement, symboliquement ou même via une matrice d'inflexion, qui rassemble toutes les règles d'inflexion dans un seul tableau. Dans le cas d'un tableau à deux dimensions, les entrées du tableau représentent les groupes flottants d'entrées. La valeur entière en virgule flottante de la variable de sortie spécifiée par la règle est fournie par l'intersection d'une colonne et d'une ligne. Les trois techniques d'infiltration les plus courantes sont les suivantes :: Max-Produit, Somme-produit et Max-Min (Implication de Mamdani), cette dernière méthode la plus utilisée à cause de sa simplicité, 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.

Tableau IV-1: Règles d'inférence pour ajuster les deux paramètres proportionnels et intégraux de PI.

E	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
ΔE	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_p
NG	NG	NG	NG	NM	NP	NP	EZ
NM	NG	NM	NM	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NM	NP	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PP	PM	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PM	PM	PG
PG	EZ	PP	PP	PM	PG	PG	PG

Les variables linguistiques sont notées comme suit : **NG** pour grand négatif, **NP** pour petit négatif, **EZ** pour approximativement zéro, **PP** pour petit positif et **PG** pour grand positif. **NM** pour moyenne négative, **PM** pour moyenne positive.

IV.5.1.3 Defuzzification

Il existe plusieurs techniques de défuzzification. Nous nous intéressons à l'application du contrôle par logique floue à la GADA dans cette partie. Après cela, la puissance et le courant sont ajustés à l'aide d'un régulateur MAMDANI.

IV.5.1.3.1 Régulateur de type MAMDANI

Le premier contrôleur flou a été créé par MAMDANI en 1974, la même année que l'approche de contrôle par logique floue a été initialement établie. Ce contrôleur est conçu pour permettre la manipulation de règles arbitraires et illogiques appliquées au système, telles que celles que l'on trouve dans le langage courant. Il est simple d'obtenir ces directives auprès de spécialistes connaissant bien le système [91]. Sur la base de l'étude qu'ils ont menée des bases de règles KING et MAMDANI, MACVICAR et WHELAN ont développé une matrice de règles à deux entrées : l'erreur et sa variation. La commande restera inchangée si la sortie à modifier est égale à la valeur cible et la variation d'erreur est nulle. L'action s'appuiera sur le

signe, la valeur et la variation de l'erreur si la sortie qui doit être modifiée s'écarte de la valeur cible.

IV.5.1.3.2 Synthèse du régulateur

La plupart des contrôleurs établis suivent le plan simple suggéré par MAMDANI pour les appareils à entrée unique/sortie unique. La figure qui représente ce schéma (figure IV.4).

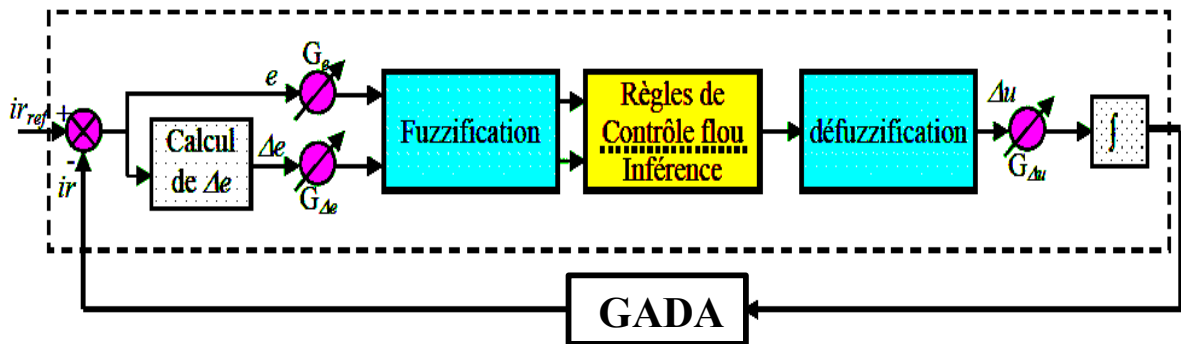


Figure IV-4: Schéma bloc d'un contrôleur flou

Les composants du système sont représentés sur cette figure comme suit :

- Un bloc qui calcule la variation d'erreur dans le temps (Δe) ;
- Variables d'échelle liées à l'erreur, sa variation et la variance de la commande ;
- D'un bloc de fuzzification utilisé pour calculer les degrés d'appartenance ;
- Règles de contrôleur floues ;
- Un bloc appelé défuzzification qui transforme la variation de commande en une valeur numérique ;
- Un bloc appelé bloc sommateur ;

La sélection d'approches raisonnablement réalisables qui ont permis la construction de tels algorithmes avec une simplicité appréciable est la raison pour laquelle les algorithmes flous réussissent dans les systèmes industriels complexes. Ces techniques permettent de formuler un ensemble de jugements dans les mots du langage, décrivant l'ampleur de l'erreur, sa variation et la gestion nécessaire à l'aide d'ensembles flous. Nous pouvons créer des tables de décision qui nous permettent de fournir les valeurs de la sortie du contrôleur qui correspondent aux conditions d'intérêt en combinant ces règles. La recherche du système doit servir de base à la sélection des facteurs d'échelle de sorte que la plage acceptable pour l'erreur et sa fluctuation ne soit pas dépassée lors d'occurrences transitoires mineures. Les formes trapézoïdales et

triangulaires sont généralement utilisées pour les fonctions d'appartenance dans le réglage de la logique floue. Bien qu'il n'y ait pas de normes spécifiques pour la définition des fonctions d'appartenance, certains principes généraux sont fournis pour aider le lecteur à prendre la bonne décision :

Les écarts ou le chevauchement inadéquat entre les fonctions d'appartenance de deux ensembles proches doivent être évités lors de l'examen des variables d'entrée. En effet, cela se traduit par des zones mortes réglementaires, qui provoquent le plus souvent une instabilité du régulateur. De la même manière, en utilisant =1 entre deux ensembles proches, une quantité excessive de chevauchement est spécifiquement évitée. Le calcul de la variable de sortie de l'abscisse du centre de gravité est considérablement simplifié lorsqu'il existe des écarts entre les fonctions d'appartenance admissibles, même celles qui sont souhaitées.

IV.6. Loi de commande

Cette loi est en fonction de l'erreur et sa variation ($u = f(e, \Delta e)$). Elle est donnée par :

$$u_{k+1} = u_k + G_{\Delta u} \cdot \Delta u_{k+1} \quad (\text{IV.1})$$

Avec : $G_{\Delta u}$ le gain associé à la commande u_{k+1}

Δu_{k+1} : La variation de la commande.

L'erreur e et la variation de l'erreur Δe sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} x_e = G_e \cdot e \\ x_{\Delta e} = G_{\Delta e} \cdot \Delta e \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

G_e et $G_{\Delta e}$ les variables d'échelle (normalisation). Jusqu'à ce que nous puissions avoir une occurrence temporaire d'ajustement adéquat, nous modifions ces paramètres. En fait, c'est ce dernier qui décidera du bon fonctionnement de la commande.

IV.7. Réglage des courants rotoriques de la GADA

Nous allons maintenant utiliser le même schéma de la CV, sauf que les régulateurs de vitesse du rotor seront des régulateurs de flous adaptatifs (figure IV.5).

❖ **Puissance active :**

- (Pref = 0 W) ; pour que $t \in [0 ; 0.2]$ s .
- échelle négative (Pref = -20000W) ; pour que $t \in [0.2 ; 0.6]$ s .
- (Pref = - 10000W) ; pour que $t \in [0.6 ; 1]$ s .

❖ **Puissance réactive :**

- (Qref = 0 VAR) ; pour que $t \in [0 ; 0.2]$ s .
- (Qref = -5000VAR) échelle négative ; pour que $t \in [0 ; 0.6]$ s .
- (Qref = 0 VAR) ; pour que $t \in [0.6 ; 1]$ s .

Les figures ci-dessous montrent les performances de la puissance statorique réactive et active PI- Commande LF adaptative appliquée à la GADA. Les figures IV.6 et IV.7 illustrent les réponses du système avec le contrôleur de LF adaptative. En général, on peut voir que les étapes de puissance sont suivies par le générateur pour la puissance active et réactive. Cependant, on observe que l'effet du couplage apparaît sur l'une des deux puissances lors du changement de la consigne de l'autre puissance. Nous pouvons effectuer les performances de ces régulateurs en régime transitoire et en régime permanent en utilisant les critères suivants :

- ❖ Erreur maximale (dépassement) .
- ❖ Le temps de récupération ou de stabilisation (le temps de réponse) .
- ❖ L'erreur résiduelle (l'erreur statique).

Les composantes directes et quadratiques du courant rotorique sont représentées sur la figure IV.8 illustrent l'erreur de commande de i_{rd} et i_{rq} . A partir de ces courbes, on voit que :

- ❖ La régulation de la tension statorique oblige les régulateurs PI à maintenir les courants rotoriques à leurs références respectives.
- ❖ Une diminution de la charge entraîne une diminution du courant rotorique.
- ❖ L'erreur de vérification de i_{rd} et i_{rq} est pratiquement nulle.

Les composantes directes et en quadrature des courants statoriques suivent leurs valeurs de référence dans la figure IV.9. Ces résultats indiquent que le contrôleur flou surpasse le contrôleur PI en termes de suivi. Le dépassement n'est pas produit par les régulateurs flottants, en particulier pendant les transitoires. Pour les autres représentations, elles ressemblent pratiquement exactement à celles du régulateur PI.

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures IV.10 et IV.11 et IV.12 respectivement. On montre que le flux rotorique et le couple électromagnétique suivent parfaitement sa référence avec de bonnes performances dynamiques, moins d'oscillations et moins de dépassement. La figure IV.13 illustre les formes d'onde de la tension et du courant statorique. Il convient de noter

que la tension statique est égale à la tension du réseau, alors que la forme d'onde du courant est liée à la puissance active et réactive. De plus, les résultats des figures IV.14 et IV.15 montrent que les courants triphasé stator et rotor générés par la GADA sont proportionnels à la puissance active fournie. La forme de la forme d'onde de courant est presque sinusoïdale pour les courants statorique et rotorique, indiquant une haute qualité de puissance fournie au réseau. Les régulateurs BF adaptatifs ne produisent aucun dépassement, en particulier en transit. Pour les autres performances, elles sont quasiment similaires à celle du régulateur PI. Montre la régulation par l'excellence du contrôle LF adaptatif par le rejet effectif des effets des perturbations à partir desquelles les autorités tracent complètement leur référence.

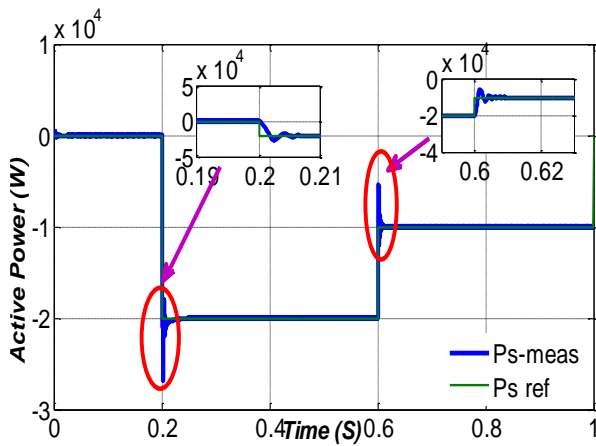


Figure IV-6: puissance active statorique

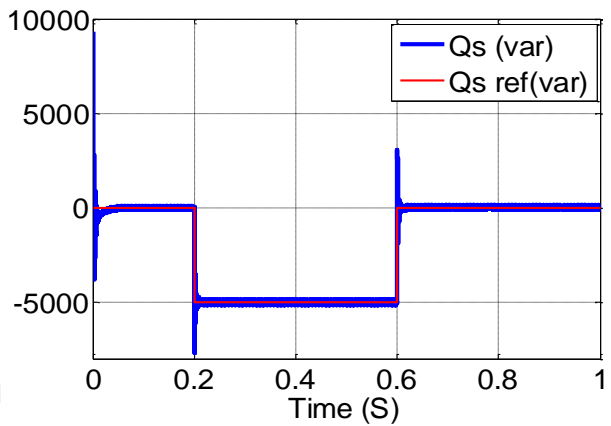


Figure IV-7: puissance réactive statorique

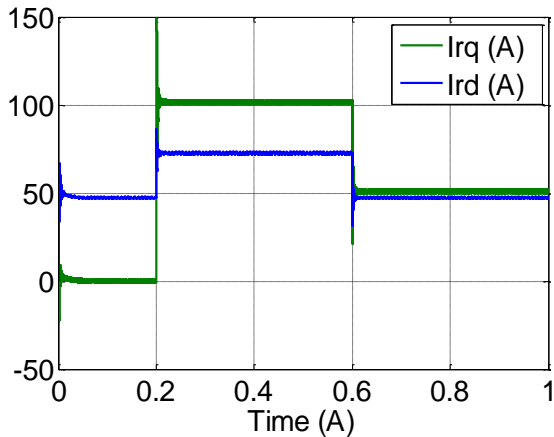


Figure IV-8: Les courants direct et quadrature rotoriques

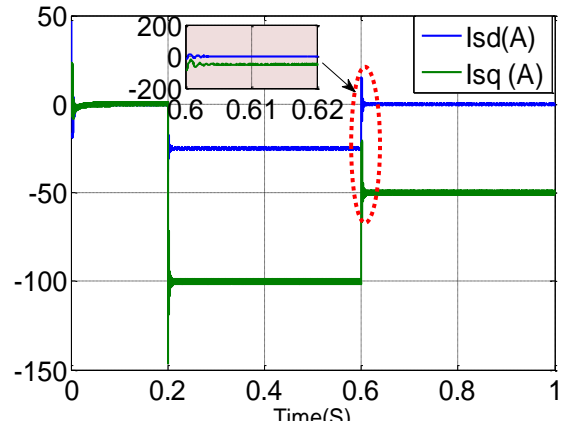


Figure IV-9: Les courants direct et quadrature statoriques

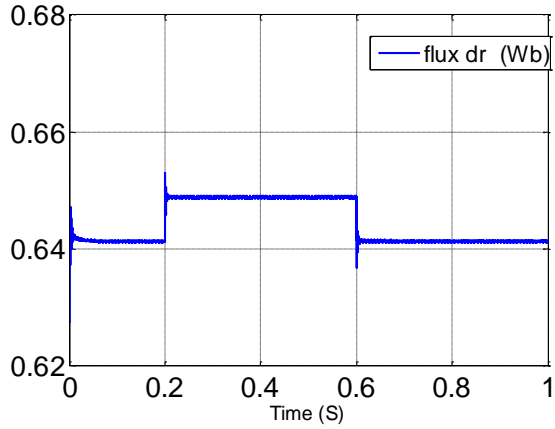


Figure IV-10: Flux direct rotorique.

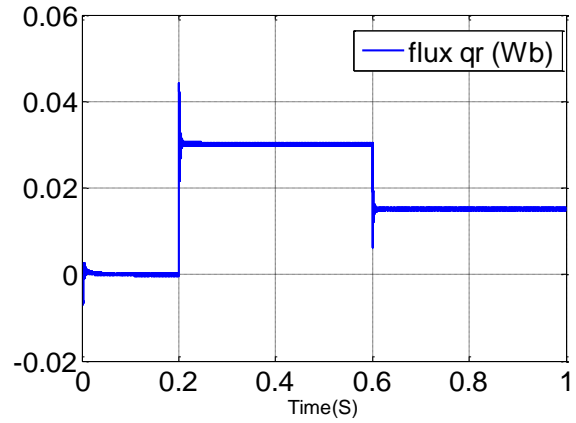


Figure IV-11: Flux quadrature rotorique.

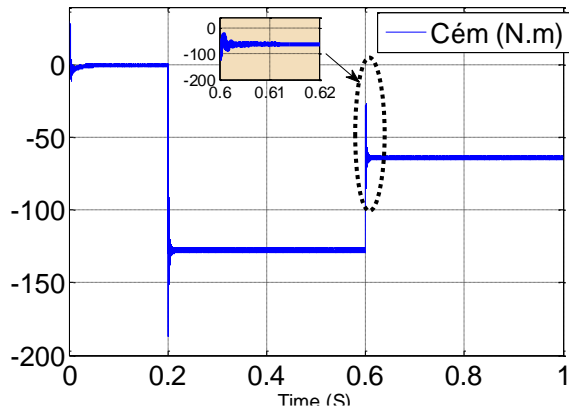


Figure IV-12: Couple électromagnétique.

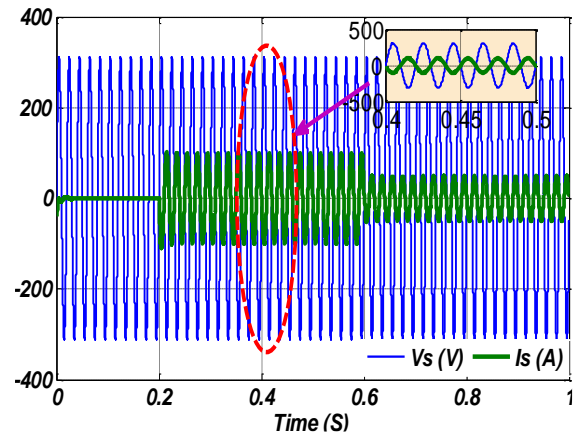


Figure IV-13: Le courant et la tension statoriques

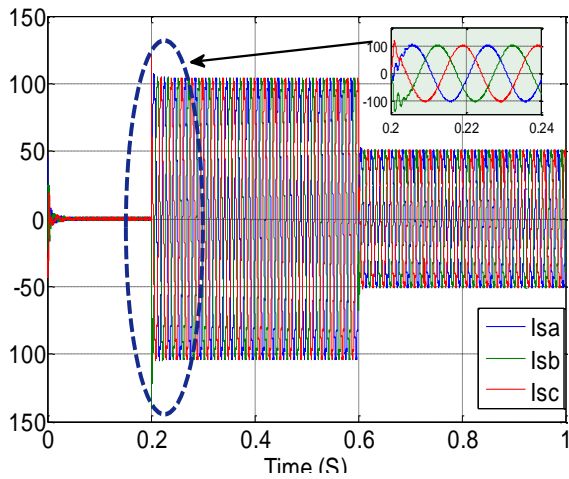


Figure IV-14: Courant triphasé statoriques

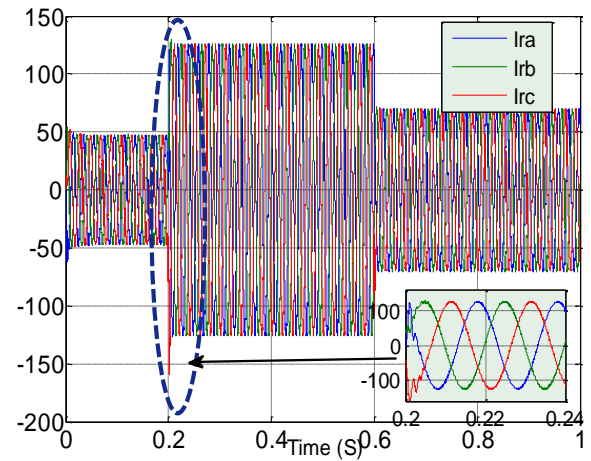


Figure IV-15: Courant triphasé rotoriques

IV.9.Comparaison entre le régulateur PI et le régulateur PI-FLOUE:

Afin d'augmenter la précision des résultats, il est judicieux de comparer les différentes commandes qui ont été élaborées ; cette étape est cruciale pour aider à choisir le type de commande en fonction des résultats et des apports de chacun. Dans cette étape, nous examinerons les caractéristiques dynamiques et statiques de trois formes de contrôle différentes ; CV avec : PI classique, PI flou et PI flou avec gain adaptatif ; cela nous permet de prédire les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'une méthode de contrôle particulière ; d'un point de vue automatique, le meilleur sera celui qui répond à des exigences telles que :

- Meilleure réponse.
- Meilleure poursuite des consignes contrôlées (vitesse).
- Meilleure rejection des perturbations.

Ces normes doivent tenir compte de l'ampleur maximale de l'erreur réglementaire ainsi que du temps nécessaire au système pour se stabiliser ou établir une nouvelle référence suite à une perturbation.

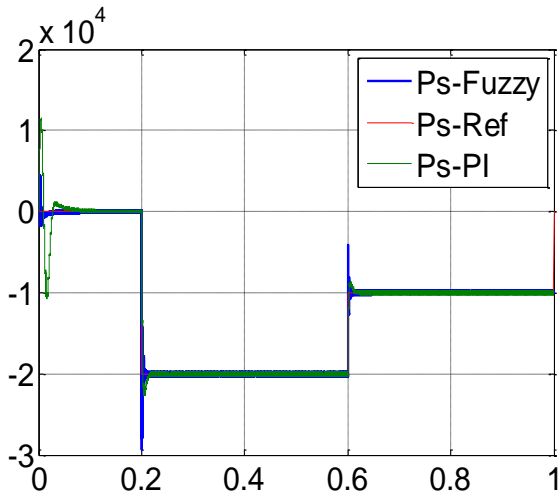


Figure IV-16: Puissance active statorique

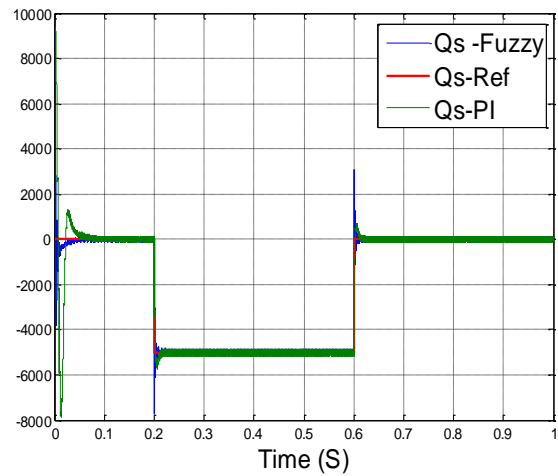


Figure IV-17: Puissance réactive statorique

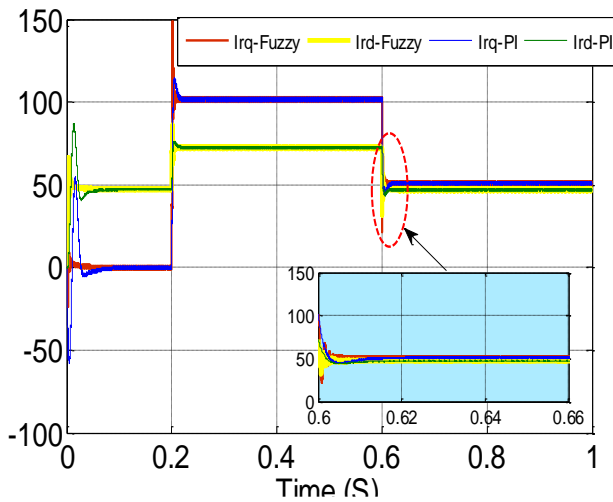


Figure IV-18: Les courants direct et quadrature rotoriques

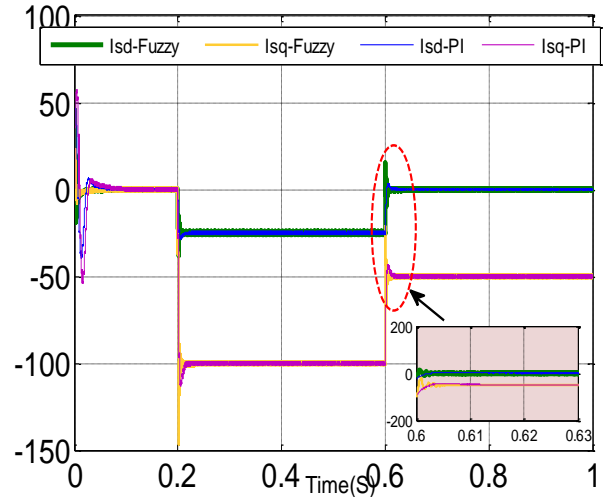


Figure IV-19: Les courants direct et quadrature statoriques

Le réglage par la logique floue peut être plus performant que le réglage (PI) en termes de qualité de réponse dynamique du système. Même si la précision n'est pas aussi bonne que celle d'un régulateur (PI), dont l'action intégrale élimine l'erreur statistique, et qui réduit le temps de réaction en générant un minuscule dépassement suivi d'oscillations infimes autour du point du destinataire dans un état constant. La combinaison des deux types de commande est donc suggérée par ceci :

- La commande floue règle le régime transitoire.
- La commande (PI) règle le régime permanent.

Les figures (IV.16), (IV.17), (IV.18) et (IV.19) montrent les résultats, qui montrent que L'approche du régulateur flou a fourni de bonnes performances dynamiques et statiques pour la puissance active et réactive. Il y a une dynamique qui réagit rapidement et sans dépasser la régulation PI indirecte. L'adaptation des gains pour maintenir la stabilité du système est l'inconvénient fondamental des régulateurs flottants. De plus, l'erreur et sa variation sont les deux seuls nombres utilisés pour calculer la commande.

IV.10. Contrôle de logique floue adaptative

Les régulateurs conventionnels sont aujourd'hui ceux qui sont le plus utilisés dans les applications industrielles. Environ 90 % des régulateurs industriels sont des régulateurs PID. Les autres sont des systèmes de contrôle personnalisés qui utilisent une gamme d'approches de contrôle contemporaines. Les principaux facteurs contribuant au succès du contrôleur PI sont

sa simplicité, sa facilité d'utilisation, ses performances favorables dans certaines circonstances et son faible coût [50]. Il est bien connu que le régulateur défaillant apporte des réponses inattendues aux problèmes de régulation dans les régimes transitoires, notamment lorsque la dynamique du système est non linéaire. Cependant, il existe toujours une possibilité d'oscillations de faible amplitude dans un régime établi, qui n'a pas de régulateur PI conventionnel. La précision mathématique et la simplicité de l'algorithme de contrôle du contrôleur font partie de ses points forts, mais il présente quelques inconvénients face aux changements paramétriques du système et à la dynamique non linéaire [92].

IV.11. Rotor actuel prédiction la prédiction

Les composants directs et la quadrature rotor-courant sont nécessaires pour l'utiliser dans la fonction suivante [93] :

$$\begin{cases} i_{dri}(k+1) = \frac{T}{\sigma L_r} \left(V_{dri}(k) - r_r i_{dri}(k) + s_i \omega_{si} \sigma L_r i_{qri}(k) \right) + i_{dri}(k) \\ i_{qri}(k+1) = \frac{T}{\sigma L_r} \left(V_{qri}(k) - r_r i_{qri}(k) - s_i \omega_{si} \sigma L_r i_{dri}(k) - s_i \frac{MV_s}{L_s} \right) + i_{qri}(k) \end{cases} \quad (IV.3)$$

Aussi, la prédiction des puissances statoriques actives et réactives est donnée par :

$$\begin{cases} P_{si}(k+1) = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot i_{qri}(k+1) \\ Q_{si}(k+1) = \frac{V_s \cdot \phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot L_m}{L_s} \cdot i_{dri}(k+1) \end{cases} \quad (IV.4)$$

IV.12. Liens entre les modifications des paramètres PI et les performances souhaitées

Les paramètres PI sont ajustés pour une réponse plus rapide et moins de dépassement et d'amortissement à court terme. La dynamique du système est affectée par des différences de gain relatives et intégrales, qui varient de la même manière que la position et la variabilité du plan de phase d'erreur. Voici une description temporaire du signal de commande : [94] :

$$\begin{cases} u(t) = k_p E(t) + k_i \int_0^t E(\tau) d\tau \\ = \left[k_{p0} E(t) + k_{i0} \int_0^t E(\tau) d\tau \right] \\ + \left[G_p \Delta k_p(E, \Delta E) E(t) + G_i \Delta k_i(E, \Delta E) \int_0^t E(\tau) d\tau \right] \\ = u(t) + \Delta u(t)(E, \Delta E) \end{cases} \quad (IV.5)$$

Lorsque l'erreur est grande, Kp doit être grande et Ki petite et lorsque l'erreur est petite, Kp doit être petite et Ki grande, car Kp fournit une réponse dynamique rapide et Ki élimine l'erreur statique et assure la stabilité du système. Lors du fonctionnement du régulateur en ligne, la

matrice floue permet d'adapter les gains afin d'améliorer les propriétés de réponse temporelle. Ce tableau montre la matrice d'inférence pour CF pour une section de combinaisons floues à 7 cents pour chaque variable d'entrée $E(t)$ et $\Delta E(t)$ [95].

IV.13. Description du mécanisme d'adaptation d'un régulateur classique par logique floue

Les contrôleurs hybrides PI-floue sont des PI non linéaires dont les paramètres changent pendant le fonctionnement. Dans notre cas, nous ajustons ces paramètres à l'aide de l'erreur et de ses dérivées (gains). Cette méthode combine un régulateur PI et un modérateur. Le formalisme linguistique floue, qui inclut la grammaire floue, permet de combiner la précision mathématique de l'algorithme PI avec l'adaptabilité, la flexibilité et la simplicité du formalisme linguistique floue [96]. Ce type de contrôle, dit adaptatif, permet de bénéficier à la fois des régulateurs PI et de la logique floue. La loi adaptative est conçue pour améliorer les performances de contrôle des systèmes complexes et non linéaires [97]. Nous proposons un modérateur avec des entrées (l'erreur et sa variabilité) et des sorties (deux matrices floues permettant la génération du signal), qui seront appliquées à chaque gain de PI (K_p , K_i) [86]. Le système floue permet de modifier les paramètres en fonction du comportement du procédé. Dans notre cas, les gains de commandes seront adaptés en temps réel. Il est calculé par :

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + G_p \Delta k_p(E, \Delta E) \\ k_i = k_{i0} + G_i \Delta k_i(E, \Delta E) \end{cases} \quad (IV.6)$$

L'erreur et la dérivée de l'erreur sont les entrées de la commande de LF adaptative. Les sorties sont la valeur normalisée de l'action relative. Δk_p et la valeur normale de l'action intégrale k_i . Ces deux grandeurs d'ordre sont normalisées dans l'intervalle $[-1, 1]$. (figure IV.20) K_{p0} et k_{i0} sont les paramètres de contrôle d'état initiaux. Elle est déterminée par la méthode de ziegler et nichols. L'étendue du changement pour chacun de ces paramètres (Δk_p , k_i) a été déterminée à partir de tests de simulation et sur cette base, les valeurs de gain G_p et G_i ont été déterminées [98].

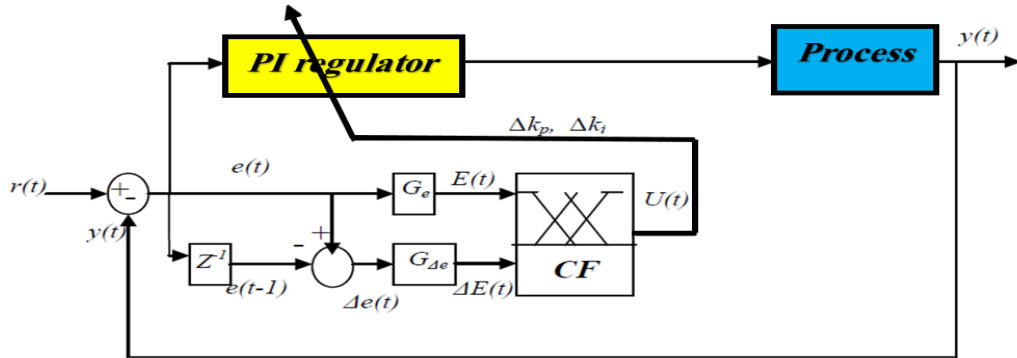


Figure IV-20: Principe d'adaptation du PI par LF

Les fonctions d'appartenance pour l'entrée E et ΔE sont spécifiées dans l'intervalle $[-1, 1]$. (figure IV.3)les entrées floues de la console sont l'erreur et la dérivée de l'erreur. Les sorties sont la normale d'action relative k_p et la normale d'action intégrale Δk_i [88]. Les quantités de ces deux commandes sont normalisées dans l'intervalle $[-1, 1]$. K_{p0} et k_{i0} sont les paramètres de contrôle d'état initiaux. Elle est déterminée par la méthode de ziegler et nichols. L'étendue du changement pour chacun de ces paramètres ($\Delta k_p, k_i$) a été déterminée à partir de tests de simulation et sur cette base, les valeurs de gain G_p et G_i ont été déterminées [99].

IV.14. Résultats et discussion

Afin d'évaluer la robustesse du contrôle adaptatif du régulateur BF, nous avons étudié l'effet de de contrôle.

❖ **Puissance active :**

- (Pref = 0 W) ; pour que $t \in [0 ; 0.2]$ s .
- (Pref = -20000W) échelle négative ; pour que $t \in [0.2 ; 0.6]$ s .
- (Pref = - 10000W) ; pour que $t \in [0.6 ; 1]$ s .

❖ **Puissance réactive :**

- (Qref = 0 VAR) ; pour que $t \in [0 ; 1]$ s .

Les performances de la commande floue en puissance statorique active et réactive délivrée à la GADA sont représentées dans les figures ci-dessous. Un régulateur flou adaptatif est utilisé à la place du régulateur PI.

Les figures (IV.21) ,(IV.22) présentent les résultats de simulation des puissances active et réactive on observe clairement la poursuite des consignes et bonne stabilité pour les puissances active et réactive avec le régulateur adaptative.

Les composantes directes et en quadrature des courants du stator et du rotor suivent leurs valeurs de référence, comme le montrent les figures (IV.23), (IV.24), (IV.25) et (IV.26). Sur la base de ces résultats, le régulateur flou effectue un meilleur suivi que le régulateur PI décrit au chapitre III. D'après leurs allures on a constaté que le courant rotorique sur l'axe direct est l'image de la puissance réactive de stator et le courant sur l'axe quadrature est celle de la puissance active.

En particulier pour les transitoires, les contrôleurs flous adaptatifs ne produisent aucun dépassement. Les autres performances sont quasiment identiques à celles du régulateur PI.

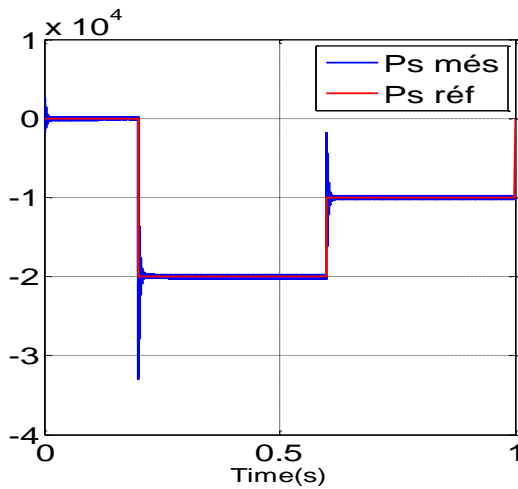


Figure IV-21: Puissance active statorique

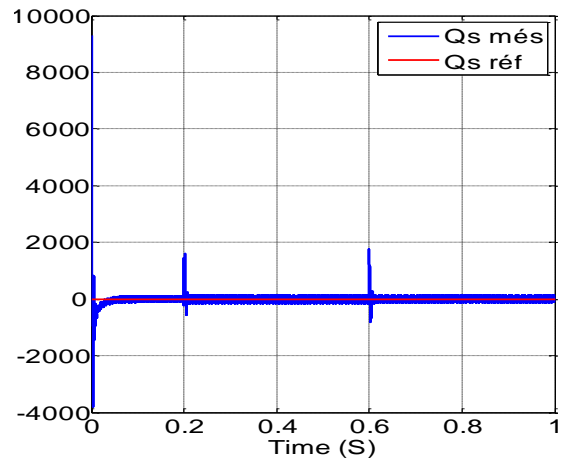


Figure IV-22: Puissance réactive statorique

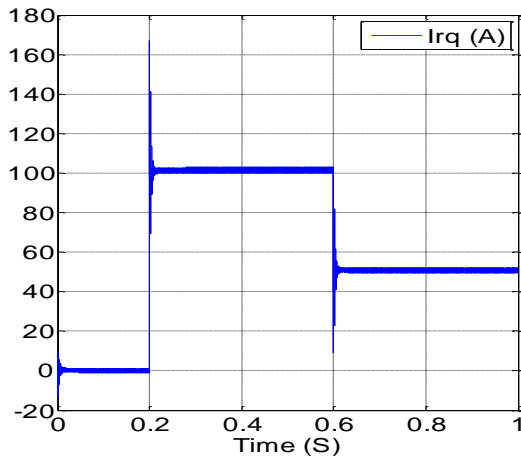


Figure IV-23: Le courant quadrature rotorique

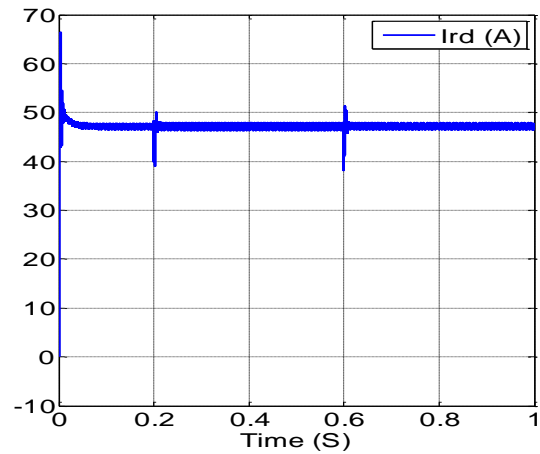


Figure IV-24: Le courant direct rotorique

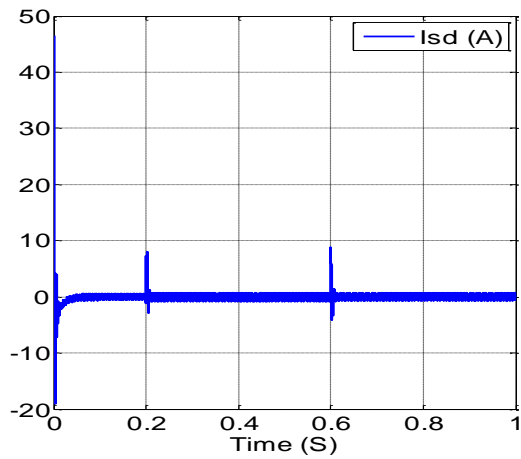


Figure IV-25 : Le courant direct statorique

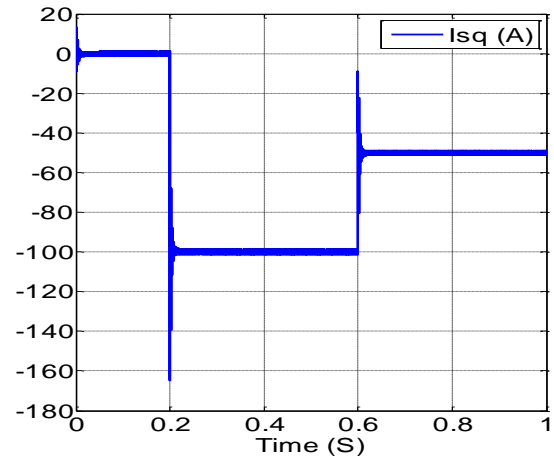


Figure IV-26 : Le courant quadrature statorique

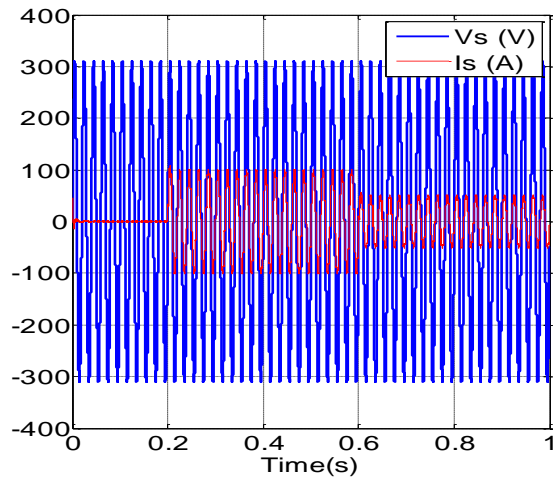


Figure IV-27: Le courant et la tension statoriques

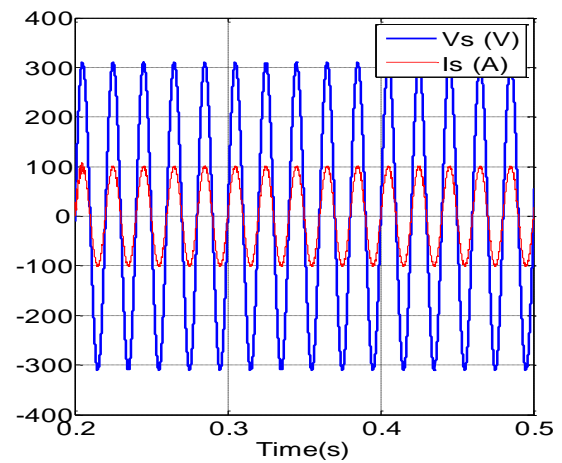


Figure IV-28 : Zoom sur le courant et la tension statoriques

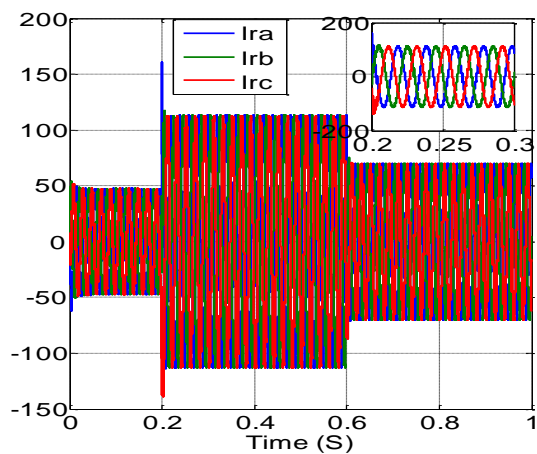


Figure IV-29 : Courant triphasé rotoriques

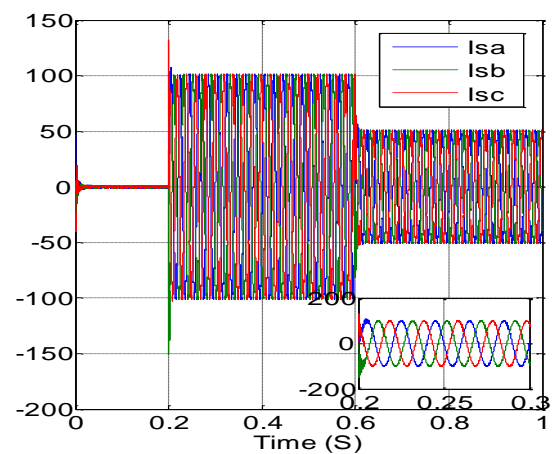


Figure IV-30: Courant triphasé statoriques

IV.15. Conclusion

Dans ce chapitre , nous avons développé un contrôleur pour la puissance active et un autre pour la puissance réactive utilisant la commande adaptatif à LF avec une bonne sélection des paramètres du contrôleur . Les résultats de simulation, déjà présentés, ont montré que le contrôle à LF avec la boucle de puissance donne une c'est mieux performance que la méthode directe en utilisant la boucle de courant. Ceci élimine l'erreur statique, il y a un temps de réponse exceptionnel mais le contrôle avec la boucle de puissance est compliqué à mettre en œuvre en ce qui concerne la régulation des régulateurs, voilà pourquoi l'utilisation de régulateurs flous, qui semblent difficiles à adapter, est moins complexe que les quatre régulateurs et donc le coût sera inférieur. En intégrant les connaissances des experts de la Logique floue, nous obtenons une performance très satisfaisante sans la nécessité d'un modèle mathématique détaillée pour le système, le régulateur flous a des capacités inhérentes à traiter des données imprécises ou brutes, sa capacité de contrôle est étendue aux techniques de contrôle adaptatif à LF des systèmes travaillant dans des conditions de fonctionnement particulières , montrent que le FLC a de très bonnes performances de suivi et a amélioré la dynamique des courants du rotor par rapport à l'ajustement PI.

CHAPITRE V

*Amélioration des performances des
commandes par l'algorithme génétique
basé sur une GADA*

V.1. Introduction

Des problèmes d'amélioration se profilent actuellement dans la recherche scientifique. La solution au problème d'optimisation consiste à rechercher dans l'espace de recherche une fonction spécifique et à effectuer un zoom avant ou arrière. En raison des complexités relatives de l'espace de recherche et de la fonction objectif, un grand nombre de méthodes de décision radicalement différentes ont été développées [100]. L'exhaustivité de ces méthodes d'amélioration dans diverses publications, qui sont généralement divisées en deux catégories principales, et premier ordre de méthodes exactes. Et beaucoup de travail. La deuxième classe de méthodes d'optimisation approchée fait l'objet de recherches. Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'une des méthodes d'optimisation utilisées pour résoudre de tels problèmes mathématiques, l'AG, qui est l'une des méthodes les plus efficaces et les plus puissantes dans les problèmes à ensemble général. Il garde la trace d'un ensemble de solutions codées et les oriente vers la meilleure solution [101]. Un compromis entre deux solutions doit être trouvé où de meilleures options sont explorées et une quantité importante de l'espace de recherche est utilisée afin de trouver la meilleure réponse à un problème dans un environnement compliqué. L'analyse de certaines études a révélé que les AGs sont proches de fournir la meilleure solution. Les fondements théoriques des AGs sont présentés en premier [102]. Ensuite, on abordera leur application pour l'optimisation des paramètres des deux régulateurs utilisés précédemment pour le réglage de la vitesse d'une GADA. Des résultats de simulation seront présentés et comparés à ceux obtenus dans les chapitres précédents pour montrer l'amélioration des performances dynamiques et statiques des régulateurs optimisés.

La principale contribution de ce chapitre a été résumée comme suit :

- Etude d'un système composé d'une éolienne à vent variable et d'une GADA reliée au réseau par un stator et alimentée par un transducteur.
- La réponse du système a été vérifiée en appliquant le régulateur proposé en termes d'efficacité par rapport à la puissance active et réactive.
- Amélioration des résultats obtenus à partir de travaux publiés précédemment, en termes de temps de réponse, de précision, de faible erreur et de stabilité.

V.2. Définition d'un AG

Les Algorithmes Génétiques (AGs) sont des techniques de recherche robustes. Ils représentent une famille assez riche et très intéressante d'algorithmes stochastiques d'optimisation qui sont fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Le principe de ces algorithmes est de procéder par une recherche stochastique sur un espace important et à travers une population de pseudo-solutions. L'une des principales caractéristiques des AG est leur robustesse, qui leur permet de présenter une ou plusieurs réponses de «bonne» qualité (pas nécessairement optimales, mais suffisamment faibles en pratique) à un large éventail de problèmes tout en nécessitant un investissement relativement faible (temps et puissance de calcul). Les AGs recherchent des choses au hasard [103].

Connue comme une fonction de coût, d'adaptabilité ou d'adéquation ainsi qu'une fonction d'objectif (aptitude). En conséquence, ils sont conçus pour maximiser ou diminuer cette fonction. En fait, une partie importante du fonctionnement de l'AG dépend du hasard. Les AGs ne sont pas complètement aléatoires, malgré le fait qu'elles reposent sur le hasard. Ils utilisent avec succès les informations recueillies précédemment pour émettre des hypothèses sur la position de nouveaux points à rechercher dans l'intention d'améliorer les performances. L'utilisation des AGs par rapport aux approches alternatives est justifiée par les qualités suivantes [104] :

- Les AG utilisent un codage des paramètres plutôt que les paramètres eux-mêmes ;
- Les AG travaillent sur une population de points plutôt que sur un seul point ;
- Les AG n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas ses valeurs dérivées ni aucune connaissance auxiliaire ;
- les AGs peuvent traiter des problèmes complexes et variés ;
- les AGs ne sont pas déterministes, mais utilisent plutôt des règles de transition probabilistes.

V.3. Bref historique de l'AG

Dans les années 1950, de nombreux scientifiques américains ont utilisé des ordinateurs pour imiter les processus biologiques, ce qui a conduit au développement des premiers AGs [105]. Sur la base de recherches antérieures, le professeur Holland, ses collègues et ses étudiants ont

créé ces algorithmes à l'Université du Michigan en 1960. Leur étude avait deux objectifs principaux ; le premier était de souligner et de décrire avec précision les processus d'adaptation des systèmes naturels, et le second était de construire des systèmes artificiels (dans le cas des logiciels) qui avaient les mêmes qualités clés que les systèmes naturels. En 1966, Fogel a proposé la théorie de la programmation évolutionniste. En 1975, Holland a publié son premier modèle formel d'AGs (l'algorithme génétique canonique AGC) dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ce modèle sera utilisé comme point de départ pour de futures recherches [106]. Goldberg a formalisé l'utilisation d'AGs pour résoudre les problèmes d'optimisation en 1989. Avec la publication de son livre, il sera en mesure de décrire comment ces algorithmes sont utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation.

V.4. Principes généraux

Les algorithmes d'optimisation appelés "AG" sont basés sur la sélection génétique et naturelle, la pollinisation croisée, la mutation et d'autres stratégies évolutives. Un algorithme génétique recherche les extrêmes d'une fonction qui a été définie sur un ensemble de données. La méthode s'exécute en parallèle sur une population de points candidats appelés individus ou chromosomes pour atteindre cet objectif. Chaque individu est constitué d'un ensemble de parties appelées Gènes, dont chacune est représentée par un bit (0 ou 1), et chaque chromosome par une suite de bits. Chaque gène représente un aspect fondamental du problème ; il peut être assimilé à une variable et peut accepter des valeurs de plusieurs allèles. L'emplacement du gène dans un locus est un chromosome. En général, les éléments suivants sont requis pour un AG [107]:

- Un principe de codage des éléments de population : Cette étape affecte une structure de données à chaque point de l'espace d'état. Elle est souvent mise en œuvre à la suite d'une phase de modélisation mathématique du problème. L'efficacité des AGs est déterminée par la qualité de l'encodage des données. Le codage binaire était autrefois fréquemment utilisé. Le codage réel est actuellement fréquemment utilisé, en particulier dans les applications impliquant l'optimisation de problèmes à variables réelles.
- Une méthode de fabrication de la population initiale : Ce mécanisme doit être capable de produire une population non homogène d'individus pour servir de socle aux générations futures. La population d'origine est importante car elle servira de base aux générations futures. Si rien n'est connu sur le problème à traiter, il est essentiel que la population de

- Départ soit répartie dans toute la région d’étude ;
- Une fonction optimale pour évaluer la force de chaque chromosome ;
- Des opérateurs qui permettent à la population de se diversifier à travers les générations et d'explorer l'espace étatique : « exploration de l'espace étatique ;
- Paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre de générations, critères d'arrêt et probabilité d'appliquer des opérateurs génétiques.

V.5 .Fonctionnement d’un AG

Un AG suit généralement un processus en quatre étapes [108]:

- Une représentation génétique ou chromatique d'une solution de problème ;
- La création d'une population de chromosomes ;
- L'évaluation de chaque chromosome selon une fonction d'adaptation basée sur des performances souhaitables ;
- La sélection des meilleurs chromosomes ;
- manipulation génétique, en utilisant des opérateurs génétiques pour créer une nouvelle population de chromosomes.

La figure suivante illustre le cycle génétique de fonctionnement d’un AG :

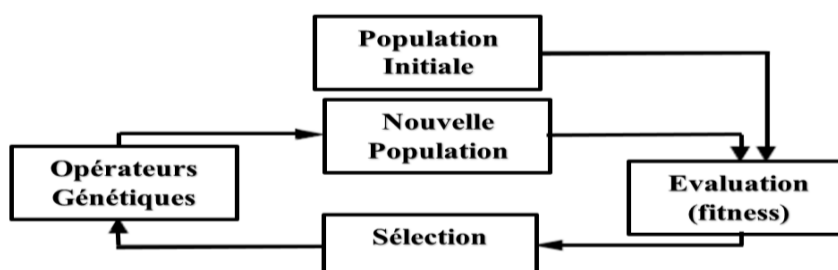


Figure V-1: Cycle génétique

La figure V.1 illustre un cycle influencé par la nomenclature génétique. Les AGs travaillent avec une population qui est absorbée par un groupe de personnes. Cette population se constitue progressivement ou à la suite d'informations préalables sur le sujet à étudier.

Chaque chromosome contient un groupe de gènes[109]. C'est l'étape de l'évaluation dans laquelle nous attribuons une valeur à chaque individu en fonction d'une fonction appelée fonction d'adaptation ou fitness. Cela permet de sélectionner les chromosomes les plus appropriés. Ces chromosomes, appelés « parents », sont exposés à des opérations génétiques

(croisement, mutation) afin de produire des chromosomes supplémentaires, appelés descendants.

La prochaine génération est composée d'"enfants". Les étapes AG sont poursuivies pendant t cycles, l'algorithme s'arrêtant après un critère d'arrêt.

V.6 .Les outils évolutionnaires de base d'un AG

Les (AG), sont basés sur trois éléments principaux : la **sélection**, le **croisement** et la **mutation**. Dans la littérature il s'agit d'**opérateurs** de reproduction. Leur principe est simple, comporte trois phases [110]:

- 1- la genèse (l'initialisation aléatoire d'individus pour former la population de la première génération).
- 2- la reproduction (l'évolution des individus de la génération courante vers la suivante) :
 - la sélection des individus reproducteurs.
- 3- le croisement génétique de ces individus pour la création de nouveaux individus.
- 4- la mutation de certains individus pour que la création génétique ne s'affaiblisse pas.
- 5- l'évaluation des individus par le calcul de leur fonction d'adaptation.
- 6- Recherche de l'individu le plus adapté selon les critères souhaités. La solution sera représentée par le meilleur individu de la dernière génération.

Pour résumer, L'AG est fondé sur [111]:

- Une représentation chromosomique des solutions du problème.
- Une méthode pour générer une population initiale de solutions.
- Une fonction d'évaluation (fitness) pour classer les solutions en fonction de leurs dispositions.
- Les valeurs des paramètres utilisés par l'AG.

V.7. Opérateurs et paramètres de l'AG

Dans cette section, nous passerons en revue les différents opérateurs et paramètres d'un AG, tels que le codage, l'évaluation, la sélection, le croisement et la mutation.

V.7.1. Codage des chromosomes

L'encodage (représentation) des réponses sous forme de chromosomes est la première étape de la création d'un AG. En utilisant le langage génétique naturel, une solution possible (ou un individu) est codée sous la forme d'un chromosome, qui est une chaîne de gènes ou de bits. Le codage est une représentation d'une solution à un problème particulier. Plusieurs stratégies sont utilisées pour réaliser cette modélisation. Dans l'AG de base de Holland, un chromosome était représenté sous la forme de chaînes de bits transportant toutes les informations nécessaires pour caractériser un lieu dans l'espace, permettant des opérateurs de mutation et de croisement[112]. Facile. Les paramètres sont constitués des nombres 1 et 0. Dans ce scénario, chaque valeur réelle (paramètre d'optimisation) est codée par son équivalent binaire. L'encodage binaire est le nom donné à ce type d'encodage. C'est vraiment simple à mettre en œuvre.

V.7.2. Initialisation de la population

Une fois le codage décidé, une population initiale de solutions de résolution de problèmes doit être déterminée. Une population est un groupe de personnes, dont chacune représente une solution potentielle à un problème particulier. La vitesse de l'algorithme est fortement influencée par la population de départ. Si la localisation de l'optimal dans l'espace d'état est inconnue, c'est pour produire des personnes au hasard dans chacun des domaines liés à l'espace d'état. Si, d'un autre côté, les connaissances antérieures sur le problème sont connues, il semble logique de créer des personnes dans un certain sous-domaine afin d'accélérer la convergence.

Ce qui suit est une représentation Pop de la population : $Pop = (C_1, C_2, C_3... C_i..., C_T)$ Où C_i désigne le i ème chromosome de la population et T désigne le nombre total de chromosomes de la population[113].

V.7.3. Fonction d'adaptation

Le but de l'adaptation est d'orienter tout le domaine de la recherche génétique vers la « meilleure » option. Il permet de mesurer et d'évaluer la performance et la capacité de survie d'un individu. La sortie de la fonction d'évaluation vous permettra de choisir ou de rejeter une personne afin de ne conserver que les personnes avec le coût le plus bas sur la base de la population actuelle[114].

IV.7.4. Évaluation

La fitness de chaque chromosome est évaluée par fonction de fitness ou fonction objective, de sorte que seuls les chromosomes les plus appropriés, en d'autres termes, les meilleurs paramètres de relais soient sélectionnés et traités à l'étape suivante. Puisque le but de cet article est de minimiser le temps de fonctionnement des relais et le TSM de chaque relais pour améliorer les performances des relais de surintensité dans les parcs éoliens, il est judicieux de formuler notre objectif, comme indiqué dans l'équation suivante :

$$OF = \min \sum_{i=1}^n (t_i)^2 \quad (V - 1)$$

où t_i est le temps de fonctionnement des relais de surintensité. En appliquant ce OF, nous sommes en mesure de minimiser le temps de fonctionnement des relais et d'obtenir en conséquence les valeurs TSM, cependant, les contraintes de coordination sont ignorées, ce qui peut entraîner une mauvaise coordination pour les relais dans les parcs éoliens, en particulier pour le type de défaut symétrique[115]. Par conséquent, il est extrêmement vital d'introduire des contraintes de coordination dans notre l'équation suivante :

$$OF = \min[\sum_{i=1}^n (t_i)^2 + \sum_{m \& b=1}^n (\Delta t_{mb})^2] \quad (V - 2)$$

IV.7.5. Sélection

Suite au processus d'évaluation, une nouvelle génération de la génération actuelle est née. Les parents qui apportent une contribution aux enfants de la génération suivante sont déterminés par le processus de sélection. Le processus de sélection permet d'identifier et d'exclure statistiquement les meilleurs individus d'un groupe. Chaque chaîne de génération courante (population à l'instant t) est dupliquée avec une probabilité basée sur les valeurs de la fonction à optimiser pour une génération intermédiaire, puis répliquée, dans le processus de sélection. Copier les chaînes en fonction de leurs valeurs pour la fonction d'adaptation donne aux chaînes la plus grande probabilité de contribuer à la génération suivante [116]. Il est possible que ce soit l'opérateur le plus important puisqu'il permet aux membres d'une population de vivre, de se reproduire ou de mourir. En général, la probabilité de survie d'un individu est directement corrélée à son efficacité dans le groupe. Il existe de nombreux exemples dans la littérature. Quelques principes de sélection plus ou moins adaptés aux problématiques découvertes. Les trois critères de sélection suivants ont piqué notre intérêt :

IV.7.5.1. Sélection par la roulette

C'est la méthode la plus populaire et la plus basique. Il est parfois appelé la sélection de la roue de la fortune. La probabilité de sélection augmente proportionnellement à la capacité d'un individu à s'adapter à un défi. Il s'agit d'une roue du destin traditionnelle, chaque individu étant représenté par une section basée sur sa capacité d'adaptation[117]. On effectuera alors un tri homogène sur cette roue.

Sur la base de leurs performances, les parents sont choisis. Plus une personne a de chances d'être choisie, plus elle est performante. Considérez une roulette de casino avec tous les membres de la population placés dessus, la position de chacun étant déterminée par son degré d'adaptabilité. Cette roulette est représentée par le schéma suivant :

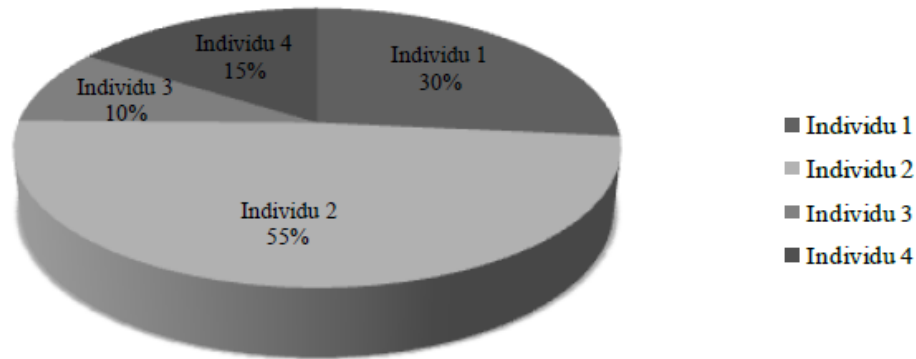


Figure V-2: Un exemple de sélection de roulette.

Selon cette statistique, la population se compose de quatre personnes, les nombres indivis 2 et 1 ayant une plus grande chance d'être choisis en raison de leur performance. En réalité, pour utiliser la roue, la dernière fois (taille de la population) est tournée comme suit [118]. Ensuite, nous comparons ces chiffres à la probabilité cumulée q_j , ce qui donne :

$$q_j = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_j \quad (V - 3)$$

Où $p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_j$ sont les probabilités de sélection individuelles. La relation suivante [9] est utilisée pour calculer cette probabilité :

$$p_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (V - 4)$$

Avec :

$F(x_i)$ c'est la valeur de la fonction d'adaptation correspondante au individu ; $\sum_{i=1}^N F(x_k)$ représente la somme de toutes les valeurs des fonctions d'adaptation de chaque individu c_i de la population. Ensuite, si $r_1 < q_1$, l'individu c_1 est sélectionné, sinon c_j est sélectionné, avec $2 \leq j \leq N$, tel que $q_{j-1} < r_1 < q_j$. On procède de la même manière pour le reste des r_i ($i=2 \dots N$).

IV.7.5.2. Sélection par ordonnancement

Ce type de sélection, également connu sous le nom de sélection par catégorisation, est basé sur le principe de sélection le plus élémentaire. Il s'agit de catégoriser chaque individu en fonction de son niveau d'adaptation (croissant ou décroissant). Le meilleur (c'est-à-dire le plus en forme) sera classé en premier, et ainsi de suite. Cette population restreinte est ensuite utilisée pour créer une nouvelle population. Cependant, cette technique apparaît trop simple et exagère l'importance de la meilleure partie, au détriment d'autres aspects matériels exploitables. Le second, par exemple, aura beaucoup moins de chances d'être choisi que le premier. Le principal inconvénient de cette stratégie est que l'AG converge trop tôt. Un autre défi consiste à limiter la sélection, ce qui pourrait rendre difficile la rétention de candidats solides pour les générations futures [119].

IV.7.5.3. Sélection par tournoi

Le concept de sélection de tournoi augmente la probabilité que des personnes de faible qualité participent à l'amélioration de la population. L'idée est simple à appliquer. Un tournoi est une réunion de nombreuses personnes choisies au hasard dans la population. Le gagnant du concours est le meilleur individu. Cette approche utilise une sélection proportionnelle sur des paires de personnes, puis sélectionne l'individu avec le score d'adaptation le plus élevé pour ces paires. Cette procédure est effectuée jusqu'à ce que N personnes soient acquises. L'avantage d'une telle sélection est qu'elle évite de sélectionner plusieurs fois un individu très fort [120].

IV.7.5.4. Sélection uniforme

Dans cette situation, la sélection est déterminée au hasard, sans influence de la valeur d'adaptation. Il s'agit d'une procédure de base qui consiste à choisir un individu dans une population. En conséquence, chaque individu a $1 / N$ de chance d'être choisi, où N est le nombre total d'individus dans la population [121].

IV.7.6. Croisement

Après l'achèvement de l'étape de sélection, l'AG poursuit sa recherche en employant l'opérateur de croisement. Le croisement (hybridation ou recombinaison) est un processus nécessaire qui nous permet d'étudier toutes les différentes solutions qui résultent de nouvelles personnes appelées enfants (progéniture) d'individus appelés parents. L'objectif du croisement est d'augmenter la diversité de la population en influençant les individus (chromosomes) . On pense traditionnellement que les croix ont deux parents et deux enfants. Ils consistent à transférer l'ADN des parents afin de produire des enfants présentant une combinaison de caractéristiques. Bien qu'il soit aléatoire, cet échange d'informations donne aux AGs une partie de leur puissance : d'excellents gènes d'un parent peuvent parfois remplacer de mauvais gènes d'un autre, ce qui donne des fils mieux adaptés que leurs parents. Pour réaliser cette procédure, une partie de la population sélectionnée (Gt) sera exposée au crossover. En conséquence, l'opérateur de choix a choisi deux personnes (deux parents) au hasard et avec une probabilité restreinte déclarée[122].

Cette population il crée ensuite deux descendants en sélectionnant au hasard les gènes d'un parent et en les échangeant avec ceux de l'autre. Les deux descendants nés de ce croisement sont inclus dans la population. Cette dernière sera donc constituée d'une fraction de l'énergie dégagée par la traversée. Le reste est dérivé directement de la population (Gt) sans altération. Le nombre total de personnes dans p' (Gt) est toujours égal au nombre total de personnes dans la population de départ. Il existe plusieurs méthodes de croisement. Chaque approche est utilisée sur des chromosomes qui ont une représentation binaire ou réelle. Dans ce qui suit, nous donnerons différentes stratégies[123].

IV.7.6.1. Croisement arithmétique (barycentrique)

Cette technique a été créée par "MICHALEWICZ". Pour ce type de croisement, les positions d'échange sont choisies au hasard, suivies de moyennes arithmétiques pondérées par un coefficient a. Lorsque cette opération est effectuée sur deux parents $C_1(i)$ et $C_2(i)$ deux enfants sont produits (descendance) $E_1(i)$ et $E_2(i)$ sont générés, comme:

$$\begin{cases} E_1(i) = a C_1(i) + (1 - a)C_2(i) \\ E_2(i) = (1 - a)C_1(i) + aC_2(i) \end{cases} \quad (V - 5)$$

Dans le cas d'un croisement arithmétique uniforme, la valeur de an est une constante choisie par l'utilisateur ; cependant, si la valeur de an est générée aléatoirement dans l'intervalle

[-0,5 ; 1.5], nous avons un croisement arithmétique non uniforme[124]. L'illustration ci-dessous représente une application de ce type de franchise :

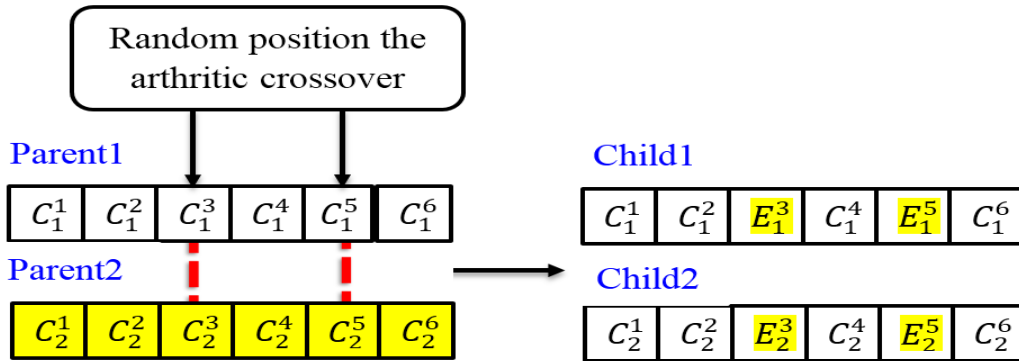


Figure V-3 :Le croisement arithmétique.

Selon cette figure, les deux nouveaux troisièmes gènes sont nés par:

$$\begin{cases} E_1^3(i) = a C_1^3 + (1 - a)C_2^3 \\ E_2^3(i) = (1 - a)C_1^3 + aC_2^3 \end{cases} \quad (V - 6)$$

IV.7.7. Mutation uniforme

Pour chaque gène mutant, deux nombres et r sont attribués. Le premier peut prendre les valeurs +1 pour un changement positif et -1 pour un changement négatif. Le second est un nombre alphanumérique généré dans l'intervalle [0 1]. Il détermine l'ampleur du changement. Dans ces circonstances, le gène C_i' qui remplace le gène muté C_i est calculé selon l'une des deux relations suivantes [125] :

$$\begin{cases} C_i' = C_i + (C_{max} - C_i) \left(1 - r^{\left(1 - \frac{G_F}{G_T}\right)^5}\right) & \text{si } \tau = +1 \\ C_i' = C_i - (C_i - C_{min}) \left(1 - r^{\left(1 - \frac{G_F}{G_T}\right)^5}\right) & \text{si } \tau = -1 \end{cases} \quad (V - 7)$$

ici C_{max} , C_{min} désignent respectivement les bornes inférieure et supérieure du prix du paramètre et $G_F \leq G_T$ représente l'ère pour laquelle l'amplitude de la mutation s'annule.

V.8. Description des AGs

D'une manière générale, un AG manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

Il fait évoluer une population de gènes en utilisant les mécanismes de sélection naturelle et

de la génétique de l'évolution. Les personnes plus fortes se reproduiront plus fréquemment et produiront plus de descendants que les personnes plus faibles.

Chaque chromosome est constitué d'un ensemble de composants appelés gènes ou caractéristiques. L'objectif est d'identifier la combinaison idéale de ces composants qui offre le plus haut niveau de forme physique. Une nouvelle population est créée à partir de la population précédente à chaque itération (génération de population). Le principe des AG est présenté ci-après [126] :

Définitions de paramètres initiaux:

- nombre d'individus
- nombre de générations
- probabilités, etc

Opérateurs génétiques Sélection
Permutation et insertion de matériel
génétique, et évaluation des nouveaux
individus

Le processus aléatoire étant Orienté par la
sélection. Les individus de la nouvelle
génération tendent à être de meilleure
qualité que ceux de la génération
précédente

Le processus est répété jusqu'à ce qu'un
critère de convergence soit satisfait

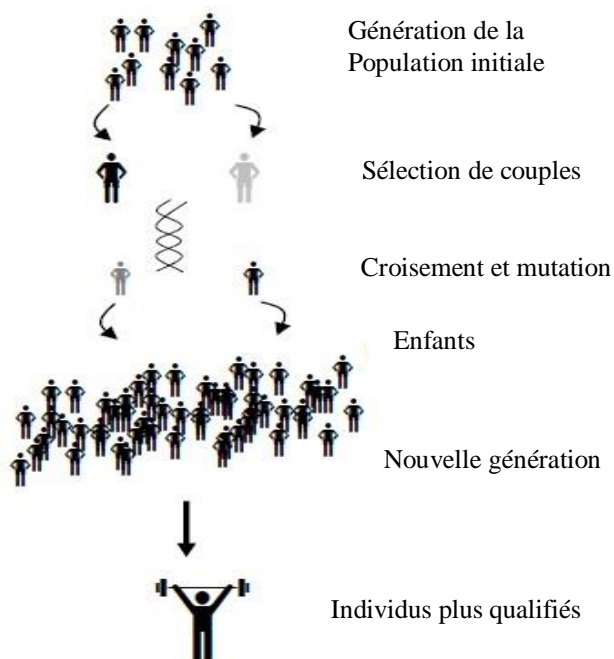


Figure V-4: Concepts de base d'un AG

Dans ce qui suit, nous allons décrire plus en détail les différentes étapes du simple AG de la figure V.4 :

V.9. Technique AG proposée pour la protection des parcs éoliens

L'AG est une méthode avancée et pratique qui peut être utilisée pour une variété d'applications afin d'optimiser les solutions, y compris problèmes où les fonctions objectifs (OF) sont discontinues stochastique, et non différentiable ou non linéaire . L'AG peut également être implémenté pour des problèmes de programmation mixte en nombres entiers où certains éléments sont contraints d'être des valeurs entières. AG remplit trois types de règles à chaque étape pour produire la suivante génération de la population en cours, appelée sélection,

croisement et mutation. Dans la sélection, les individus sont sélectionnés, qui sont nommés comme parents, pour contribuer à la population à la prochaine génération[127]. Crossover est ensuite utilisé pour combiner deux parents pour créer des enfants pour la prochaine génération. À la fin mutation est implémentée afin d'appliquer des changements aléatoires à parents individuels pour générer des enfants. Les étapes sont expliquées dans les sections suivantes et l'organigramme de l'approche AG a également été représenté sur la figure V.5.

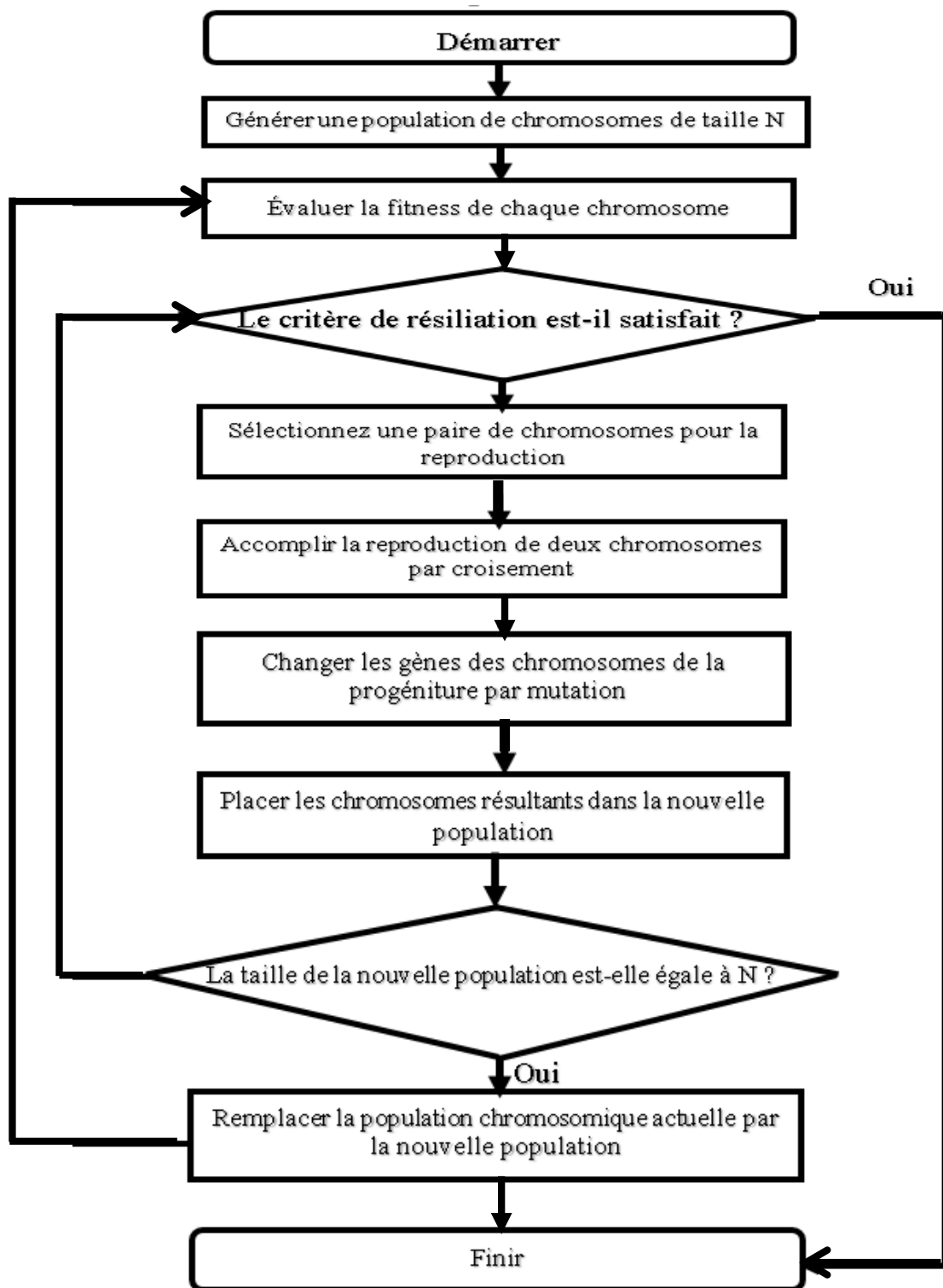


Figure V-5: Organigramme pour l'approche de l'AG.

que le TSM ne peut pas se permettre d'être à 0 car le relais fonctionnera instantanément et provoquera une mauvaise coordination. Enfin, la relation entre TSM de chaque relais avec les autres relais a également été formulée comme une contrainte afin d'éviter tout dysfonctionnement et mauvaise coordination entre les relais.

V.9.1. Initialisation

Au tout début de l'AG, un pool préliminaire de chromosomes aléatoires appelés « parents » est généré. Les parents sont essentiellement des ensembles de paramètres de relais aléatoires qui doivent satisfaire les contraintes définies. Chaque ensemble de paramètres de relais est emballé dans un chromosome, donc chaque chromosome contient TSM pour tous les relais du parc éolien. Le nombre d'ensembles TSM correspond à la taille de la population qui doit être définie correctement lors de l'initialisation. Plus la taille de la population sélectionnée est élevée, plus les ensembles TSM sont générés, par conséquent, de meilleurs réglages pour le relais peuvent être obtenus à la fin du processus d'AG, cependant, si une taille de population énorme est choisie, un temps beaucoup plus long devrait être prévu pour l'AG pour traiter tous les parents en fonction des contraintes sélectionnées et peut ne pas convenir à certaines applications en ligne nécessitant une vitesse de fonctionnement élevée[128]. Ainsi, une taille de population raisonnable basée sur le problème d'optimisation doit être désignée. Les contraintes définies pour les chromosomes sont fondamentalement les contraintes qui sont définies pour les relais de protection. Les contraintes pour la coordination du relais de surintensité ont été définies comme:

$$\Delta t_{mb} = t_b - t_m - CTI \geq 0 \quad (V - 8)$$

$$0.05 \leq TSM \leq 1 \quad (V - 9)$$

$$TSM_{imin} \leq TSM_i \leq TSM_{imax}. \quad (V - 10)$$

Dans ces équations, Δt_{mb} représente le temps de discrimination entre le relais de secours et le relais de surintensité principal, t_b et t_m sont le temps de fonctionnement du relais de secours et principal.

V .10. Avantages et inconvénients des AG

V .10.1. Avantages

- Les AGs opèrent au niveau du codage des paramètres sans comprendre la nature des paramètres ; par conséquent, ils peuvent être utilisés pour une grande variété de

problèmes qui peuvent dépendre d'une variété de paramètres différents (booléens, entiers, réels, fonctions, etc.) [129] ;

- Pour les mêmes raisons, un AG est complètement indépendant de la nature du problème et de la fonction à optimiser car il n'utilise que des valeurs d'adaptation, qui peuvent être très différentes des valeurs de la fonction à optimiser même si elles sont calculées à partir de dernier ;
- La possibilité que l'AG enquête sur chaque point de l'espace simultanément réduit la probabilité qu'ils puissent accidentellement entrer dans des optimums locaux ;
- Les seules valeurs utilisées par l'AG pour optimiser la fonction sont celles de la fonction elle-même ; des calculs coûteux et parfois assez compliqués ne sont pas nécessaires.
- Les AG ont une forte robustesse, ou une forte capacité à localiser les optimums globaux des problèmes d'optimisation.

V.10.2.Inconvénients

- Comparés à des méthodes d'optimisation plus traditionnelles, les AGs sont actuellement peu performants en termes de coût (ou de vitesse de convergence).
- Parfois, les AG convergent rapidement vers un membre particulier de la population dont la valeur d'adaptation est assez élevée ;
- La réponse codée sous forme de flux binaire a parfois du mal à respecter la contrainte de domaine. Il est important de bien sélectionner le codage ou de changer les opérateurs ;
- L'utilisation d'un AG ne garantit pas le succès de l'optimisation [130] ;
- En réalité, l'efficacité d'un AG dépend souvent du type de problème d'optimisation. Le choix des opérateurs et des paramètres sera fréquemment critiqué, mais aucune théorie générale ne permet d'avoir la certitude de connaître la para métrisation optimale ; au lieu de cela, il faut un certain nombre d'expériences pour s'en approcher. Nous allons maintenant examiner comment calculer les pertes d'énergie sur le réseau de test sans GER.

V.11. Procédure d'optimisation pour les deux régulateurs

La méthode d'optimisation est un algorithme hybride qui consiste en un ensemble de règles génétiques associées à une méthode de recherche locale (Gradient ou Simplex) et opère sur des paramètres régulateurs . Le schéma de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous.

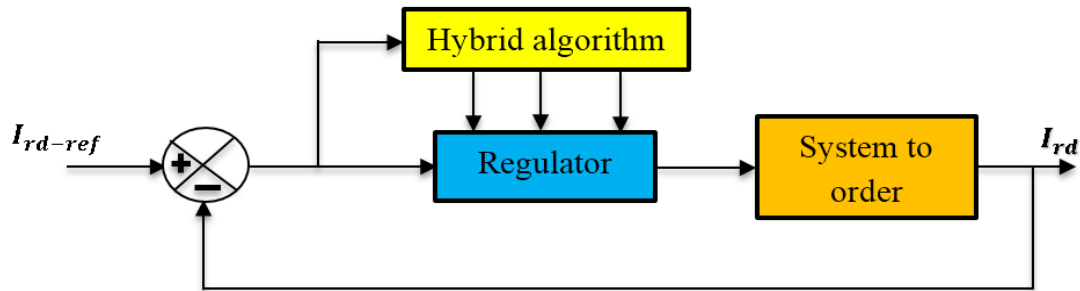


Figure V-6:Principe d'optimisation par gradient génétique ou algorithme du simplexe.

La procédure d'optimisation des paramètres du régulateur est résumée en suivant les étapes suivantes :

- Une première progéniture est née au hasard.
- Évaluez cette progéniture.
- Appliquer des opérateurs génétiques (sélection, croisement, mutation).
- Évaluer le type de la nouvelle progéniture créée par les opérateurs génétiques.
- Répétez le processus pour une variété donnée de progéniture.
- Choisissez le meilleur personnage de la nouvelle progéniture.
- Utiliser une approche de recherche proche (gradient ou simplex) pour finaliser l'opération d'optimisation réalisée en utilisant l'AG.

V.12. Optimisation du régulateur PI classique

L'optimisation de ce régulateur est exécutée à l'aide d'un ensemble génétique hybride des règles du simplexe en utilisant la méthode de la fenêtre " Gatool " qui a été développée par Matlab. Voici les paramètres de l'algorithme utilisé :

- Taille de la progéniture $T = 20$
- Sélection à la roulette.
- Croisement multiple avec chance $pc = 0.8$.
- Mutation uniforme avec opportunité $pm = 0.01$.

- Nombre de descendants $N = 49$.
- Technique d'hybridation : simplex.

V.13. Résultats de la simulation

L'enquête a été menée sur un système GADA de 1,5 MW, les contrôles d'AG proposés. Pour pouvoir montrer l'utilité de l'optimisation des gains PI classiques grâce à l'AG mélangé à la méthode du simplexe, nous avons exécuté les mêmes étapes de simulation fournies dans cet article. A partir des résultats de simulation obtenus, nous pouvons observer l'Amélioration de la performance globale dynamique. Les conséquences de la simulation évoquée dans l'AG manipulant la machine électrique éolienne dépendent principalement de GADA pour alimenter le réseau en électricité sur la figure V.7, où l'on observe une nette amélioration au niveau dynamique par rapport aux régulateurs PI:

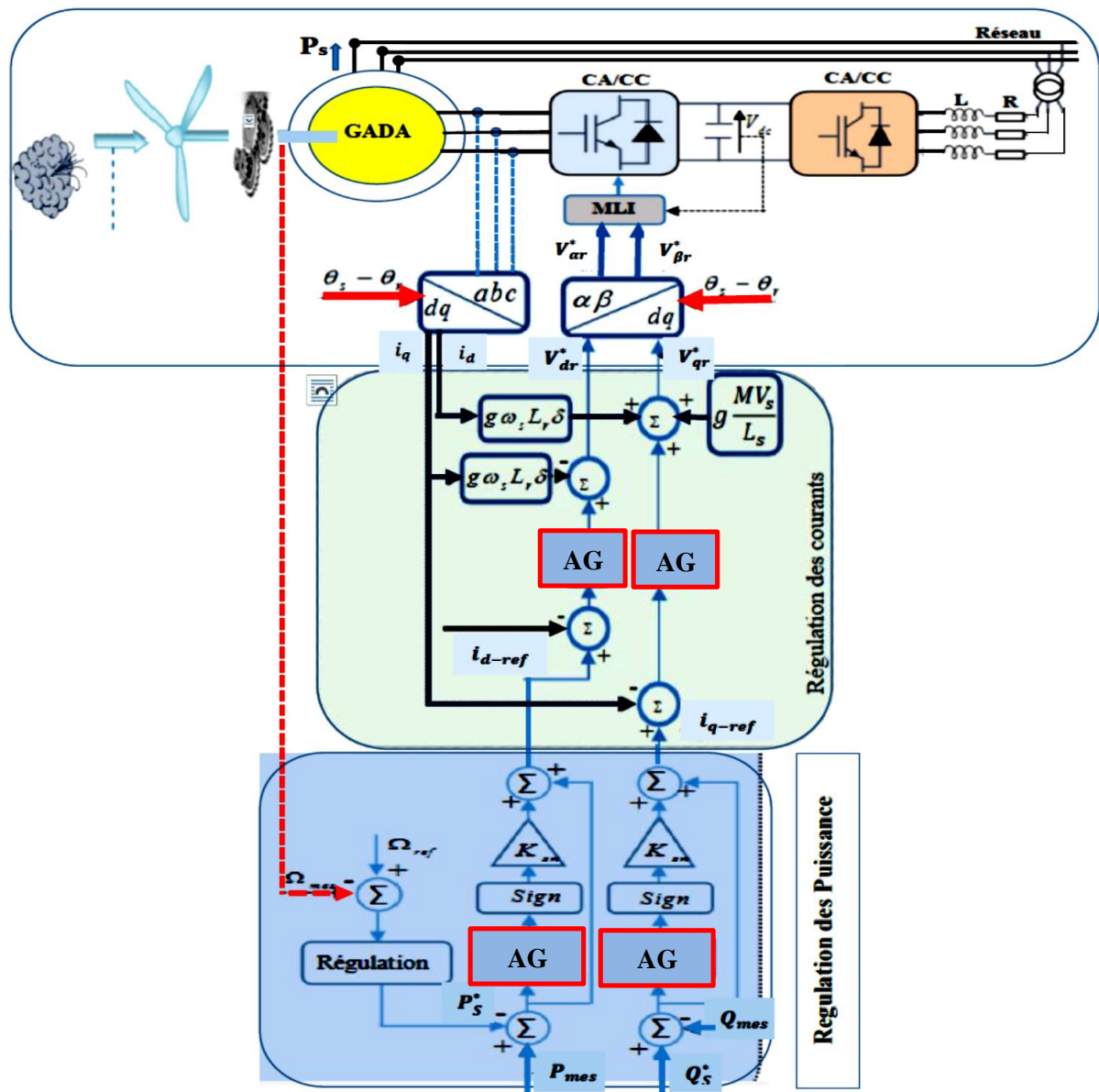


Figure V-7: Schéma fonctionnel global de la commande de l'AG basé sur GADA

Pour les tests de robustesse du régulateur AG, nous avons étudié l'effet de la variation de la résistance, de l'inductance et de la mutualité du rotor sur les performances du régulateur AG. Les résultats de simulation de notre système éolien (turbine + GADA) sont contrôlés par un régulateur AG. Le démarrage est à zéro, puis une puissance de référence est appliquée :

❖ **Puissance active :**

- ($P_{ref} = 0 \text{ W}$) ; pour que $t \in [0 ; 0.2] \text{ s}$.
- ($P_{ref} = -20000 \text{ W}$) échelle négative ; pour que $t \in [0.2 ; 0.6] \text{ s}$.
- ($P_{ref} = -10000 \text{ W}$) ; pour que $t \in [0.6 ; 1] \text{ s}$.

❖ **Puissance réactive :**

- ($Q_{ref} = 0 \text{ VAR}$) ; pour que $t \in [0 ; 0.2] \text{ s}$.
- ($Q_{ref} = -5000 \text{ VAR}$) échelle négative ; pour que $t \in [0.2 ; 0.6] \text{ s}$.
- ($Q_{ref} = 0 \text{ VAR}$) ; pour que $t \in [0.6 ; 1] \text{ s}$.

Les figures ci-dessous montrent les performances du contrôle de l'algorithme PI-génétique de puissance statorique réactive et active appliquée au GADA. Les figures V.8 et V.9 illustrent les réponses du système avec le contrôleur d'AG. En général, on peut voir que les étapes de puissance sont suivies par le générateur à la fois pour la puissance active et réactive. Cependant, on observe que l'effet du couplage apparaît sur l'une des deux puissances lors du changement de la consigne de l'autre puissance. Nous pouvons effectuer ces régulateurs en régime transitoire et en régime permanent en utilisant les critères suivants :

- Erreur maximale (dépassement).
- Le temps de récupération ou de stabilisation (le temps de réponse).
- L'erreur résiduelle (l'erreur statique). Les composantes directes et quadratiques du courant rotorique sont représentées sur la figure V.10 illustrent l'erreur de contrôle de i_{rd} et i_{rq} . A partir de ces courbes, on voit que :
 - le régulateur PI maintient les courants rotoriques à leurs références respectives imposées par la régulation de tension statorique ;
 - une diminution de la charge induit une diminution du courant rotorique ;
 - l'erreur de vérification de i_{rd} et i_{rq} est pratiquement nulle.

Les résultats des figures V.11 et V.12 et V.13 illustrent les résultats de simulation des courants statoriques selon les axes d et q et les courants triphasés rotoriques et statoriques générés par GADA sont proportionnels à la puissance active fournie. La forme d'onde des courants est presque sinusoïdale à la fois pour le courant statorique et le courant rotorique, ce qui signifie une bonne qualité de puissance fournie au réseau. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure V.14 montre le couple électromagnétique suivent parfaitement sa référence avec de bonnes performances dynamiques, moins d'oscillations et de dépassements et la figure V.15 montre la forme d'onde de la tension et du courant du stator. Il convient de noter que la tension statique est égale à la tension du réseau, alors que la forme d'onde du courant est liée à la puissance active et réactive. Le régulateur de l'AG n'autorise aucun écart, notamment en transit. Quant aux autres performances, elles sont quasiment identiques à celles du régulateur PI.

Montre l'excellence du contrôle par AG par le rejet effectif des effets des perturbations dont les autorités tracent complètement leurs références .

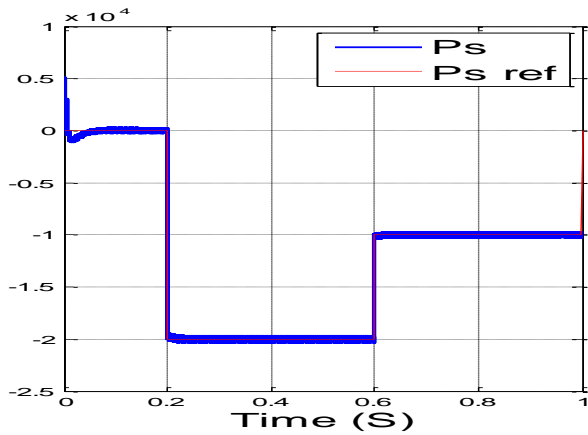


Figure V-8: Puissance active statorique.

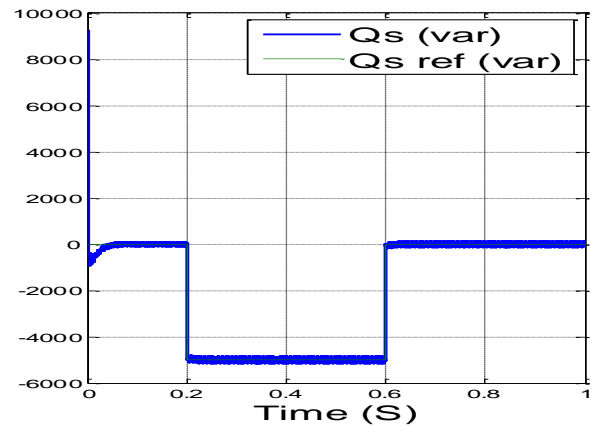


Figure V-9: Puissance réactive statorique.

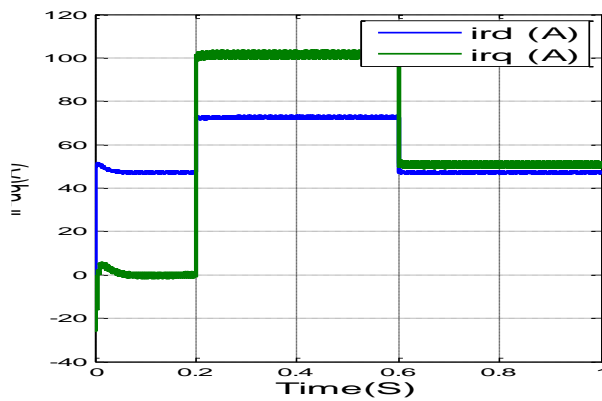


Figure V-10: Les courants directs et quadrature rotoriques.

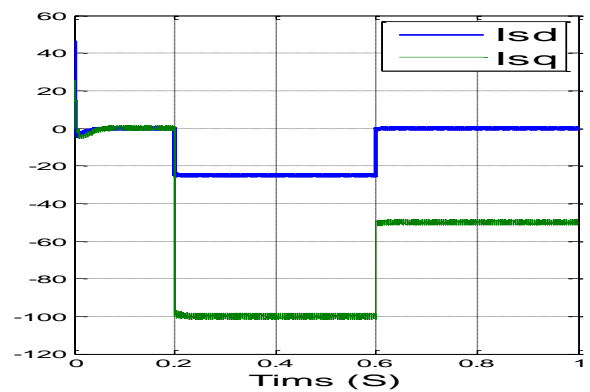


Figure V-11: Les courants direct et quadrature statoriques.

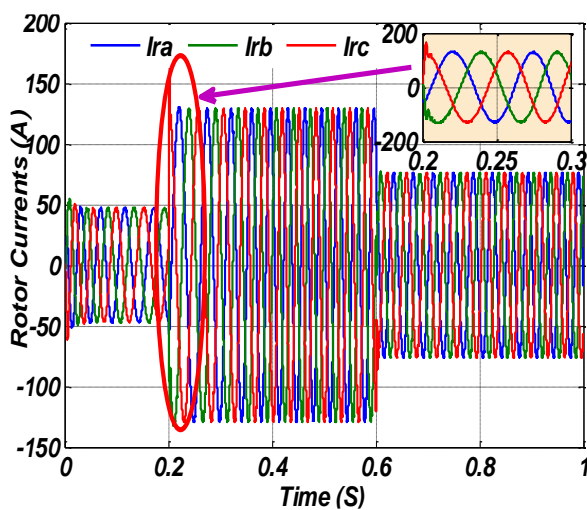


Figure V-12: Courant triphasé rotoriques.

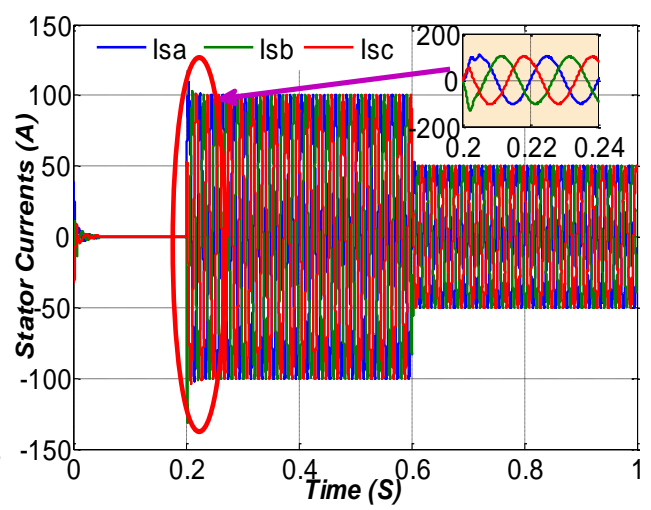


Figure V-13: Courant triphasé statoriques.

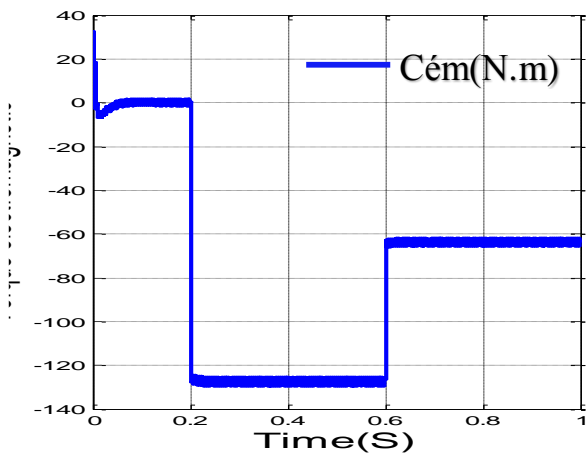


Figure V-14: Couple électromagnétique.

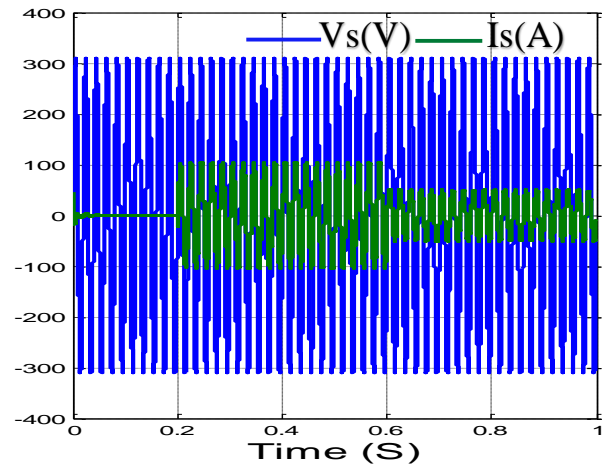


Figure V-15: Le courant et la tension Statoriques.

V.14. Comparer les résultats de recherche avec des références graphiquement pertinentes

Pour comparer les performances du contrôleur AG synthétisé à celles du régulateur conventionnel, des normes d'évaluation doivent être établies. Ces critères doivent tenir compte à la fois de l'amplitude maximale de l'erreur du régulateur et du temps nécessaire au système pour revenir à la cible après une perturbation ou établir une nouvelle référence.

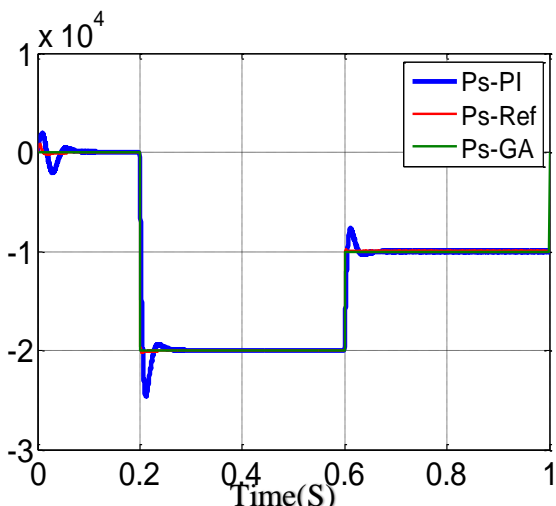


Figure V-16: puissance active statoriques.

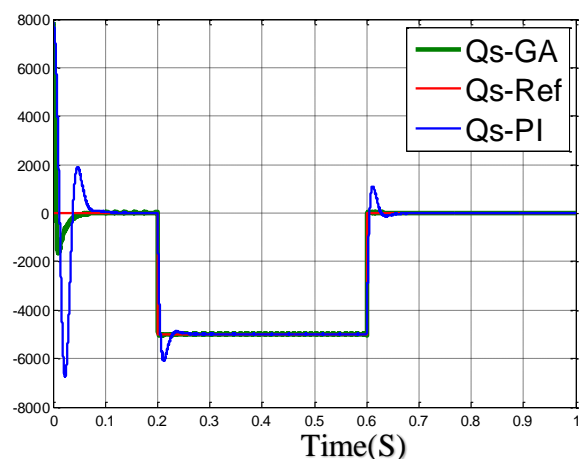


Figure V-17: puissance réactive statoriques.

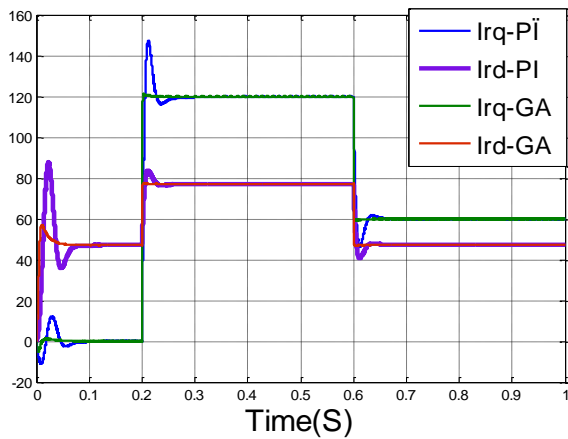


Figure V-18: Les courants directs et quadrature rotoriques.

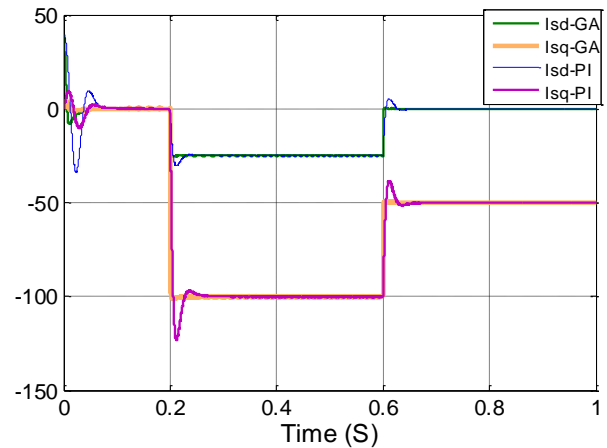


Figure V-19: Les courants direct et quadrature statorique.

Les figures V.16 et V.17 et V.18 et V.19 montrent les bonnes et efficaces performances de l'AG , qui a donné des résultats impressionnants très proches des valeurs de référence par rapport aux performances du contrôleur PI. Le réglage par AG peut remplacer le réglage par (PI) en ce qui concerne la qualité de la réponse dynamique du système. En effet, ce dernier réduit encore le temps de réponse en produisant un dépassement limité accompagné de faibles oscillations autour de la consigne en régime établi, la précision n'est pas aussi bonne que celle d'un régulateur (PI) où l'action intégrale élimine l'erreur statique, ceci alors suggère la combinaison des deux types de régulateurs .

- Un régulateur d'AG : pour le régime transitoire.
- Un régulateur (PI) : pour le régime établi.

L'inconvénient majeur des régulateurs d'AGs est l'appariement des gains assurant la stabilité du système. De plus, l'ordre n'est calculé qu'à partir des deux valeurs : l'erreur et la variation de l'erreur.

Pour évaluer l'efficacité des AG dans la recherche de profits et la régulation optimale de notre régulateur PI, Les résultats montrent les différentes courbes obtenues en commandant les puissances actives et réactives au niveau du stator GADA, ainsi qu'une comparaison des gains des régulateurs calculés manuellement et à l'aide d'AG (optimisé). Il est clair que la méthode d'optimisation avec AG répond mieux aux exigences telles que :

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

V.15. Comparaison de l'AG et du régulateur PI-Floue

La logique floue ou théorie des EF a attiré l'attention d'un grand nombre de chercheurs. Le contrôle par LF est mieux noté que les autres méthodes par rapport à l'AG car il ne nécessite pas de modèles mathématiques précis du système. En fait, sa force et sa simplicité sont les principales raisons pour lesquelles nous recherchons souvent plus sur cette technologie. Dans ce travail, nous développerons un contrôleur de flou. La faisabilité et les performances de ce contrôleur ont été validées dans une simulation au sein de l'élément de contrôle pour contrôler l'échange de puissance active et réactive généré par un GADA connecté à un réseau moyenne tension en agissant sur les signaux du rotor via un convertisseur bidirectionnel. Les résultats de simulation numérique obtenus démontrent l'intérêt croissant pour un tel contrôle de système électrique. L'accord atteint par LF peut annuler l'accord atteint par (PI) en termes de qualité de réponse dynamique du système. En fait, ce dernier réduit encore plus le temps de réponse en produisant un dépassement limité accompagné d'oscillations mineures autour de la valeur spécifiée en régime stable ; cependant, la précision n'est pas aussi bonne que celle d'un régulateur (PI) dont l'action intégrale élimine l'erreur statistique ; ceci suggère de combiner les deux types de régulateurs. L'inconvénient majeur des régulateurs flous est l'adéquation des gains assurer la stabilité du système. De plus, l'ordre n'est calculé qu'à partir de deux valeurs : l'erreur et la variation de l'erreur.

Les composantes directes et quadratiques du courant rotorique sont montrées pour illustrer l'erreur de contrôle de i_{rd} et i_{rq} . A partir de ces courbes, on voit que :

- ❖ les régulateurs PI maintiennent les courants rotoriques à leurs références respectives imposées par la régulation de tension statorique ;
- ❖ une diminution de la charge induit une diminution du courant rotorique ;
- ❖ l'erreur de vérification de i_{rd} et i_{rq} est pratiquement nulle.

Les résultats de la simulation permettront d'analyser les comportement des grandeurs GADA pour le sens d'écoulement du stator avec contrôle de la force réactive et réglage de la vitesse de rotation dans l'ordre pour maximiser l'énergie active fournie par les enroulements du stator. Pour cela, Matlab-Simulink a été utilisé. Les figures V.20 et V.21 montrent les résultats de simulation des forces statoriques actives et réactives. Selon ces figures, les forces statoriques mesurées suivent leurs références actives.

Il est à noter que cette différence affecte la courant rotorique continu, I_{rd} , et n'affecte pas le courant rotorique I_{rq} , ce qui explique pourquoi il y a une séparation entre les actives puissances et le courant I_{rd} .

Les figures V.22 et V.23 montrent les résultats de simulation de la rotation courants le long des axes d et q. Les figures V.24 et V.25 montrent résultats de simulation des courants statoriques selon les axes d et q.

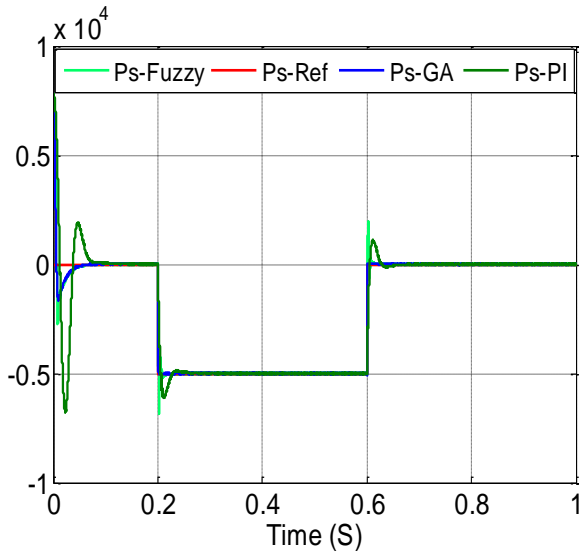


Figure V-20: Puissance active statoriques.

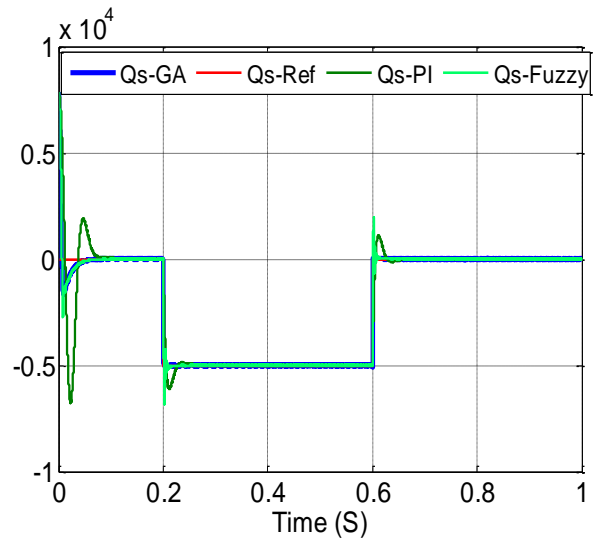


Figure V-21: Puissance réactive statorique.

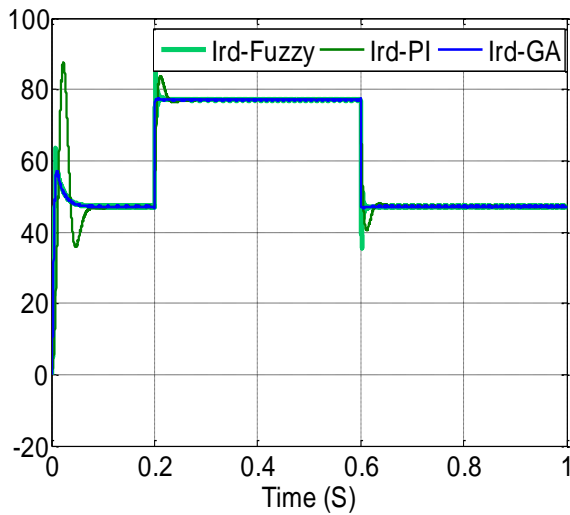


Figure V-22: Le courant direct rotorique.

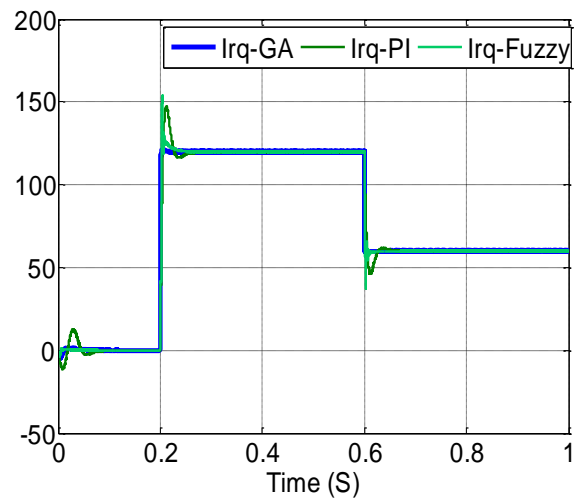


Figure V-23: Le courant quadrature rotorique.

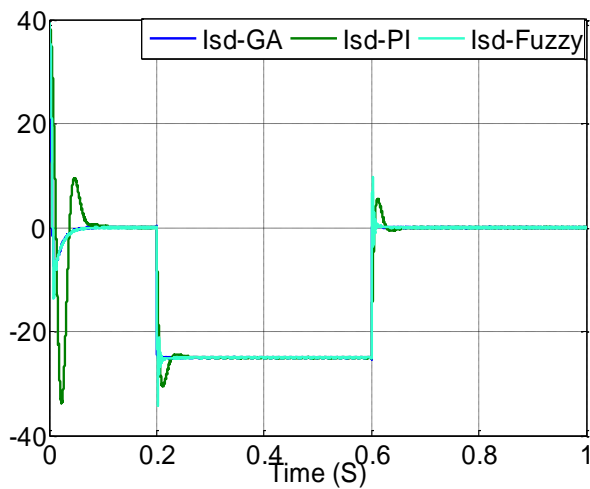


Figure V-24: Le courant direct statorique.

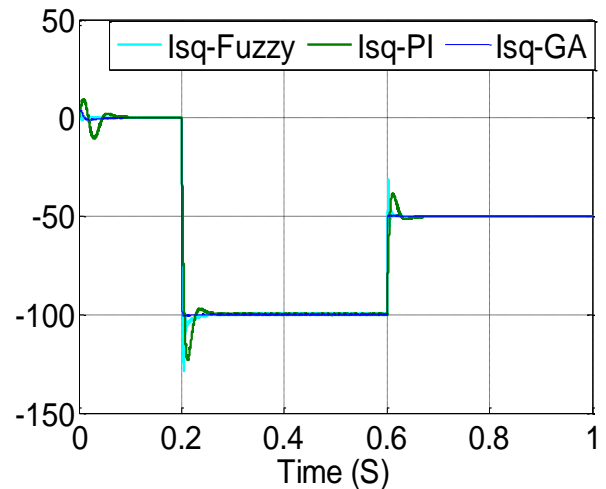


Figure V-25: Le courant quadrature statorique.

V.16. Réglage des paramètres d'un AG

L'élaboration d'un AG nécessite le réglage de quelques paramètres. Les résultats obtenus et la convergence de l'AG sont tous deux impactés par ce paramétrage. Cependant, il n'y a pas de règle spécifique pour ajuster les paramètres d'un AG ; au lieu de cela, ces décisions sont souvent prises sur la base de preuves empiriques. Ensuite, il y a quelques observations à faire [131] :

- **Probabilité de croisement** : La vitesse de convergence d'un AG est fortement influencée par la probabilité d'intersection. Elle encourage la recombinaison des individus à mesure qu'elle grandit et le fait tout en les aidant à atterrir dans un local idéal. Les valeurs typiques de ce paramètre vont de 0,6 à 0,95.
- **Probabilité de mutation** : Afin d'éviter que le développement de l'algorithme ne soit entravé, elle doit être relativement faible par rapport à la valeur de l'intersection. Une valeur élevée transformera l'algorithme en une recherche ad hoc, tandis qu'une valeur très faible rendra impossible l'optimisation locale. Les valeurs typiques de ce paramètre vont de 0,001 à 0,2.
- **Taille de la population** : La taille de la population peut être augmentée, ce qui augmente la diversité et diminue la probabilité d'une convergence prématurée vers un maximum local, mais cela allonge également le temps nécessaire pour atteindre les meilleures régions de la zone d'étude.

- **Nombre de génération** : Il est également possible de définir cela comme un critère de sortie à l'avance.

V.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des connaissances de base sur Problème d'optimisation en appliquant un AG pour contrôler la puissance active et réactive connectée à un réseau statorique (GADA). Efficacité de l'AG testé dans différentes conditions de fonctionnement, démontrant une optimisation et une efficacité en termes de résistance aux changements de rotor, d'insensibilité aux perturbations de couple, de temps de réponse, de précision, de vitesse ou de dépassement réduits, de dépassements de démarrage réduits et d'ondulations de puissance réduites et d'un THD amélioré , ainsi qu'une dynamique plus rapide avec une erreur de stabilisation minimale dans toutes les conditions de fonctionnement dynamiques. Les résultats de la simulation ont montré un bon comportement de contrôle orienté vers de meilleures performances du contrôleur proposé.

Conclusion Générale

Conclusion Générale et Perspectives

Cette thèse étudie deux problèmes majeurs avec le contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable et à pas variable basé sur un générateur asynchrone à deux sources. Ces deux préoccupations sont la robustesse face aux changements des conditions d'exploitation, à savoir l'imprévisibilité de la vitesse du vent, et la ténacité face aux changements des paramètres de la GADA. La méthode de la logique floue a été utilisée pour relever ces deux défis, pour l'extraction de la puissance maximale (MPPT) et le contrôle indépendant des forces actives et réactives de la GADA. Ensuite, nous avons examiné comment cette approche peut contribuer à améliorer la qualité de l'énergie électrique. Voici les principaux apports de cette thèse :

Sur la base d'une GADA d'une éolienne d'une capacité de 1,5 MW relié au réseau électrique, une modélisation complète d'un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable et à pas variable a été établie. Le processus de chaque élément, les circuits analogues et les modèles mathématiques sont décrits. Parce qu'une connaissance approfondie est nécessaire pour concevoir le système de contrôle comptable environnemental et économique basé sur la GADA. Ce modèle peut être utilisé pour mener des recherches comportementales sur le système de comptabilité économique et environnementale. L'approche MPPT a été contrôlée à l'aide de deux méthodes : la technique directe et la voie indirecte basée sur les régulateurs (PI, logique floue). Du fait du fonctionnement à vitesse variable de la GADA, cette commande assure la puissance active la plus élevée produite sur le réseau électrique.

Le but est d'évaluer leurs performances en poursuite. Deux transformateurs triphasés stationnaires situés entre la bobine du rotor de la GADA et le réseau électrique régulent le système éolien. Nous avons utilisé une commande de transformateur côté secteur pour gérer la tension du bus DC, ainsi qu'une commande de bus pour contrôler séparément l'échange des forces statoriques produites par la GADA. Les régulateurs de la commande utilisés pour réguler le GCC sont observés selon les normes de la GADA ; néanmoins, la stabilité du système dépend de la variabilité de ces paramètres. Cela souligne la nécessité de techniques de contrôle supplémentaires.

On peut tirer les conclusions suivantes des résultats obtenus avec ces deux régulateurs traditionnels et ambigus :

- ❖ La logique floue se distingue par sa capacité à faire face à l'imprécis, à la confusion et à l'ambiguïté afin de construire du flou et un solide régulateur GADA.

- ❖ Lorsque les résultats des régulateurs précédents sont comparés, on découvre que les performances du régulateur étrange sont supérieures aux performances du régulateur classique en raison d'une amélioration des performances dynamiques du système considéré.
- ❖ Le régulateur flou est une solution viable pour les systèmes de contrôle qui nécessitent des ajustements rapides et précis et sont moins sensibles aux perturbations externes et aux changements de paramètres.

L'algorithme génétique est l'une des approches d'optimisation les plus intrigantes. Ce dernier est un outil d'optimisation très puissant avec une architecture simple qui peut résoudre des problèmes assez difficiles avec une grande précision. Cela a été utilisé pour les régulateurs de puissance existants ainsi que pour les algorithmes génétiques et simplex.

À la lumière des résultats, les aperçus fascinants suivants sur la façon d'améliorer le fonctionnement des systèmes de conversion d'énergie éolienne sont possibles :

- ↳ Intégration possible d'un système de stockage et optimisation technico-économique de la chaîne de conversion.
- ↳ Recherche et mise en œuvre de transformateurs de niveau supérieur dans une série de transformateurs éoliens, tels que multiniveaux.
- ↳ L'application de l'intelligence artificielle, comme les réseaux de neurones, pour créer une commande GADA plus robuste face aux variations de paramètres.
- ↳ L'étude des problèmes de production d'énergie éolienne en termes de déséquilibre du réseau, de creux de tension et de variations.
- ↳ Mise en œuvre d'autres méthodes d'optimisation meilleures que la méthode de l'algorithme génétique tels que GWO et ALO et.....etc

Enfin, un aspect intrigant de cette recherche est la mise en œuvre pratique du contrôle GADA afin de valider et d'utiliser les simulations données.

Annexes

Annexes

Annexes A

1. Paramètres de la turbine éolienne [127] :

Paramètres	Valeurs	Unités
Nombre des pales	3	-
Rayon du rotor R	35.25	m
Gain du multiplicateur de vitesse G	90	-
Moment d'inertie total J	1000	Kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux f_v	0.0024	N.m.s ⁻¹
Vitesse du vent de démarrage v_d	4	m/s
Vitesse du vent d'arrêt v_m	25	m/s

2. Paramètres de la GADA [127] :

Paramètres	Valeurs	Unités
Puissance nominale P_n	1.5	MW
Courant nominal I_n	1900	A
Tension nominale statorique V_s	398/690	V
Fréquence nominale statorique f	50	Hz
Tension nominale rotorique V_r	225/389	V
Résistance statorique R_s	0.012	Ω
Résistance rotorique R_r	0.021	Ω
Inductance statorique L_s	0.0137	H
Inductance rotorique L_r	0.0136	H
Inductance mutuelle L_m	0.0135	H
Tension du bus continu U_{DC}	1200	V
Inertie totale J	1000	kg.m ²
Nombre de paires de pôles p	2	-

Annexes B

↳ Réglage de la vitesse par régulateur PI.

L'approche pour le contrôle de la turbine avec contrôle de la vitesse de rotation est décrite dans La deuxième phrase fait référence au contrôle de la vitesse avec un régulateur PI proportionnel. L'objectif est d'améliorer le temps de réaction et de supprimer les erreurs statiques tout en préservant la stabilité du système. La Figure B.1 illustre la construction du régulateur de vitesse.

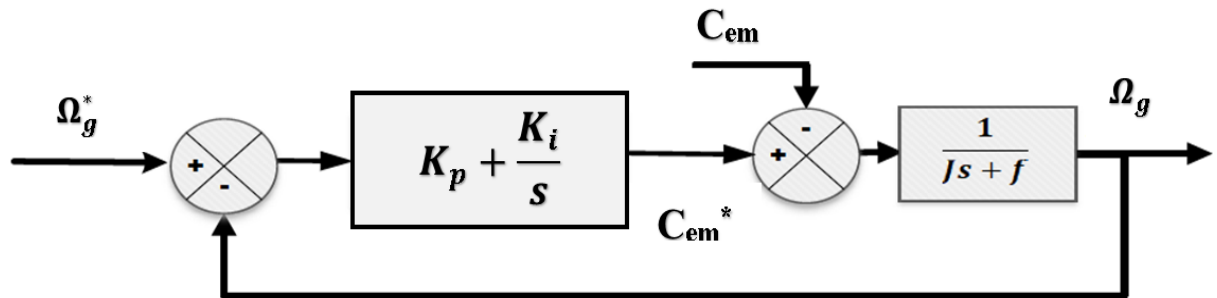


Fig B.1 : Régulation de la vitesse par régulateur PI

➤ La fonction de transfert du système est :

$$\frac{\Omega_m}{\Omega_{m_ref}} = \frac{1}{Js+f} \quad (\text{B.1})$$

➤ La fonction de transfert du régulateur PI est :

$$\text{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{B.2})$$

➤ La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$F_{BO}(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1/f}{\tau s + 1} = \frac{K_p \frac{K_i}{k_i} s + 1}{f s \tau s + 1} \quad (\text{B.3})$$

$\tau = J/f$: constante de temps du système.

➤ l'utilisation de la compensation de pole, ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{k_i} = \tau \quad (\text{B.4})$$

➤ Cette condition, nous donne une fonction de transfert en boucle ouverte:

$$F_{BO}(s) = \frac{K_i}{f s} \quad (\text{B.5})$$

➤ La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F_{BF}(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (\text{B.6})$$

Avec : $\tau_i = \frac{f}{K_i}$

Annexes C

↪ La transformation de Concordia et de Clarke :

Transformation directe de Concordia	Transformation directe de Clarke
Passage du système triphasé (a, b, c) vers le système biphasé (α, β)	
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad c - a + d \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C_{32} [x_{abc}]^T$	
Avec $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	Avec $C_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

↪ Programme de la technique de l'algorithme génétique en Matlab pour l'exemple d'application du chapitre IV

```

%%%%%% Genetic algorithm control %%%%%%%%%
kp_pmin=5000;
kp_pmax=6000;
ki_pmin=50;
ki_pmax=100;
kp_imin=5000e-4;
kp_imax=6000e-4;
ki_imin=50e-4;
ki_imax=100e-4;
NC=4;
NB=32;
Gmax=2^(NB/4)-1; %%%%%%%%% research area %%%%%%%%% INITIAL POP

Val=7e7;
funf(1)=7e7;

```

```

iter=20;
i9=1;
POP= randint (NC,NB);

For i=1:iter
    kp_pbi(:,1:8)=POP(:,1:8);
    kp_ibi(:,1:8)=POP(:,9:16);
    ki_pbi(:,1:8)=POP(:,17:24);
    ki_ibi(:,1:8)=POP(:,25:32);
    kp_pde=bi2de(kp_pbi);
    kp_ide=bi2de(kp_ibi);
    ki_pde=bi2de(ki_pbi);
    ki_ide=bi2de(ki_ibi);

    KP_p=kp_pmin+(kp_pmax-kp_pmin)*kp_pde/Gmax;
    KP_i=kp_imin+(kp_imax-kp_imin)*kp_ide/Gmax;
    KI_p=ki_pmin+(ki_pmax-ki_pmin)*ki_pde/Gmax;
    KI_i=ki_imin+(ki_imax-ki_imin)*ki_ide/Gmax;
for kff=1:NC
    kp_p=KP_p(kff);
    kp_i=KP_i(kff);
    ki_p=KI_p(kff);
    ki_i=KI_i(kff);
    sim('gadaPI')
    fun(kff)=sum(abs(ppr-Ps(:,1)));
    % % % % % % % EVALUATION OF THE MULTI-OBJECTIVE FUNCTION % % % % % % % % %
if fun(kff)<Val
    Val=fun(kff)
    kp_p
    kp_i
    ki_p
    ki_i
    end
end
% % % % % % SELECTION AND CROSSING % % % % % % % % % % % % %
[fun,index]=sort(fun);
for i1=1:NC/2
    paron(i1,:)=POP(index(i1),:);
end
Lu=randsrc(1,1,[1:NB-1]);
enfant(1:NC/4,:)=[paron(1:NC/4,1:Lu) paron(NC/4+1:NC/2,Lu+1:NB)];
enfant(NC/4+1:NC/2,:)=[paron(NC/4+1:NC/2,1:Lu) paron(1:NC/4,Lu+1:NB)];
POP=[paron ;enfant];
% % % % % % % MUTATION % % % % % % % % % % % % %
    Mu=rand(NC,NB);
for i=1:NC
    for j=1:NB

        if Mu(i,j)<=pm

```

```
if POP(i,j)==1
    POP(i,j)=0;
else
    POP(i,j)=1;
end
end
end
end
i9=i9+1;
funf(i9)=Val;
end.
figure
plot (funf,'-o') ;

title ('Optimization of the objective function') ;
xlabel ('Iteration') ;
ylabel ('Faction') ;
```

Références

Références

- [1] H. E. Murdock et al., “Renewables 2019 global status report,” 2019.
- [2] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, and M. Narimani, “High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 5, pp. 740–788, 2015.
- [3] H. Polinder et al., “Trends in wind turbine generator systems,” *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 174–185, Sep. 2013.
- [4] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power conversion and control of wind energy systems*, vol. 76. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] V. Yaramasu, “Predictive control of multilevel converters for megawatt wind energy conversion systems,” PhD Thesis, Ph. D. dissertation, Ryerson Univ., Toronto, ON, Canada, 2014.
- [6] N Akkari., “Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation”., Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.
- [7] Harrouche Fateh ‘Etude comparative de deux méthodes d’optimisation d’un système de classification des défauts mécaniques par la logique floue’ Thèse de doctorat en sciences, Ferhat Abbas Sétif 1, 2019.
- [8] Sabrina Abdedaim, "Optimisation de deux Systèmes de Génération Renouvelable (Photovoltaïque et Éolienne) connectés au réseau", Thèse Doctorat en sciences en Génie Electrique, Université Mohamed Khider-Biskra, 19 Décembre 2013.
- [9] Mourad Loucif, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d’une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur", Thèse Doctorat 3ème Cycle Génie Electrique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 12 May 2016.
- [10] S. M. BOUDIA, A. BENMANSOUR, M. A. TABET HELLAL, «Wind resource assessment in Algeria», *Sustainable Cities and Society*, vol.22, Février 2016, Science Direct, Elsevier, Londres.
- [11]F. CHELLALI, «Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011
- [12]S. BOUCIB, «Objectifs du nouveau programme des énergies renouvelables en Algérie (2015-2020-2030) », Publié sur: portail.cder.dz, le 24/02/2015.
- [13] Mansouri Fatima Zohra, " Commande de la Génératrice Asynchrone Double Alimentation pour La Production de L'énergie Eolienne", Thèse Doctorat LMD 3eme cycle en électrotechnique de l'Université Mohamed Boudiaf - Oran, 2021.

- [14] Lilia Abdelhalim, "Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Maîtrise des Energies, Université Hadj Lakhdar de Batna, 26 Avril 2012.
- [15] Cheikh Ridha, " Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique de l'Université Mohamed Khider - Biskra, 04/07/2018.
- [16] Fateh ABDOUNE, "Amélioration des performances des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à double alimentation", Thèse Doctorat en Sciences, Systèmes Electro-énergétiques, Université A. Mira-Bejaia, 21 Février 2018.
- [17] Wissem Slimane, " Modélisation et Commande d'une GADA Destinée à la Production de l'Énergie Electrique dans une Chaine Éolienne", Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique de l'Université Mohamed Khider - Biskra, 02/02/ 2021.
- [18] Sid Ahmed el Mehdi ARDJOUN, "commande d'un système d'énergies renouvelables multi sources relié au réseau électrique", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Djillali Liabes - Sidi-Bel-Abbes, 18 Avril 2016.
- [19] Ali M. Bechouch, "Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : Application à une éolienne", Thèse Doctorat en électrotechnique de l'Université, 22/04/2013.
- [20] Y. Xia, K. Ahmed, and B. Williams, "A new maximum power point tracking technique for permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3609–3620, Dec. 2011.
- [21] M. Narimani, B. Wu, Z. Cheng, and N. Zargari, "A new nested neutral point-clamped (NNPC) converter for medium-voltage (MV) power conversion," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 12, pp. 6375–6382, Dec. 2014.
- [22] S. Debnath and M. Saeedifard, "A new hybrid modular multilevel converter for grid connection of large wind turbines," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 4, no. 4, pp. 1051–1064, Oct. 2013.
- [23] G. Snitchler, B. Gamble, C. King, and P. Winn, "10 MW class superconductor wind turbine generators," IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 21, no. 3, pp. 1089–1092, Jun. 2011.

- [24] N. Mekkaoui, “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, juin 2018.
- [25] A. Ibrahim, T.-H. Nguyen, D.-C. Lee, and S.-C. Kim, “A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 871–882, Sep. 2011.
- [26] C. Wessels, F. Gebhardt, and F. Fuchs, “Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 807–815, Mar. 2011.
- [27] A. Djoudi, “Contribution à la Conduite Robuste d’une Eolienne Basée sur une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Connectée au Réseau Electrique”, Thèse de doctorat en sciences en Génie Electrique, Option : Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 11Mai 2016.
- [28] Y. Chen, Y. Yang, L. Wang, and W. Wu, “A low voltage ride-through control strategy of full power converter wind turbine system under balance grid fault,” in *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. Syst. (ICEMS)*, Beijing, China, Aug. 2011, pp. 1–6.
- [29] A. Di Gerlando, G. Foglia, M. Iacchetti, and R. Perini, “Analysis and test of diode rectifier solutions in grid-connected wind energy conversion systems employing modular permanent-magnet synchronous generators,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2135–2146, May 2012.
- [30] J. Wang, D. Xu, B. Wu, and Z. Luo, “A low-cost rectifier topology for variable-speed high-power PMSG wind turbines,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 8, pp. 2192–2200, Aug. 2011.
- [31] S. Pulikanti, K. Muttaqi, and D. Suintanto, “Control of five-level flying capacitor based active-neutral-point-clamped converter for grid connected wind energy applications,” in *Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. (IAS) Ann. Meet.*, Las Vegas, NV, USA, Oct. 2012, pp. 1–9.
- [32] J. Li, S. Bhattacharya, and A. Huang, “A new nine-level active NPC (ANPC) converter for grid connection of large wind turbines for distributed generation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 961–972, Mar. 2011.
- [33] Saiah. Bekkar, Djelloul. Saiaha, Amine. Boudghene. Stambouli, "Prospective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: Towards high electricity generation security in 2062", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 73, Pages 26-43, June 2017.

- [34] B. Beltran, "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur", Thèse Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [35] Afaf Benamor, "Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau", Thèse Magister en Électrotechnique, Maitrise d'énergies électriques, Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, 08 Octobre 2013.
- [36] A. Benamor, M.T. Benchouia, K. Srairi, M.E.H. Benbouzid, "A new rooted tree optimization algorithm for indirect power control of wind turbine based on a doubly-fed induction generator", ISA Transactions, Elsevier, Vol. 88, pp. 296-306, May 2019.
- [37] H. Benanni, "Machine asynchrone à double alimentation : Les lois de commande en régime permanent", Thèse Doctorat, Université de Laval, Québec, 2011.
- [38] S .Ebrahimkhani, "Robust fractional order sliding mode control of doubly-fed induction generator (DFIG) based wind turbines", ISA transactions, Vol.63, pp. 343- 354, 2016.
- [39] B. Beltran, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur," Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2010.
- [40] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla, "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation," Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, No. 1, pp. 109-120, 2011.
- [41] Y. Bekakra, D. Ben attous, "Comparison study between SVM and PWM inverter in sliding mode control of active and reactive power control of a DFIG for variable speed wind energy," International Journal of Renewable Energy Research, Vol. 2, No. 3, pp. 471-476, 2012.
- [42] Tamaarat A, Benakcha A. "Performance of PI controller for control of active and reactive power in DFIG operating in a grid-connected variable speed wind energy conversion system," Frontiers in Energy, Vol. 8, No. 3, pp. 371-378, 2014.
- [43] Serhoud H, Benattous D, "Simulation of grid connection and maximum power point tracking control of brushless doubly-fed generator in wind power system," Frontiers in Energy, Vol.7, No. 3, pp. 380-387, September 2013.
- [44] S. Tamalouzt, T. Rekioua and R. Abdessemed, "Direct Torque and Reactive Power Control of Grid Connected Doubly Fed Induction Generator for Variable Wind Speed Turbine", 8th International Conference on Electrical Engineering 16- 17 November 2014.

- [45] Youcef Djerjir, "Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Option Commande Electrique, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 05 Novembre 2015.
- [46] Asma Ben amar, "étude de la commande d'un système éolien basé sur une GADA", mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar - Batna, 24/04/2016.
- [47] Fatma Zahra TRIA, "Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien", Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 13/02/2018.
- [48] Azzedine Dekhane, "Modélisation et contrôle d'une chaîne éolienne de conversion de l'énergie", Thèse Doctorat, Université Badji-Mokhtar Annaba, 2017.
- [49] Nadia Akkari, "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation", Thèse Doctorat, Université de Batna, 02 juin 2010.
- [50] Azzouz Tamaarat, "Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, 08 Décembre 2015.
- [51] Riyadh Rouabhi, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Batna2, 01 Décembre 2016.
- [52] Lea Riachy, "Contribution à la commande d'un onduleur multi niveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques", Thèse Doctorat en Génie Electrique, Université le Havre Normandie, 15 Décembre 2017.
- [53] Salam Eddine Rezgui, "Techniques de commande avancées de la machine asynchrone : étude comparative et application", Thèse Doctorat en sciences, Université de Frères Mentouri Constantine, 08 Juin 2015.
- [54] P. Monjean, "Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons en continu", Thèse Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012.
- [55] Aimene Merzak, "Services au système et gestion d'interactions énergétiques transitoires dans un parc éolien on shore", Thèse Doctorat Energie électrique, Université du Havre, Français, 12 October 2016.
- [56] M. T. Latreche, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option : Commande Electrique, Université Ferhat Abbas de Setif, Algérie, 24/06 /2012.

- [57] F.Z. Tria, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques", mémoire de magister, Université d'El-oued. 2013.
- [58] Guediri, A.K., Ben Attous, D. Modeling and fuzzy control of a wind energy system based on double-fed asynchronous machine for supply of power to the electrical network. *Int J Syst Assur Eng Manag*, vol. 8, no.1, pp. 353–360, 2017.
- [59] Z. El Oualid, Contribution à la modélisation et à la commande robuste d'un système éolien basé sur les génératrices asynchrones, Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2021.
- [60] Abdel Karim Guediri, "Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Mohamed Khider – Biskra, 11 / 01 / 2017.
- [61] Azeddine Chaiba, "Commande de la Machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle" Thèse Doctorat en Sciences, en Electrotechnique, Université de Batna, 11 Juillet 2010.
- [62] Mouilah Kheira, "Commande d'une éolienne à machine asynchrone à double alimentation", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 9/12/2015.
- [63] Zinelaabidine Boudjma, "Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque)", Thèse Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali Liabes, Sidi bel-Abbès, 10 Février 2015.
- [64] A. Dendouga, "Contrôle de Puissance Active et Réactive de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (DFIG)", mémoire de magister, Université de Batna. 2010
- [65] Naouel Hamdi, "Amélioration des performances des aérogénérateurs", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Modélisation et Commande des Machines Electriques, Université Constantine 1, 03 Juillet 2013.
- [66] T. Ghrnam, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", Thèse Doctorat, l'Ecole Centrale de Lille et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.
- [67] F. Kendouli, "centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine. 2012.
- [68] Essaid Edjekouane, "Contribution à la Commande et à l'Observation des Systèmes Mécatroniques" Thèse Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 04 Juillet 2016.

- [69] Oussama Moussa , " Contribution au contrôle d'un système éolien basé sur une MADA sans balais ", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Option Commande Electrique, Université Batna 2, 2020.
- [70]Y. Bekakra, "Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra. 21/10/2014.
- [71] Sabrina ABDEDAIM, "Optimisation de deux Systèmes de Génération Renouvelable (Photovoltaïque et Éolienne) connectés au réseau", Thèse Doctorat en sciences en Génie Electrique, Université Mohamed Khider-Biskra, 19 Décembre 2013.
- [72] Said Chikha, "Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne",Thèse Doctorat en Sciences en génie électrique de Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 03 Juillet 2017.
- [73] Abdeloahab Khattara, "Modélisation, Commande et Gestion de l'énergie d'un Générateur Eolien", Thèse Doctorat en Science, Génie Electrique, Université Mohamed Khider–Biskra, 01 Décembre 2014.
- [74] Fairouz Kendouli,"Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique de Université Mentouri de Constantine, 2012.
- [75]F. Boumaraf, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014.
- [76] M. Kassa Idjdarene, "Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira- Béjaia et Lille 1(France), 23 Mai 2010.
- [77] A. Melloul, "Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne", mémoire de magister université Ferhat Abbas — Sétif. 07/06/2011.
- [78] Afaf Benamor,"Contribution à la Modélisation, à la Commande et au Contrôle des Systèmes de Production de l'Energie Électrique Renouvelable", Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 18/11/ 2019.
- [79] Alhato, M.M.; Bouallègue, S. Direct Power Control Optimization for Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbine Systems. *Math. Comput*, vol.24, no.3,pp.1–27, Appl. 2019.
- [80] Mohamed Benkahla, Rachid Taleb and Zinelaabidine Boudjema, "Comparative Study of Robust Control Strategies for a DFIG-Based Wind Turbine" *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(ijacsa)*, vol.7, no.2, pp. 455–462 , 2016.

- [81] Z. Tir, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [82] Ardjoun S. A. E, and Abid M, "Fuzzy sliding mode control applied to a doubly fed induction generator for wind turbines," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 23, no. 6, pp. 1673-1686, 2015.
- [83] Abdesselem Chiki, "Conception d'une commande floue directe du couple (FDTC) de la machine asynchrone basée sur la SVM", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université de Batna, 2 Février 2013.
- [84] Elhadj Bounadjia, Abdelkader Djahbar, "Direct Torque Control of Saturated Doubly-Fed Induction Generator using High Order Sliding Mode Controllers", (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 7, N° 7, 2016.
- [85] Ou Sheng, Liu Haishan, Liu Guoying, Zeng Guohui, Zhan Xing, Wang Qingzhen, Liu Haishan, "A Fuzzy PI Speed Controller based on Feedback Compensation Strategy for PMSM", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 6, no. 5, pp. 49-54, 2015.
- [86] Naik, Kanasottu Anil, Chandra Prakash Gupta, and Eugene Fernandez. "Performance improvement of a wind energy system using fuzzy logic based pitch angle control." *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, vol.3, no. 3, pp. 30-37, 2018.
- [87] B. Rached, M. Elharoussi, and E. Abdelmounim, "Control Strategies for DFIG based on Wind Energy Conversion System using RST and Fuzzy Logic Controllers," in *2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE)*, 2019, pp. 1–6.
- [88] Tkouti Nacira, "Control Flou Génétique d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique" Thèse Doctorat en Sciences, Spécialité : Electricité industrielle, Université Mohamed Khider – Biskra, 01/07/2019.
- [89] BELAIMECHE Fatima Zohra, "Contribution à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l'énergie renouvelable ", Thèse Doctorat LMD 3eme cycle, Université Djillali Liabes - Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [90] Guediri A. and Guediri A., "Study and Order of a Medium Power Wind Turbine Conversion Chain Connected to Medium Voltage Grid", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 7279–7282, Jun. 2021.

- [91] R.K. Gupta, Bhanu Pant, P.P. Sinha, Rama Mehta, Vijaya Agarwala “Study on Ductility of Ti Aluminides Using Mamdani Fuzzy Inference System” Proceedings of the International Conference on SocProS 2011, AISC 130, pp. 11–22.
- [92] Guediri, A.K., Ben Attous, D. Fuzzy control of a doubly fed asynchronous machine (DFAM) generator driven by a wind turbine modeling and simulation. *Int J Syst Assur Eng Manag* , vol. 8, no.1, pp. 8–17 ,2017.
- [93] I. Kharchouf, T. Nasser, A. Essadki and M. Fdaili, "Adaptive Fuzzy-PI Control of Wind Energy Conversion System Based DFIG Under Voltage Dip," 2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2020, pp. 1-6.
- [94] Sun, L., Chen, Y., Peng, L., Zhang, Y., & Kang, Y, "Control winding current-oriented control for stand-alone brushless doubly fed power generation system," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2776-2781, 2015.
- [95] Suman. M., Debaprasad, K., "Improved Direct Torque and Reactive Power Control of a Matrix Converter Fed Grid Connected Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol, 62, no. 12, pp. 7590-7598, 2015
- [96] F. Benchabane, A. Titaouine, O. Bennis, K. Yahia, D. Taibi, "Sensorless fuzzy sliding mode control for permanent magnet synchronous motor fed by AC/DC/AC converter", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Vol. 3, N° 3, pp. 221-229, 2012.
- [97] Belkacem Belabbas, Tayeb Allaoui, Mohamed Tadjine, Mouloud Denai, “High Order Sliding Mode Controller Simulation by a Wind Turbine for DFIG Protection against Overcurrent”, in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, vol. 65, no. 4, pp.142-147, 2017.
- [98] Song, D., Yang, J., Su, M., Liu, A., Liu, Y., & Joo, Y. H, "A comparison study between two MPPT control methods for a large variable-speed wind turbine under different wind speed characteristics." *Energies*, vol. 10, no. 5, 613,2017.
- [99] D. Kairous and B. Belmadani, Robust Fuzzy-Second Order Sliding Mode based Direct Power Control for Voltage Source Converter, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 6, no. 8, pp. 167-175, 2015.
- [100] Trong, T. N., Tien, B. N., Thanh, H. N., & Hoang, H. N, “The Controller of DFIG Power Fed into the Grid Basing on the Rotor Similar Signal Method.” *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Ltd. vol. 415, pp. 245–249, Sept. 2013. Crossref.

- [101] B. Hamane, M. L. Doumbia, M. Bouhamida, H. Chaoui and M. Benghanem, "Modeling and control of a Wind Energy Conversion System based on DFIG driven by a Matrix Converter," 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2016, pp. 1-8.
- [102] Osmic, J., Kusljagic, M., Becirovic, E., and Toal, D., "Analysis of active power control algorithms of variable speed wind generators for power system frequency stabilization," *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, vol. 24, no. 1, pp. 234-246, 2016.
- [103] Khettache Laid, "Contribution à l'Amélioration des Performances Des Systèmes Eoliens", Thèse Doctorat en Sciences en Génie électrique, Université Mohamed Khider - Biskra, 2019.
- [104] A. Guediri, A. Guediri, and S. Touil, "Modeling and Comparison of Fuzzy-PI and Genetic Control Algorithms for Active and Reactive Power Flow between the Stator (DFIG) and the Grid", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 8640–8645, Jun. 2022.
- [105] Gacem Abdelmalek, "Commande Robuste d'un Dispositif FACTS par les Méthodes Métaheuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Electrique ", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Mohamed Khider – Biskra, 15/04/2019.
- [106] Guediri, A., A. Guediri, and S. Touil. "A Genetic Algorithm Based on Optimization for Doubly Fed Induction Generator." *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics* Vol 35, No 01, pp. 121-129, 2022.
- [107] Abdelhalim Borni, "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique", Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique, Modélisation des machines électriques, Université Constantine 1, 12 Mars 2015.
- [108] A Gacem, D Benattous, "Hybrid GA–PSO for optimal placement of static VAR compensators in power system " *International Journal of System Assurance Engineering and Management* Vol 8, PP 247-254, 2015.
- [109] Suthar, B. and Patel, A., "Design optimization of axial flux surface mounted permanent magnet brushless dc motor for electrical vehicle based on genetic algorithm", *International Journal of Engineering, Transactions A Basics*, Vol. 31, No. 7, pp.1050-1056, 2018.
- [110] Parvane, M., Rahimi, E. and Jafarinejad, F., "Optimization of quantum cellular automata circuits by genetic algorithm", *International Journal of Engineering, Transactions B Applications*, Vol. 33, No. 2, pp. 229-236, 2020.
- [111] Yamina Belgaid, M'hamed Helaimi, Rachid Taleb, Mohammed Benali Youcef " Optimal tuning of PI controller using genetic algorithm for wind turbine application ", *Indonesian*

Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 18, No. 1, , pp. 167~178, April 2020.

[112] Azari, M.N., Samami, M. and Pahnehkolaei, S.A., "Optimal design of a brushless dc motor, by cuckoo optimization algorithm (research note)", International Journal of Engineering-Transactions B: Applications, Vol. 30, No. 5, pp.668-677, 2017.

[113] Patel, A. N., and B. N. Suthar."Design optimization of axial flux surface mounted permanent magnet brushless dc motor for electrical vehicle based on genetic algorithm." International Journal of Engineering, Vol 31, No.7 , pp. 1050-1056, 2018.

[114] Lilia Sidhom, "Sur les différentiateurs en temps réel: algorithmes et applications", Thèse Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, France 29/09/2011.

[115] Gacem, Abdelmalek, and Djilani Benattous. "Hybrid genetic algorithm and particle swarm for optimal power flow with non-smooth fuel cost functions." International Journal of System Assurance Engineering and Management Vol 8, No.1 , pp.146-153, 2017.

[116] Krishnasamy, Vijayakumar. "Genetic algorithm for solving optimal power flow problem with UPFC." International Journal of Software Engineering and Its Applications Vol 5, No.1, pp. 39-50, 2011.

[117] A Lilia., "Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement".,Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2012.

[118] Tan, A., Tang, Z., Sun, X. et al. Genetic Algorithm-Based Analysis of the Effects of an Additional Damping Controller for a Doubly Fed Induction Generator. J. Electr. Eng. Technol., Vol. 15, no. 4, pp. 1585–1593, 2020.

[119] Spiegel, Jacob O., and Jacob D. Durrant. "AutoGrow4: an open-source genetic algorithm for de novo drug design and lead optimization." Journal of cheminformatics Vol.12, no.1, pp. 1-16 , 2020.

[120] L. Thomas, "Algorithmes Génétiques et Composites Conducteurs", Rapport de Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Informatique et Statistique, Ecole Polytechnique d'Ingénieurs, Lille, France, 2005/2006.

[121] MOKEDDEM Diab, Contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes génétiques. Thèse de Doctorat en Electronique de l'Université Ferhat Abbas de Sétif, juillet 2010.

[122]L.Abdelmalek; « Comparative des méthodes hessiennes et des algorithmes Génétiques

pour la minimisation des couts de production dans un réseau d'énergie électrique », Thèse de doctorat soutenue en 2010, USTO, Oran, Algérie.

[123] Aziza BECHIR, " Résolution de problèmes d'optimisation par les systèmes multi-agents et les approches évolutionnaires", mémoire de magister ,Université Mohamed Khider Biskra.2016

[124] H.Bouzeboudja, « Optimisation des puissances actives par les Algorithmes Génétiques» Thèse de Doctorat soutenue en décembre 2006, Faculté de génie électrique, Université Djilali Liabes, Sidi_Bel_Abbes, Algérie.

[125] ELMIR Younes, " Optimisation multi objectif par les algorithmes génétiques et approche Pareto de paramètres d'un contrôleur PID", mémoire de magister , Université d'Oran Mohamed Boudiaf. 2017

[126]B. Abdelhadi, "Contribution à la Conception d'un Moteur à Induction Spécial à Rotor Externe pour Système de Propulsion Electrique : Développement d'un Algorithme Génétique Adaptatif pour Identification Paramétrique", Thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2004.

[127] Maroun Bercachi , Algorithme évolutionnaire à états pour l'optimisation difficile, Université Nice Sophia Antipolis, 2010.

[128] E. Znouda et N. G. Morcos et A. H. Alouane, "Un Algorithme Génétique pour l'Optimisation Energétique et Economique des Bâtiments Méditerranéens", 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM'06, Rabat, Maroc, 3-5 Avril 2006.

[129]"Algorithmes Génétiques pour Résoudre le Problème du Voyageur", Document d'Internet, Disponible à : <http://sis.univ-tln.fr/~tollari/TER/AlgoGen1/AlgoGen1.html>, Publié le 23/05/2003.

[130] A. Dipanda, Cours algorithmes génétiques, Université de Bourgogne, 2013

[131] Bachir Abdelhadi. "Contribution à la conception d'un moteur à induction spécial à rotor externe pour un système de propulsion électrique. Développement d'un algorithme génétique adaptatif pour identification paramétrique". Thèse de Doctorat en sciences, Université de Batna, 2004.