Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Fares Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Génie Electrique

Présentée par :

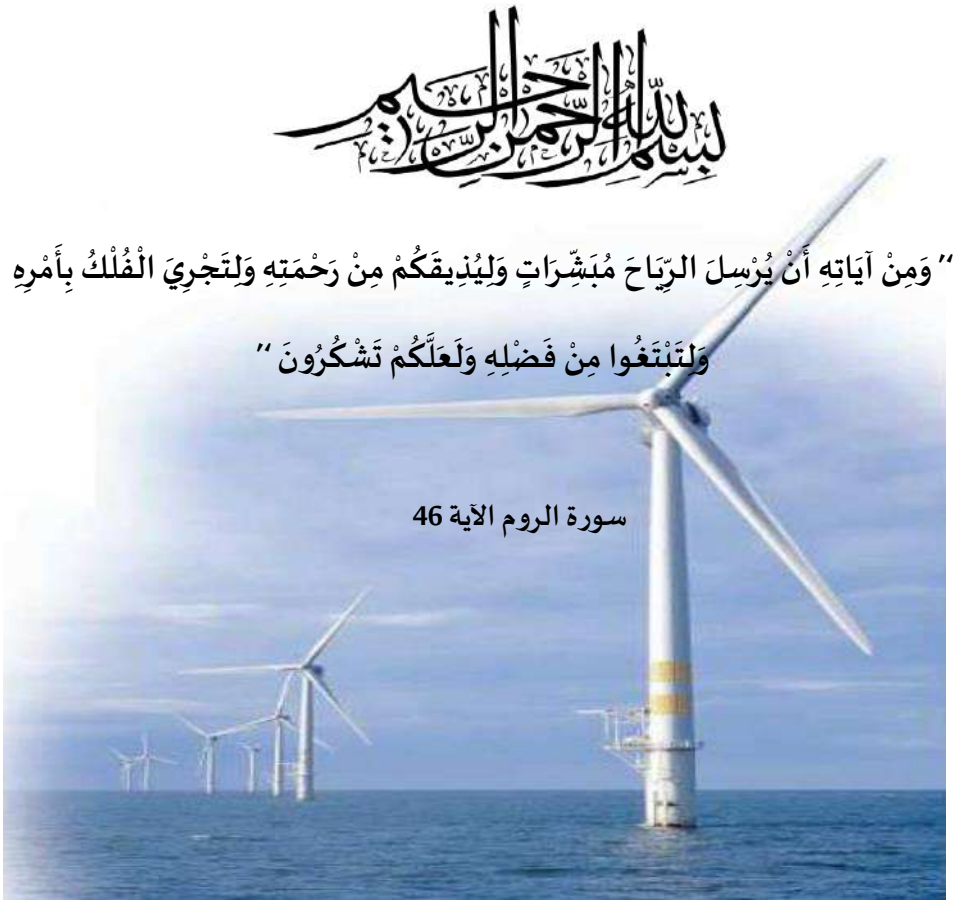
Mme : MAHROUG RABIAA

THÈME :

Modélisation et simulation d'un système éolien avec une nouvelle architecture à base de deux génératrices asynchrones à double alimentation

Thèse soutenue le :25 octobre 2022 devant le jury composé de :

M. A. TLEMÇANI	Professeur	Université Yahia Fares Médéa	Président
M. A. GACEMI	MCA	Université Yahia Fares Médéa	Examinateur
M. A. YOUSFI	MCA	UDB-Khemis Miliana	Examinateur
M. Y. BOT	MCA	UDB-Khemis Miliana	Examinateur
M. M. MATALLAH	Professeur	UDB-Khemis Miliana	Directeur de thèse
M. S. ABUDURA	Professeur	Université Yahia Fares Médéa	Co- Directeur de thèse



بسم الله الرحمن الرحيم

" وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيَاحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيُذِيقَكُمْ مِنْ رَحْمَتِهِ وَلِتَجْرِيَ الْفُلْكُ بِأَمْرِهِ وَلِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ "

سورة الروم الآية 46

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a aidé et m'a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Je voudrais remercier tout particulièrement mon directeur de thèse, Monsieur MATALLAH Mohamed, professeur à l'Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana, qui m'a dirigé tout au long de ces années de thèse. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de mes travaux. Les nombreuses discussions que nous avons eues ainsi que ses conseils sont pour beaucoup dans le résultat final de ce travail. Sa capacité d'analyse et son enthousiasme m'ont montré que le monde de la recherche pouvait être un univers passionnant. Enfin, ses nombreuses relectures et corrections de cette thèse ont été très appréciables. Cette thèse lui doit beaucoup. Pour tout cela merci.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur ABUDURA Salam, professeur à l'Université Yahia Fares de Médéa qui a bien voulu assurer la codirection de la thèse, pour sa patience, sa confiance, le temps qu'il m'a consacré et pour les conseils judicieux qu'il m'a généreusement prodigué.

Mes précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Ce travail est dédié particulièrement à mon cher époux, dont l'aide et le soutien incessant m'ont permis de mener à bien et finir ce travail de recherche. Je remercie également mes enfants pour le bonheur qu'ils m'apportent.

Mes remerciements s'adressent à mes chers parents, mon père qui ne cesse pas de m'encourager et qui m'a toujours soutenu, ma jolie mère symbole de sacrifice et qui est tout pour moi, pour sa tendresse profonde. À mes sœurs et mes frères pour leurs conseils, soutiens et encouragements. Je tiens à remercier aussi toute ma famille, pour leurs encouragements et leurs soutiens, qui m'ont permis de devenir ce que je suis.

Je voudrais également à remercier tout particulièrement ZEKOUDA Naima et MOHAMMED BELKEBIR Saliha et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'enrichissement de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous les professeurs, le personnel de la faculté de sciences et technologies université Djilali Bounaâma Khemis Miliana, et mes collègues, qui ont contribué à la réalisation de cette thèse et à toute personne ayant contribué au succès de près ou de loin à ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents qui m'ont beaucoup aidé ;

À Mon mari et mes enfants : Moundjid, Yakoub, Darine et Yasser ;

À mes frères et sœurs ;

A toute la famille et les amies, en particulier Saliha et Naima ;

A tous mes collègues.

Modélisation et simulation d'un système éolien avec une nouvelle architecture à base de deux génératrices asynchrones à double alimentation

RÉSUMÉ

En réponse à l'augmentation de la demande énergétique et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions ont été envisagées. Les nouvelles solutions technologiques basées sur les énergies renouvelables pour la production d'électricité sont une alternative très compétitive aux solutions conventionnelles malgré leur coût relativement élevé et ceci est dû à la haute sécurité qu'elles impliquent. Comme toute énergie renouvelable, la production de l'énergie éolienne est fortement dépendante du vent, où le vent est une source d'énergie propre et inépuisable.

Afin d'étudier une approche viable pour exploiter pleinement la vitesse du vent, cette étude présente une nouvelle technologie d'éolienne composée de deux génératrices asynchrones à double alimentation (WT-deux-GADA) montées en cascade. Ce modèle peut également être utilisé pour des applications dans des zones de vent fort afin d'obtenir une efficacité de conversion d'énergie élevée, pour produire une grande puissance électrique et augmenter la capacité de l'éolienne tout en économisant les matériels d'une part et en réduisant les coûts d'installation d'autre part. Ce modèle assure également la continuité de la production d'électricité car si l'une des deux génératrices tombe en panne, la deuxième génératrice continuera de fonctionner jusqu'à ce que la génératrice défaillante soit réparée. Nous nous sommes intéressés dans cette étude à la production d'électricité en modélisant une éolienne basée sur deux génératrices asynchrones à double alimentation (WT-deux-GADA). Les résultats de simulation obtenus dans le modèle proposé ont été comparés à ceux obtenus dans le cas d'éoliennes basées sur une seule génératrice asynchrone à double alimentation (WT-une-GADA). Tout ceci a été conçu autour de la génératrice GADA et deux types de contrôles ont été adoptés, l'un est le contrôle vectoriel direct (DFOC) et l'autre type est le contrôle vectoriel indirect (IFOC) de l'éolienne qui vise à maximiser la puissance active et réactive du stator.

Dans cette étude, nous constatons que cette nouvelle technologie éolienne basée sur deux génératrices asynchrones à double alimentation (WT-deux-GADA) offre une puissance beaucoup plus importante que le modèle d'éolienne basée sur une seule génératrice asynchrone à double alimentation (WT-une-GADA).

Mots-clés - éolienne, modélisation, génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), deux génératrices asynchrones à double alimentation (deux-GADA), puissance active et réactive, commande vectorielle.

Modeling and simulation of a wind turbine system with a new architecture based on dual doubly-fed induction generators

ABSTRACT

In response to the increase in energy demand and the more or less long-term depletion of fossil fuels, various solutions have been considered. The new technological solutions based on renewable energies for the production of electricity are a very competitive alternative to the conventional solutions despite their relatively high cost and this is due to the high security they imply. Like any renewable energy, the production of wind energy is highly dependent on the wind, where the wind is a clean and inexhaustible source of energy.

In order to investigate a viable approach to fully exploit the wind speed, the present work investigates the application of a new wind turbine system that consists of dual doubly-fed induction generators (WT-dual-DFIG) in cascade.

This model can also be used for applications in areas where the winds are high to achieve high energy conversion efficiency to produce large electric power and increase the wind turbine capacity with an economy of materials on the one hand, and to reduce the installation cost on the other hand. This model also ensures the continuity of electricity production because if one of two generators fails, the second generator will keep working until the broken one is repaired. In this study, we were interested the electricity production by modeling a wind turbine based on dual doubly-fed induction generators (WT-dual-DFIG). The simulation results obtained in the proposed model were compared with those obtained in the case of wind turbine based on single doubly-fed induction generator (WT-DFIG).

All of this is designed around the generator DFIG and two types of controls have been adopted, one is the direct field oriented control (DFOC) and the other type is indirect field oriented control (IFOC) for wind a turbine which aims to maximize the active and reactive power of the stator.

In this study, we find that this new technology of wind turbine based on dual doubly-fed induction generators (WT-dual-DFIG) offers much more power than the wind turbines based on single doubly-fed induction generator (WT-DFIG).

Keywords- wind turbine (WT), modeling, doubly-fed induction generator (WT-DFIG), dual doubly-fed induction generators (WT-dual-DFIG), active and reactive power, field oriented control.

نمذجة ومحاكاة نظام الرياح بهندسة معمارية جديدة تعتمد على مولدين لا متزامنين ذو التغذية المزدوجة

ملخص

استجابة للزيادة في الطلب على الطاقة واستنفاد الوقود الأحفوري على المدى الطويل أو القصير، تم النظر في حلول مختلفة. تعد الحلول التكنولوجية الجديدة القائمة على الطاقات المتجددة لإنتاج الكهرباء بديلاً تنافسـيًا للغاية للحلول التقليدية على الرغم من تكلفتها المرتفعة نسـبيًا وهذا بسـبب الأمان العالي الذي تنطوي عليه. مثل كأي طاقة متجددة، يعتمد إنتاج طاقة الرياح بشكل كبير على الرياح، حيث تكون الرياح مصدرًا لطاقة نظيفة وغير نافذة.

من أجل التحقيق في نهج قابل للتطبيق لاسـتغلال سـرعة الرياح بالكامل، تبحث الدراسـة الحالية في تقنية جديدة لتوربينات الرياح تتكون من مولدين لامتزامنين ذو مزدوجة التغذية (WT-deux-GADA) على التتالي.

يمكن أيضًـا اسـتخدام هذا النموذج للتطبيقات في مناطق الرياح القوية لتحقيق كفاءة عالية في تحويل الطاقة، لإنتاج طاقة كهربائية كبيرة وزيادة سـعة توربينات الرياح مع توفير المواد من جهة وتقليل تكاليف التركيب من ناحية أخرى. كما أن هذا النموذج يضمن أيضًا استمرارية إنتاج الكهرباء لأنه في حالة تعطل أحد المولدلين، سيستمر المولد الثاني في العمل حتى يتم إصـلاح المولد المعطل. في هذه الدراسـة، كنا مهتمين بإنتاج الكهرباء عن طريق نمذجة توربينات الرياح على أسـاس مولديين لامتزامينين ذو التغذية المزدوجة (WT-deux-GADA). تمت مقارنة نتائج المحاكاة التي تم الحصـول عليها في النموذج المقترح مع تلك التي تم الحصـول عليها في حالة توربينات الرياح بناءًا على مولد لامتزامن واحد ذو التغذية المزدوجة (WT-une-GADA).

تم تصـميم كل هذا حول المولد (GADA) وتم اعتماد نوعين من عناصـر التحكم، أحدهما هو التحكم الميداني المباشـر (DFOC)والنوع الآخر هو التحكم الميداني غير المباشـر (IFOC) لتوربينات الرياح والتي تهدف إلى تعظيم الطاقة النشطة والمتفاعلة من توربينات الرياح للجزء الثابت.

في هذه الدراسـة، وجدنا أن هذه التكنولوجيا الجديدة من توربينات الرياح القائمة على المولدين لامتزامنين ذو التغذية المزدوجة (WT-deux-GADA) توفر طاقة أكبر بكثير من توربينات الرياح القائمة على مولد لامتزامن واحد ذو التغذية المزدوجة (WT-une-GADA).

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح، النمذجة، المولد اللامتزامن ثنائي التغذية (GADA)، مولدين لامتزامنين ذو تغذية مزدوجة (deux-GADA)، القوة النشطة والمتفاعلة، التحكم الشعاعي.

TABLE DES MATIERES

Remerciements I
Dedicaces II
Résumé III
Abstract IV
ملخص V
Table des matieres VI
Liste des tableaux IX
Liste des figures X
Liste des symboles et abréviations XV
Introduction Générale 1
Chapitre 1 : Survol et aperçu sur les énergies renouvelables et l'énergie éolienne 5
1.1 Introduction 5
1.2 Évaluation des énergies renouvelables en Algérie 5
1.3 Énergies éoliennes 6
1.3.1 Définition de l'énergie éolienne 8
1.3.2 Historique de l'éolien 9
1.3.3 Principaux composants d'une éolienne 10
1.3.3.1 Mât 10
1.3.3.2 Nacelle 11
1.3.3.3 Rotor 12
1.3.4 Fonctionnement des éoliennes 12
1.3.5 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 13
1.3.5.1 Loi de BETZ 13
1.3.5.2 Coefficient de couple 16
1.3.6 Systèmes de régulation au niveau de la turbine 17
1.3.6.1 Bilan des forces s'exercent sur une pale 17
1.3.6.2 Contrôle par angle de calage variable (pitch control) 18
1.3.6.3 Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall) 18
1.3.6.4 Contrôle par décrochage aérodynamique actif 19
1.3.7 Critère de choix d'un potentiel éolien 19
1.3.7.1 Le vent 20
1.3.7.2 Gisement éolien en Algérie 21
1.3.7.3 Lois de distributions de vent 22
1.3.8 Différentes défaillances dans les systèmes éoliens 26
1.3.9 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 29

1.3.10 Applications des éoliennes 31
1.4 Conclusion 32
Chapitre 2 : Developpement de la technologie des éoliennes 33
2.1 Introduction 33
2.2 Technologie des éoliennes 33
2.2.1 Selon la puissance des éoliennes 33
2.2.2 Selon la disposition géométrique d'éoliennes 34
2.2.2.1 Eoliennes à axe vertical 34
2.2.2.2 Eoliennes à axe horizontal 37
2.3 Configuration des éoliennes 38
2.3.1 Éoliennes à vitesse fixe 38
2.3.2 Éoliennes à vitesse variable 40
2.4 Topologies et développement des génératrices des turbines éoliennes 44
2.4.1 Génératrices synchrones 44
2.4.2 Génératrices asynchrones 46
2.4.3 Machines à courant continu 48
2.5 Fermes éoliennes 48
2.6 Aperçu général des travaux antérieurs sur le développement de la technologie des éoliennes 50
2.7 Conclusion 52
Chapitre 3 : Analyse, modélisation et stratégies de commande d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une seule GADA 53
3.1 Introduction 53
3.2 Modélisation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur une seule GADA 53
3.2.1 Description du système éolien 53
3.2.2 Modélisation de la turbine éolienne 54
3.2.2.1 Partie aérodynamique (Vent) 54
3.2.2.2 Modélisation de la turbine 56
3.2.2.3 Modélisation du multiplicateur 57
3.2.2.4 Modélisation de l'arbre mécanique 58
3.2.3 Stratégie de commande de la turbine (maximisation de puissance MPPT) 60
3.2.3.1 Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse mécanique 61
3.2.3.2 Stratégie de maximisation de puissance avec asservissement de vitesse mécanique 62
3.2.4 Résultats de simulations de la partie aérodynamique et mécanique de l'éolienne à base d'une seule GADA 63
3.2.5 Modélisation de la génératrice GADA 68
3.2.5.1 Fonctionnement de la génératrice GADA 69
3.2.5.2 Représentation de la génératrice GADA dans un repère triphasé (abc) 72
3.2.5.2.1 Hypothèses simplificatrices 72

3.2.5.2.2 Equations électriques de la génératrice GADA dans le repère (abc) 73
3.2.5.2.3 Equations magnétiques de la génératrice GADA dans le repère (abc) 73
3.2.5.2.4 Equation mécanique de la génératrice GADA dans le repère (abc) 74
3.2.5.3 Commande vectorielle de la génératrice GADA 75
3.2.5.3.1 Principe de la commande vectorielle de la génératrice GADA 75
3.2.5.3.2 Modèle de la génératrice GADA avec orientation du flux statorique 76
3.2.6 Résultats et discussion 83
3.2.6.1 Test de suivi de consigne 86
3.2.6.2 Test de robustesse 91
3.3 Conclusion 93
Chapitre 4 : Modélisation et commande d'une éolienne basée sur deux génératrices GADA 99
4.1 Introduction 95
4.2 Description du modelé proposé 95
4.3 Modélisation d'un système éolien basé sur deux génératrices GADA 96
4.3.1 Modélisation du vent 96
4.3.2 Modélisation de la turbine 96
4.3.3 Modélisation du multiplicateur 97
4.3.4 Modélisation de l'arbre mécanique 97
4.3.5 Modélisation de deux génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) 98
4.3.6 Commande vectorielle de deux génératrices GADA 102
4.3.6.1 Principe de la commande vectorielle de la génératrice GADA 102
4.3.6.2 Orientation du flux..... 102
4.3.6.3 Commande vectorielle directe en puissances active et réactive de la génératrice GADA 105
4.3.6.4 Commande vectorielle indirecte en puissances active et réactive de la génératrice GADA 106
4.4 Résultats et discussion 107
4.4.1 Résultats de simulation de la partie aérodynamique et mécanique de notre nouveau système éolien basé sur deux GADA 108
4.4.2 Résultats de simulation de notre nouvelle éolienne basée sur deux génératrices GADA 111
4.4.2.1 Test de suivi de consigne 113
4.4.2.2 Test de robustesse 125
4.4.3 Comparaison entre les deux modèles étudiés 128
4.5 Conclusion 129
Conclusion générale 131
Bibliographies 133
Annexes

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1. Programme énergies renouvelables 2030 en Algérie [19, 20]. 6
Tableau 1. 2. Origine des défaillances de la génératrice [64]. 29

Tableau 2.1. Différentes catégories des éoliennes [73]. 33
Tableau 3.1. Paramètres de la génératrice GADA. 84

Tableau 4. 1. Paramètres de deux GADA 107
Tableau 4. 2. Paramètres de la turbine..... 108

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1. Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne entre 2005-2015 [23]. 7
Figure 1. 2. Capacité Baisse des couts de production des aérogénérateurs terrestres, avec une vitesse moyenne des vents de 6 m/s et un amortissement sur 30 ans (taux d'intérêt : 5 %/an) (données Agence de l'Energie Danoise) [24]. 7
Figure 1. 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent [30]. 8
Figure 1. 4. Moulins à vent [31]. 9
Figure 1. 5. Composants d'une éolienne. 10
Figure 1. 6. Eléments constituant une éolienne Nordex S77(1500 kW) [27]. 12
Figure 1. 7. Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne [38]. 13
Figure 1. 8. Tube de courant autour d'une éolienne [42]. 14
Figure 1. 9. Coefficient de puissance [44]. 14
Figure 1. 10. Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du rotor pour différentes vitesses du vent [45]. 15
Figure 1. 11. Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines [46]. 16
Figure 1. 12. Bilan des forces s'exercent sur une pale [48]. 17
Figure 1. 13. Variation de l'angle de calage d'une pale [49]. 18
Figure 1. 14. Flux d'air sur un profil de pale " stall " [49]. 19
Figure 1. 15. Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [50]. 19
Figure 1. 16. Circulation du vent dans le monde [53]. 20
Figure 1. 17. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [56]. 21
Figure 1. 18. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (hiver et automne, été et printemps) [56]. 22
Figure 1. 19. Taux de défaillance des composants des éoliennes [64]. 26
Figure 1. 20. Distribution des défauts des machines électriques [65]. 27
Figure 1. 21. Défaillances dans une éolienne. 28
Figure 1. 22. Différentes causes des défaillances dans une éolienne [67]. 28

Figure 2. 1. Correspondance taille-puissance des éoliennes [74]. 34
Figure 2. 2. Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical [75]. 34
Figure 2. 3. Eolienne à axe vertical (Structure de Savonius) [45, 77]. 35
Figure 2. 4. Eolienne à axe vertical (Structure de Darrieus) [29]. 36
Figure 2. 5. Eolienne de Darrieus de type H [77]. 36
Figure 2. 6. Eoliennes à axe horizontal [44]. 37
Figure 2. 7. Éolienne à vitesse fixe [81]. 39

Figure 2. 8. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance [78]. 41
Figure 2. 9. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à nombre élevé de pôles et un convertisseur pleine puissance [78]. 41
Figure 2. 10. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone et un convertisseur pleine puissance [78]. 42
Figure 2. 11. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents et un convertisseur pleine puissance [78, 87]. 42
Figure 2. 12. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation [78, 88]. 43
Figure 2. 13. Configuration des SCEEs à base de la GSRB [90]. 45
Figure 2. 14. Configuration des SCEEs à base de la PMSG [93]. 46
Figure 2. 15. Schéma d'éolienne à base de SCIG connecté au réseau [95]. 47
Figure 2. 16. Schéma d'éolienne à base de GADA connecté au réseau [95]. 48
Figure 2. 17. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives [96]. 49
Figure 2. 18. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [96]. 49

Figure 3. 1. Schéma de la chaine de conversion éolienne à base d'une seule GADA. 54
Figure 3. 2. Schéma de la turbine éolienne. 54
Figure 3. 3. Modèle de profil de vent utilisé sous Matlab/Simulink. 56
Figure 3. 4. Modèle mécanique de la turbine éolienne [22]. 58
Figure 3. 5. Schéma conventionnel du modèle de la turbine. 59
Figure 3. 6. Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable d'une éolienne de 1.5 MW [68]. 60
Figure 3. 7. Schéma conventionnel de la maximisation de puissance extraite sans asservissement de vitesse. 62
Figure 3. 8. Schéma conventionnel de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de vitesse. 63
Figure 3. 9. Schéma conventionnel de la turbine sans génératrice à commande MPPT sans asservissement de vitesse. 64
Figure 3. 10. Schémas conventionnels de l'arbre et sa commande MPPT sans asservissement de vitesse. 64
Figure 3. 11. Profil du vent appliqué. 65
Figure 3. 12. Puissance mécanique produite par la turbine. 65
Figure 3. 13. Couple électromagnétique de la turbine. 66
Figure 3. 14. Coefficient de puissance C_p 66
Figure 3. 15. Vitesse spécifique (λ). 66

Figure 3. 16. Vitesse spécifique (λ) et Vitesse spécifique optimale (λ_{opt}). 67
Figure 3. 17. Vitesse mécanique de l'arbre. 67
Figure 3. 18. Profil du vent réel et le vent estimé. 67
Figure 3. 19. Machine asynchrone à double alimentation [137]. 69
Figure 3. 20. Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [140]. 70
Figure 3. 21. Représentation schématique d'une génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé (abc) [141]. 72
Figure 3. 22. Principe de la commande vectorielle [37]. 76
Figure 3. 23. Orientation de la tension et de flux statorique [131]. 76
Figure 3. 24. Schéma conventionnel de la génératrice GADA. 79
Figure 3. 25. Schéma conventionnel de la commande vectorielle directe. 80
Figure 3. 26. Schéma conventionnel de la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte. 81
Figure 3. 27. Schéma conventionnel de la commande vectorielle indirecte en boucle fermée. 82
Figure 3. 28. Schéma conventionnel de la régulation par un PI. 83
Figure 3. 29. Schéma conventionnel de l'éolienne étudiée basée sur une seule génératrice GADA à commande directe. 85
Figure 3. 30. Schéma conventionnel de de l'éolienne étudiée basée sur une seule génératrice GADA à commande indirecte. 85
Figure 3. 31. Puissance active obtenue par la commande directe. 86
Figure 3. 32. Puissance réactive obtenue par la commande directe. 86
Figure 3. 33. Couple électromagnétique obtenu par la commande directe. 87
Figure 3. 34. Courants du rotor obtenus par la commande directe. 87
Figure 3. 35. Puissance active obtenue par la commande indirecte. 88
Figure 3. 36. Puissance réactive obtenue par la commande indirecte. 88
Figure 3. 37. Couple électromagnétique obtenu par la commande indirecte. 89
Figure 3. 38. Courants du rotor obtenus par la commande indirecte. 89
Figure 3. 39. Comparaison des performances : commande vectorielle directe et indirecte. 90
Figure 3. 40. Commande vectorielle directe vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA. 92
Figure 3. 41. Commande vectorielle indirecte vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA. 93

Figure 4. 1. Schéma du modèle d'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA. 96
Figure 4. 2. Principe de la commande vectorielle. 102
Figure 4. 3. Référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique. 103
Figure 4. 4. Schéma conventionnel du contrôle vectoriel de la génératrice GADA1. 105
Figure 4. 5. Boucle de contrôle de la puissance statorique 105

Figure 4. 6. Schéma conventionnel de contrôle direct en puissances active et réactive à l'aide du contrôleur PI..... 106
Figure 4. 7. Boucle de contrôle du courant du rotor 106
Figure 4. 8. Schéma conventionnel du contrôle vectoriel indirect en puissances active et réactive en boucle ouverte à l'aide du contrôleur PI. 107
Figure 4. 9. Schéma conventionnel de l'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA... 108
Figure 4. 10. Schéma conventionnel de la partie aérodynamique et mécanique de l'éolienne proposée. 108
Figure 4. 11. Profil de vitesse du vent. 109
Figure 4. 12. Vitesse spécifique. 110
Figure 4. 13. Coefficient de puissance Cp. 110
Figure 4. 14. Couple mécanique de l'éolienne Ct. 110
Figure 4. 15. Puissance éolienne Pt. 111
Figure 4. 16. Schéma conventionnel de l'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA à commande directe. 112
Figure 4. 17. Schéma conventionnel de l'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA à commande indirecte. 112
Figure 4. 18. Couple électromagnétique de la génératrice GADA1. 113
Figure 4. 19. Couple électromagnétique de la génératrice GADA2. 113
Figure 4. 20. Couple électromagnétique du modèle proposé, GADA1 et GADA2. 114
Figure 4. 21. Puissance statorique active de la génératrice GADA1. 114
Figure 4. 22. Puissance statorique active de la génératrice GADA2. 115
Figure 4. 23. Puissances statoriques actives du modèle proposé, GADA1 et GADA2. 115
Figure 4. 24. Puissance réactive du stator de la génératrice GADA1. 116
Figure 4. 25. Puissance réactive du stator de la génératrice GADA2. 116
Figure 4. 26. Puissances réactives statoriques du modèle proposé, GADA1 et GADA2. 116
Figure 4. 27. Courants rotoriques de la génératrice GADA1. 117
Figure 4. 28. Courants rotoriques de la génératrice GADA2. 117
Figure 4. 29. Courants rotoriques du modèle propose. 118
Figure 4. 30. Couple électromagnétique de la génératrice GADA1. 118
Figure 4. 31. Couple électromagnétique de la génératrice GADA2. 119
Figure 4. 32. Couple électromagnétique du modèle proposé, GADA1 et GADA2. 119
Figure 4. 33. Puissance statorique active de la génératrice GADA1. 120
Figure 4. 34. Puissance statorique active de la génératrice GADA2. 120
Figure 4. 35. Puissances statoriques actives du modèle proposé, GADA1 et GADA2. 120
Figure 4. 36. Puissance réactive du stator de GADA1. 121
Figure 4. 37. Puissance réactive du stator de GADA2. 121
Figure 4. 38. Puissances statoriques réactives du modèle proposé, GADA1 et GADA2. 122
Figure 4. 39. Courants rotoriques de la génératrice GADA1. 122

Figure 4. 40. Courants rotoriques de la génératrice GADA2. 123
Figure 4. 41. Courants rotoriques du modèle propose. 123
Figure 4. 42. Comparaison des performances : commande vectorielle directe et indirecte. 124
Figure 4. 43. Commande vectorielle directe vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA. 126
Figure 4. 44. Commande vectorielle indirecte vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA. 127
Figure 4. 45. Puissances éoliennes de WT-une-GADA et WT-deux-GADA. 128
Figure 4. 46. Puissances statoriques actives des WT-une-GADA et WT-deux-GADA. 129

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

ABREVIATIONS

GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine (Éolienne à axe vertical)
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine (Éolienne à axe horizontal)
MAS	Machine Asynchrone
SCE	Système de conversion éolien
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Extraction de maximum d'énergie du vent)
DFOC	Direct Field Oriented Control (Commande vectorielle directe)
IFOC	Indirect Field Oriented Control (Commande vectorielle indirecte)
FTBO	Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.
FTBF	Fonction de Transfer en Boucle Fermée.
WT-deux-GADA	Eolienne basée sur deux génératrices GADA
WT-une-GADA	Eolienne basée sur une seule génératrice GADA

SYMBOLES

ρ	Densité de l'air à 15°C	Kg/m^3
R	Rayon de la turbine	M
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	m^2
P_{aer}	Puissance extraite par le rotor éolien (aérodynamique)	Watt
P_v	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé	Watt
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne	-
λ	Vitesse relative de l'éolienne	-
β	Angle de calage des pales de la turbine	°
Ω_s	Vitesse de synchronisme	rad/s
Ω_{tur}	Vitesse de la turbine	rad/s
$\Omega_{tur-estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine	rad/s
Ω_{mec}	Vitesse mécanique	rad/s
V	Vitesse du vent	m/s
$V_{estimée}$	Vitesse du vent estimée	m/s
G	Rapport de multiplication	-
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine	Kg/m^2
J_g	Moment d'inertie du rotor de la génératrice	Kg/m^2

J	Moment d'inertie totale	Kg/m^2
C_{aer}	Couple aérodynamique de l'éolienne	N.m
C_{mec}	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne	N.m
C_{vis}	Couple des frottements visqueux	N.m
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
C_{em_ref}	Couple électromagnétique référence	N.m
$C_{aer_estimé}$	Couple aérodynamique estimé	N.m
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor	rad
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d	rad
θ_{coor}	Angle coordonnée	rad
ω	Vitesse de rotation électrique	rad/s
ω_s, ω_r	Pulsation électrique statorique et rotorique	rad/s
ω_m	Pulsation mécanique de la machine	rad/s
S_s, S_r	Puissance apparente au stator et rotor	VAR
P_s, P_r	Puissance active au stator et rotor	Watt
Q_s, Q_r	Puissance réactive au stator et au rotor	VAR
G	Glissement	-
V	Tension	V
I	Courant	A
φ	Flux	Wb
M	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a (θ=0)	H
I_s	Inductance propre de chaque enroulement du stator	H
I_r	Inductance propre de chaque enroulement du rotor	H
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique	H
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique	H
L_s	Inductance de chaque enroulement du stator	H
L_r	Inductance de chaque enroulement du rotor	H
R_s	Résistance de chaque enroulement du stator	Ω
R_r	Résistance de chaque enroulement du rotor	Ω
R_f	Résistance du filtre	Ω
L_f	Inductance du filtre	H
PI	Correcteur Proportionnel-Integral	-
$P(\theta)$	Park	-
$P(\theta)^{-1}$	Park inverse	-
$\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$	Flux statorique selon l'axe d,q	Wb
$\varphi_{dr}, \varphi_{qr}$	Flux rotorique selon l'axe d,q	Wb
$\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}$	Flux statorique sur l'axe α β	Wb

$\varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}$	Flux rotorique sur l'axe α β	Wb
V_{ds}, V_{qs}	Tension statorique selon l'axe d,q	V
V_{dr}, V_{qr}	Tension rotorique selon l'axe d,q	V
I_{ds}, I_{qs}	Courant statorique selon l'axe d,q	A
I_{dr}, I_{qr}	Courant rotorique selon l'axe d,q	A
$I_{s\alpha}, I_{s\beta}$	Courant statorique sur l'axe α β	A
P_m	Puissance mécanique	Watt
S	Opérateur dérivé de Laplace	-
P	Nombre de paires de pôles de la génératrice GADA	-
F_r	Fréquence de rotor	Hz
F_s	Fréquence de stator	Hz
k_p, k_i	Constantes du régulateur PI	-
τ_r	Temps de réponse du système	-
$Réf$	Indice indiquant la référence (la consigne)	-
C	Paramètre d'échelle	-
K	Paramètre de forme	-
ρ_{UV}	Coefficient de corrélation	-
σ_{UV}	La covariance entre U et V	-
σ_U	Ecart type de la composante U	-
σ_V	Ecart type de la composante V	-

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les émissions de polluants et le réchauffement climatique dû principalement à l'utilisation intensive des énergies fossiles sont devenus les problèmes les plus graves qui menacent l'existence pacifique de l'humanité. Les activités industrielles consomment une grande quantité de combustibles fossiles pour développer leur puissance et émettent des gaz d'échappement nocifs tels que les hydrocarbures non brûlés (HC), le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO_2), les oxydes d'azote (NOx) et les particules fines (PM) [1].

Le dioxyde de carbone (CO_2), la vapeur d'eau (H_2O) et le méthane (CH_4), sont des gaz qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et contribuent ainsi à l'effet de serre. L'augmentation de la concentration de (CO_2) dans l'atmosphère, connu sous le nom «effet de serre additionnel », est considéré comme l'acteur principal de l'élévation récente de la température moyenne de la terre [2]. Les conséquences attendues de ce réchauffement climatique soulèvent des préoccupations (élévation du niveau de la mer, extinction accrue d'espèces animales, diminution des ressources en eau...). A cet égard, de nombreux pays ont décidé de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre [3].

En raison de la formation croissante d'émissions polluantes dans l'environnement et avec la demande croissante d'énergie électrique, les chercheurs et les ingénieurs de la communauté de la conception accordent plus d'attention aux systèmes de technologie de pointe basés sur des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et la pile à combustible, ..., etc. Certes, les préoccupations environnementales, les compétitions économiques, les enjeux politiques liés aux énergies fossiles et la croissance rapide de la population augmentent la demande d'énergie alternative [4, 5]. Sans aucun doute, la source d'énergie éolienne et l'énergie solaire sont les choix les plus appropriés en raison de leurs performances et de leurs aspects économiques. De plus, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont la technologie qui se développe le plus rapidement et les composants clés pour nettoyer et économiser l'énergie [6, 7].

Aujourd'hui, l'énergie éolienne se développe à un rythme très croissant et cela grâce au niveau important de la puissance produite des éoliennes, ainsi qu'aux incitations financières importantes des différents pays largement participant à son essor. Les avantages de l'énergie éolienne sont indéniables et le coût de leur déploiement est maitrisable.

Le rôle principal d'une éolienne se situe dans la récupération de l'énergie cinétique présente dans le vent. Ce dispositif fait appel à des compétences dans des domaines variés, comme l'aérodynamique, la mécanique, les matériaux, la météorologie, …, etc. Les progrès technologiques et scientifiques réalisés dans ces différents domaines ont permis d'améliorer l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes éoliens.

La technologie des éoliennes s'est développée au fil des ans et est devenue la source d'énergie renouvelable, la plus propre, fiable et la plus prometteuse. Depuis le début des années 1980, elle est passée très rapidement d'éoliennes d'une puissance de quelques kilowatts à des éoliennes de plusieurs mégawatts [8, 9]. Les principales différences entre tous les concepts d'éoliennes développés au fil des ans concernent leur conception électrique et leur système de contrôle. Cependant, la technologie des éoliennes est une technologie très complexe impliquant des disciplines techniques multidisciplinaires et larges telles que l'aérodynamique, la mécanique, la dynamique des structures, la météorologie ainsi que le génie électrique traitant de la génération, du transport et de l'intégration des éoliennes dans les systèmes électriques.

La technologie des énergies éoliennes a commencé son développement depuis l'apparition du moulin à vent [4, 10] et jusqu'à la fin des années 1800 et les débuts 1900 où il y avait des éoliennes sans pales profilées qui ont connues des grands succès. Cependant, c'est vers la fin du 19ème siècle que des véritables concepts d'éoliennes à pales profilées ont été exploités avec réussite pour produire de l'électricité [6, 11]. Plusieurs technologies sont adoptées pour extraire l'énergie du vent avec des structures de capteurs plus adéquates [11]. Malgré les spécifications techniques mécaniques de l'éolienne, le système de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assez complexe et assez grand. De plus, plusieurs systèmes éoliens servent avec des génératrices synchrones et asynchrones [6]. Par conséquent, il devient fortement souhaitable l'introduction d'un nouveau système d'énergie éolienne qui produit une puissance de sortie plus élevée même dans les zones où des vitesses de vent sont plus faibles et des modèles de vent complexes sont attendus afin d'optimiser les performances et l'efficacité des aérogénérateurs et d'extraire le maximum de la puissance générée sur le réseau. Avec l'émergence de l'énergie éolienne, les chercheurs ont consacré leurs efforts au développement de la technologie éolienne, ils ont fait plusieurs développements au niveau de ses composants et pièces. Par conséquent, plusieurs solutions et technologies de contrôle ont été étudiées au cours de la dernière décennie [12, 13].

Les techniques de contrôle d'éoliennes et leurs possibilités de se connecter aux réseaux nécessitent de capter un maximum d'énergie sur un intervalle de variation de vitesse du vent le plus grand possible, ceci avec l'objectif de conforter la rentabilité des éoliennes [4]. La machine asynchrone à double alimentation semblable à celui des machines asynchrones traditionnelles

[4, 10]. Ce genre de machine est employé en tant que génératrice dans la majorité des centrales éoliennes, parce qu'il permet d'avoir une grande production d'énergie électrique [4]. Incorporée à l'intérieur d'un système éolien, la génératrice GADA offre la possibilité de fonctionner sur une large plage de vitesses du vent, et d'extraire le plus de puissance disponible, pour chaque vitesse du vent [4, 14].

Nous avons donc abordé un sujet qui est en plein développement, la commande de GADA pour la production énergie électrique est d'actualité et déjà utilisée dans les grandes éoliennes commercialisées. L'importance de ce travail revient à la contribution à l'amélioration des performances des éoliennes. En particulier, nous cherchons à améliorer les performances des éoliennes en mettant l'accent sur l'application d'une éolienne basée sur deux génératrices asynchrones à double alimentation (WT-deux-GADA) montées en cascade sous la variation de la vitesse du vent dans le but d'extraire le maximum de la puissance électrique générée et de valider les performances dynamiques du système par simulation à l'aide de logiciel Simulink/MATLAB. Ce modèle assure également la continuité de la production d'électricité car si l'une de ces deux génératrices tombe en panne, la deuxième génératrice continuera de fonctionner jusqu'à ce que la génératrice défaillante soit réparée. Pour contrôler les deux génératrices, la commande vectorielle est utilisée pour sa facilité de maintenance, sa bonne fiabilité et sa simplicité de mise en œuvre par rapport aux autres contrôleurs [15, 16].

Dans ce travail, nous allons présenter toutes les étapes à réaliser pour faire une étude détaillée de cette nouvelle technologie proposée. Dans ce contexte, notre thèse est structurée en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre permet de donner une vision globale des aspects liés à l'éolien qui comprend quelques notions principales au sujet de l'éolienne et quelques statistiques récentes sur la production mondiale de ce type d'énergie dans les pays leadeurs, ainsi dans le cas d'Algérie, les caractéristiques technologiques des éoliennes. Ensuite, les notions élémentaires de fonctionnement d'un système éolien et les équations principales ont été établies pour décrire la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Le second chapitre fera quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne, les différents types d'éoliennes à axe horizontal et vertical. Après, nous allons présenter les génératrices adaptées avec le système éolien pour différents types et les différentes topologies associés à une éolienne. On termine par un état de l'art sur les travaux relatifs aux différentes technologies dans le domaine de l'énergie éolienne, en utilisant une génératrice GADA.

Dans le troisième chapitre, nous allons orienter notre travail sur la modélisation individuelle de chaque élément de cette chaîne de conversion, à savoir :

- La turbine éolienne et ses stratégies de commande pour maximiser et limiter le capteur de la puissance pendant les faibles et fortes vitesses du vent.
- La génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Ensuite, on considère le réglage des puissances active et réactive afin d'assurer un fonctionnement optimal. A cet effet, une commande vectorielle est appliquée pour assurer un découplage entre les grandeurs électromécaniques. La méthode d'orientation du flux statorique est utilisée pour donner naissance à deux méthodes de contrôle, à savoir : la méthode directe qui contient une seule boucle et la méthode indirecte qui contient deux boucles pour chaque axe du repère d, q. Cette partie, est développée et programmée sous Matlab/Simulink afin d'analyser par simulation le comportement de la chaine dans les différents domaines de fonctionnement possibles. Les résultats de simulations obtenus seront présentés et analysés, dont l'objectif est de vérifier et valider la stratégie de contrôle.

Dans le quatrième chapitre, un rapprochement d'un nouveau modèle éolien basé sur deux génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) a été développé. Dans ce cas, il a été appliqué deux lois de commande vectorielle des puissances active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation et intégrée dans ce nouveau système éolien. Les résultats de simulation par Matlab/Simulink seront présentés par la suite.

Cette thèse se termine par une conclusion qui situe la valeur du travail effectué, et présente les projections et les perspectives futures de notre travail.

CHAPITRE 1 : SURVOL ET APERÇU SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ET L'ENERGIE EOLIENNE

1.1 Introduction

La prise de conscience mondiale sur la surexploitation et la raréfaction des énergies fossiles est le moteur du développement des énergies renouvelables actuel.

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental [17]. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. Parmi la diversité des sources d'énergies nouvelles exploitées actuellement un peu partout dans le monde on trouve :

- Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité (énergie thermique et énergie photovoltaïque).
- La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestres ou de sources chaudes.

Dans ce travail on a choisi d'étudier l'énergie éolienne. Cette énergie consiste à capter l'énergie libre du vent avec les pales. L'énergie éolienne peut être exploitée par des fermes éoliennes de puissance de plusieurs mégawatts. Au cours des dernières décennies, l'énergie éolienne est devenue la source d'énergie renouvelable qui connait la croissance la plus rapide dans le monde. Cette énergie est propre et non polluante et est devenue une réalité mondiale incontournable. Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des éoliens n'a cessé d'évoluer et la plupart des éoliennes sont équipées d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

1.2 Évaluation des énergies renouvelables en Algérie

Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays [18]. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, d'ici 2030, 37% de la capacité installée et 27% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable [19]. En 2011, le ministère de l'énergie a lancé, le « programme national d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique

» (PNEREE). Ce plan prévoit l'installation de 22GW de capacité d'énergies renouvelables d'ici 2030, dont 10 GW sont destinés à l'exportation. D'ici 2030, la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables devrait augmenter d'environ 40%, ce qui équivaudra à une part de 27% dans le mix énergétique. La réalisation de ce plan coûtera à l'Algérie environ 86,55 milliards d'euros. Ainsi, le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent. Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes [20]:

Première phase 2015 - 2020 : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4000 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 500 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

Deuxième phase 2021 - 2030 : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoun et Béchar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

Le tableau suivant donne les capacités cumulées du programme EnR, par type et phase, sur la période 2015 - 2030 :

	1ère phase 2015-2020 (MW)	2ème phase 2021-2030 (MW)	Total (MW)
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP (solaire thermique)	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	05	10	15
Total	**4525**	**17475**	**22000**

Tableau 1. 1. Programme énergies renouvelables 2030 en Algérie [19, 20].

1.3 Énergies éoliennes

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [21]. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent

Après avoir, durant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [22] (figure 1.1).

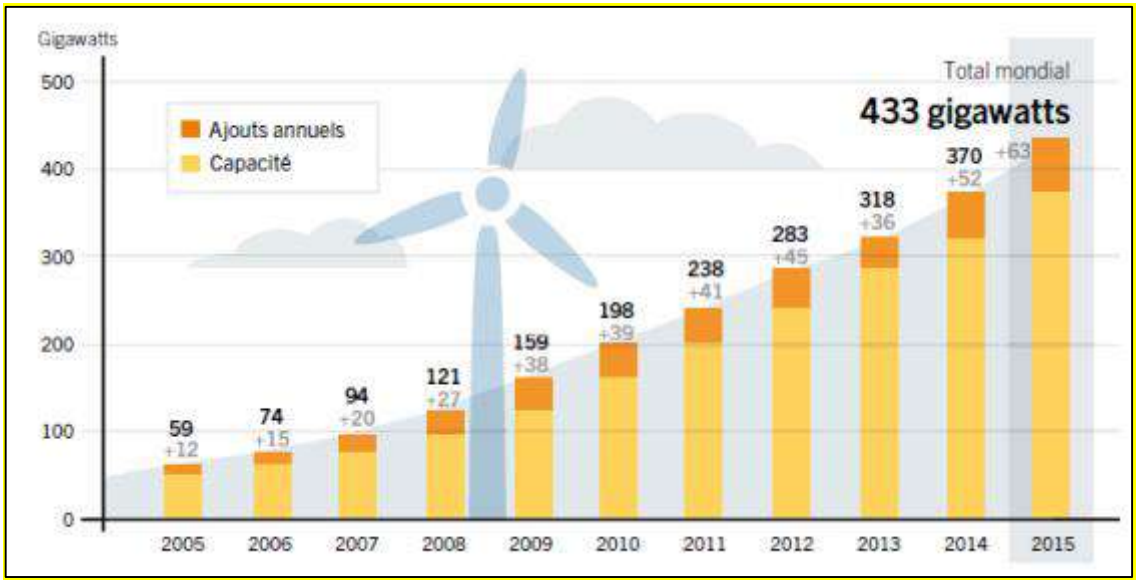


Figure 1. 1. Capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie éolienne entre 2005-2015 [23].

Concernant le cout d'investissement, pour l'éolien terrestre, il est environ de 900 €/MW aujourd'hui, soit 10 fois moins qu'il y a 30 ans, dont la machine représente près des trois-quarts des investissements, alors que pour la production, le coût est bien entendu extrêmement sensible au régime des vents, il est compris dans une fourchette de 3 à 7 ct€/kWh [24]. Une baisse des couts de près de 35 % a été observée dans la décennie 90, essentiellement par effet de série, augmentation de la taille unitaire et du rendement (figure 1.2).



Figure 1. 2. Capacité Baisse des couts de production des aérogénérateurs terrestres, avec une vitesse moyenne des vents de 6 m/s et un amortissement sur 30 ans (taux d'intérêt : 5 %/an) (données Agence de l'Energie Danoise) [24].

D'âpres [25], le cout de production des grandes centrales thermiques fossiles (gaz et charbon) est d'environ 2.5 c€/kWh et celui du grand hydraulique d'environ 3 a 4 c€/kWh, donc par une simple comparaison, un bon dimensionnement sur de bons sites montre bien que l'énergie éolienne, hors couts environnementaux, est déjà économiquement compétitive.

1.3.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement autour du globe. La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des vents. C'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [26]. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique [27, 28]. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins (figure 1.3) [29]:

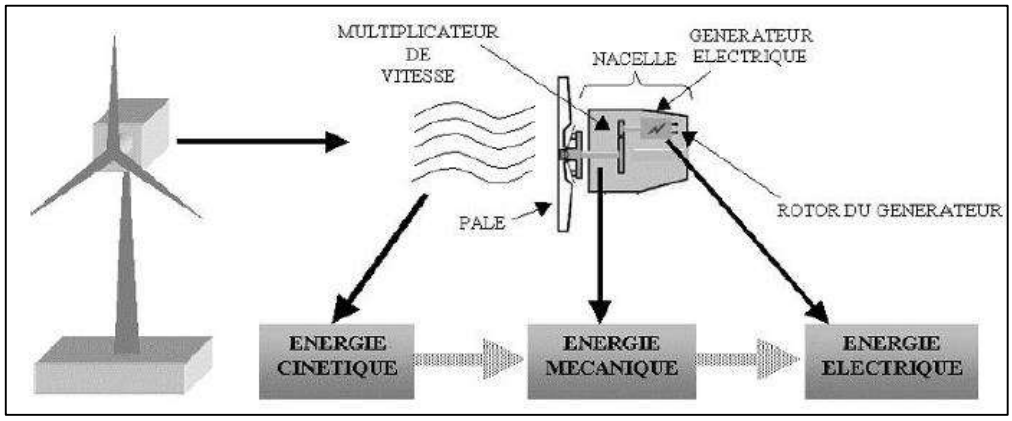


Figure 1. 3. Conversion de l'énergie cinétique du vent [30].

- **La transformation en énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;

- **La production d'énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint, un parc de

batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

1.3.2 Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ [31]. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent (figure 1.4) en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe [31], ce n'est qu''au VIIème siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés [32].



Figure 1. 4. Moulins à vent [31].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs [33]. « Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dès 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que les

aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole, et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au court des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW [33, 34]. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

1.3.3 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou le mât, la nacelle et l'ensemble rotor-pales (figure 1.5).

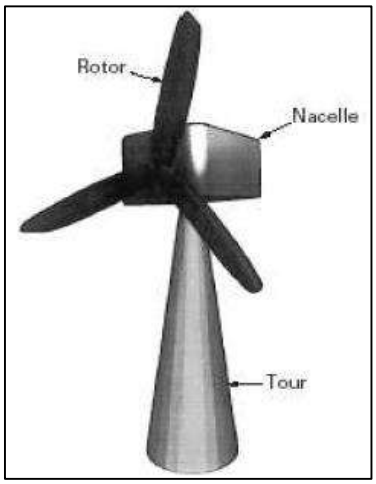


Figure 1. 5. Composants d'une éolienne.

1.3.3.1 Mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique (figure 1.5), doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [35]. Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation [34].

1.3.3.2 Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (1.6) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants:

- Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [36].
- Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir [37].
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance [34].

La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [35].

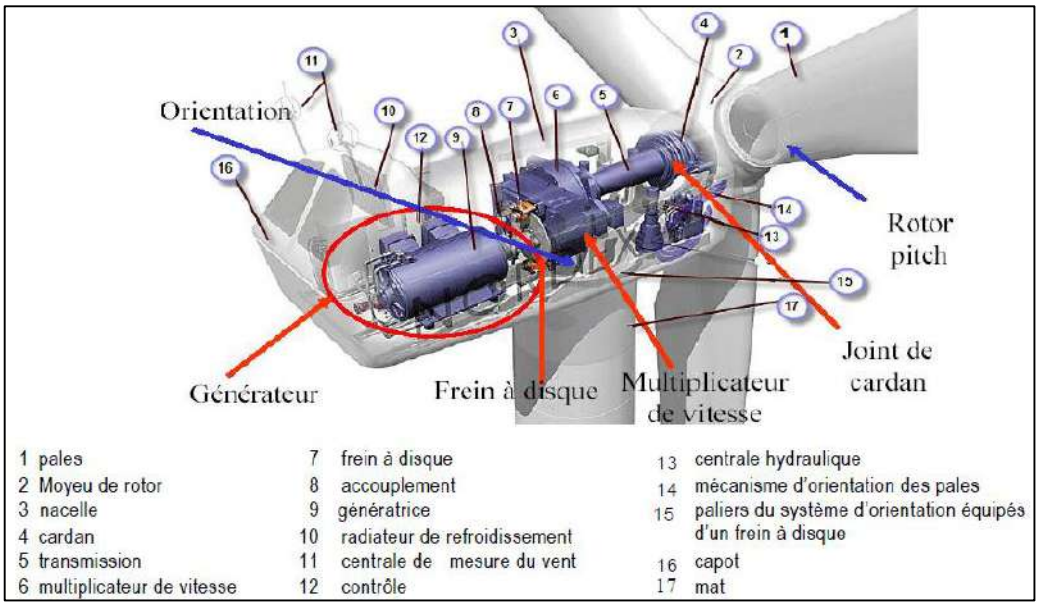


Figure 1. 6. Eléments constituant une éolienne Nordex S77(1500 kW) [27].

1.3.3.3 Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu [37]. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor…).

Le rotor est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal [35].

1.3.4 Fonctionnement des éoliennes

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor ; celle-ci est alors convertie en énergie mécanique. Ensuite, cette énergie mécanique transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin, il existe plusieurs types

d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées.

La connexion de la génératrice au réseau peut se faire soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface d'électronique de puissance. La liaison entre la turbine et le rotor de la génératrice est assurée par la transmission mécanique. Ce principe de fonctionnement est illustré sur la figure (1.7) [38].

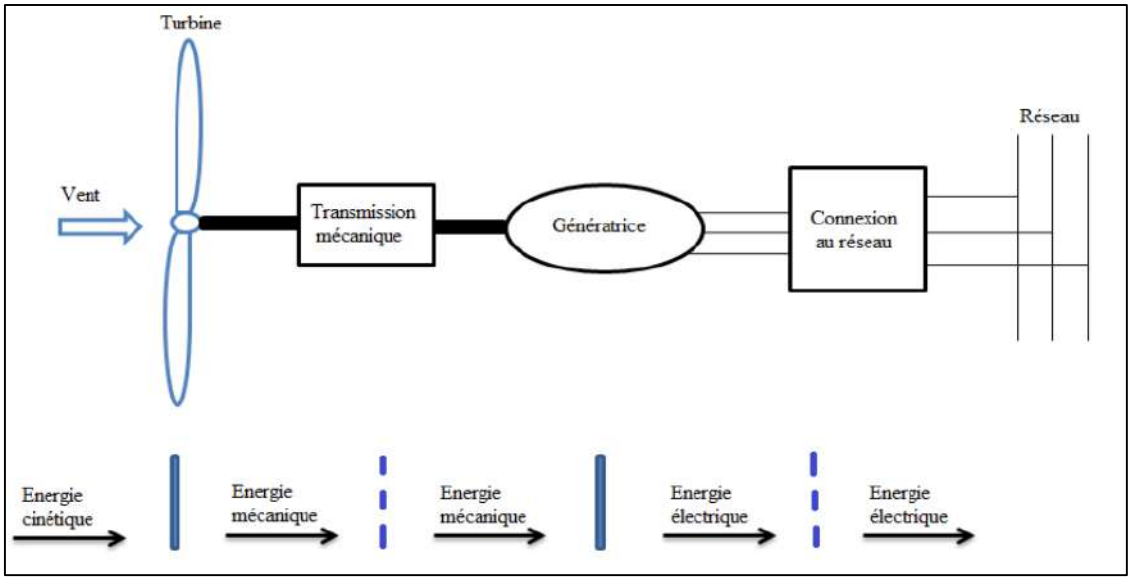


Figure 1. 7. Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne [38].

1.3.5 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

1.3.5.1 Loi de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval (figure 1.8). En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2. La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est exprimée par [39]:

$$m = \frac{\rho S\left(V_1 + V_2\right)}{2} \tag{1.1}$$

Alors la puissance P_t extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) [40]:

$$P_t = \frac{m\left(V_1^2 - V_2^2\right)}{2} \tag{1.2}$$

Soit en remplaçant m par son expression (1.1) dans l'équation (1.2):

$$P_t = \frac{\rho S\left(V_1 + V_2\right)\left(V_1^2 - V_2^2\right)}{4} \tag{1.3}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1, la puissance P_V correspondante serait alors [41]:

$$P_V = \frac{\rho S V_1^3}{2} \tag{1.4}$$

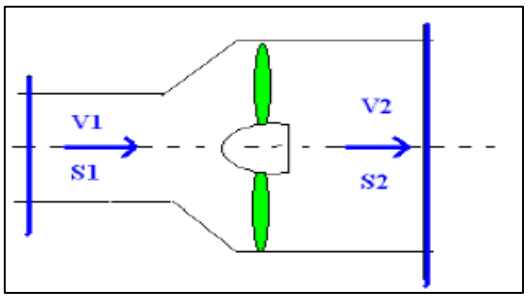


Figure 1. 8. Tube de courant autour d'une éolienne [42].

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors [39, 40]:

$$\frac{P_t}{P_V} = \frac{\left(1+\frac{V_1}{V_2}\right)\left(1-\frac{V_1}{V_2}\right)}{2} \tag{1.5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (1.5), on obtient la figure (1.9), et on s'aperçoit que le ratio $\frac{P_t}{P_V}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de 16/27 soit 0.59 [39, 43]. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

La figure (1.9) présente la variation de coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage nul. Ceci permet de voir que pour un angle de calage quelconque, l'efficacité aérodynamique varie en fonction de la vitesse spécifique. Le coefficient de puissance maximal ($C_{P\max}$) est atteint lorsque la vitesse spécifique est optimale (λ_0).

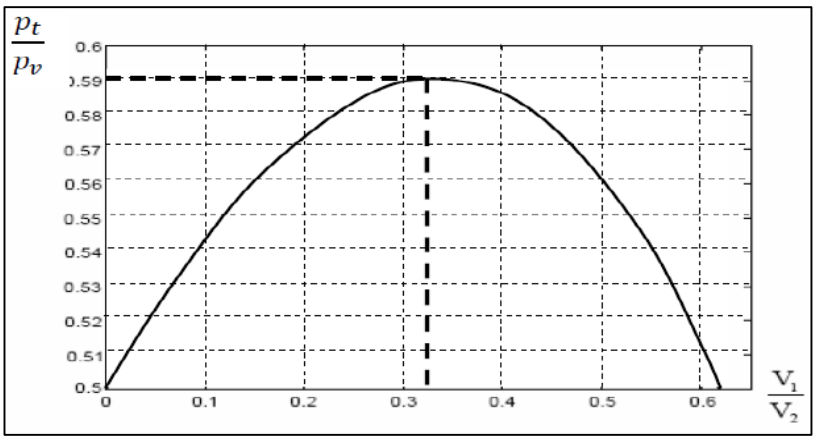


Figure 1. 9. Coefficient de puissance [44].

La vitesse spécifique est en fonction de la vitesse du vent et de la vitesse d'opération de la turbine. Donc il est possible de représenter la puissance mécanique produite de la turbine en fonction de la vitesse d'opération du rotor pour différentes vitesses de vent et toujours avec un angle de calage fixe (figure 1.10).

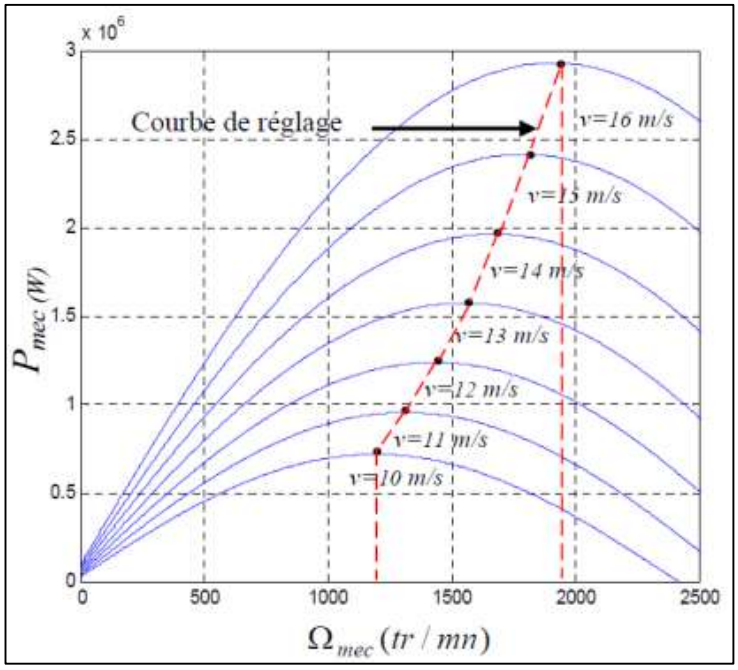


Figure 1. 10. Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du rotor pour différentes vitesses du vent [45].

La figure (1.10) présente un exemple de courbes de la puissance produite en fonction de la vitesse du rotor. Sur celle-ci, on voit que pour chaque vitesse de vent, la puissance possède un maximum en fonction de la vitesse du rotor. En suivant ces maximums, on peut tracer une courbe (en pointillés) sur laquelle le coefficient de puissance est maximal. Le lieu où le coefficient de puissance est maximal correspond également à la vitesse spécifique optimale. En modifiant la vitesse d'opération de la turbine, il est possible de conserver un coefficient de puissance maximal en jouant sur la vitesse spécifique et ainsi maintenir l'opération de la turbine sur la courbe en pointillé. Donc pour optimiser la puissance mécanique produite à partir de l'énergie contenue dans le vent, on doit ajuster la vitesse angulaire du rotor en fonction de la vitesse du vent. Seule une configuration à vitesse variable peut arriver à faire ce genre d'optimisation.

La figure (1.11) présente des courbes typiques pour différents aérogénérateurs. Il est montré que coefficient de puissance augmente avec la vitesse normalisée, atteignant un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec l'augmentation de la vitesse normalisée.

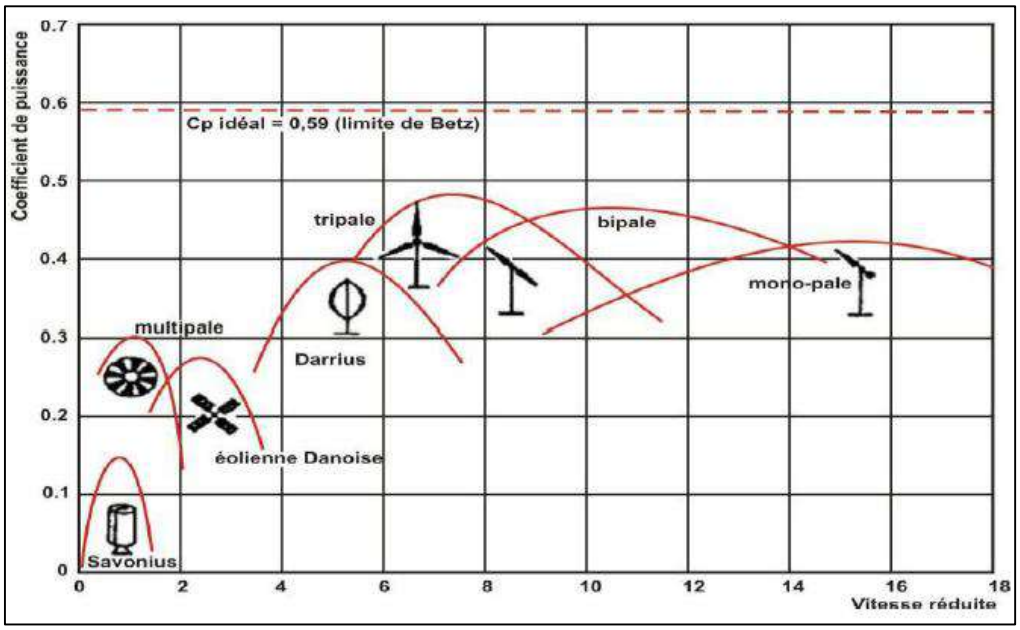


Figure 1. 11. Coefficients de puissance et de couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines [46].

Les aérogénérateurs à usage industrie, possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de (45 mètres) pour des éoliennes de plusieurs mégawatts avec des mâts de plus de 100m. Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre le rendement et le coût. Ces aérogénérateurs présentent des rendements très acceptables et sont retenus par les producteurs industriels. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente [47].

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ , qui représente le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

1.3.5.2 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_c est assez proche du coefficient de puissance C_p où le couple aérodynamique est déterminé directement par la relation suivante:

$$C_{aér} = \frac{P_t}{\Omega_t} \tag{1.6}$$

Avec

$$\Omega_t = \frac{\lambda V}{R} \tag{1.7}$$

Et

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \tag{1.8}$$

D'où

$$C_{aér} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{RP_t}{\lambda V} = \frac{1}{2}\frac{C_p}{\lambda}\rho\pi R^3 V^2 \quad (1.9)$$

La valeur du coefficient de couple C_c est déterminée par:

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{aér}}{\frac{1}{2}\rho SRV^2} \quad (1.10)$$

1.3.6 Systèmes de régulation au niveau de la turbine

1.3.6.1 Bilan des forces s'exercent sur une pale

La figure (1.12) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur $\vec{V}$. Le vecteur $\vec{V}_{rot}$ représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée $\vec{V}_{res}$. L'action du vent sur la pale produit une force qui se décompose en une poussée axiale $\vec{F}_{ax}$ directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée en direction de la rotation $\vec{F}_{rot}$ qui produit effectivement le déplacement [48].

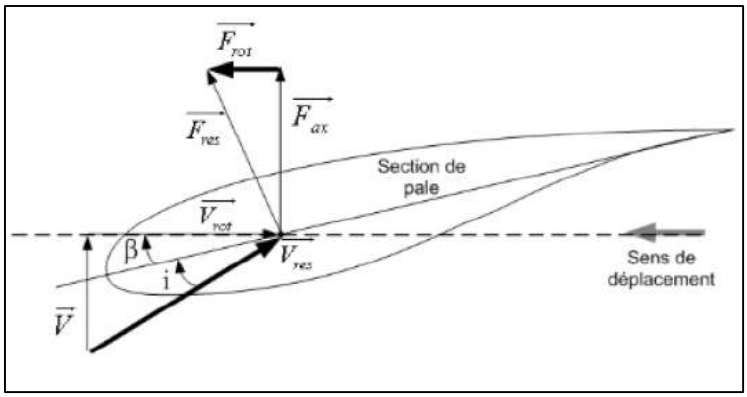


Figure 1. 12. Bilan des forces s'exercent sur une pale [48].

Chaque turbine éolienne est dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

Le dimensionnement en puissance d'un système de conversion d'énergie éolienne (la turbine, le générateur, etc.…) est prédéfini pour fonctionner à une vitesse du vent nominale comme il est indispensable de limiter la vitesse du vent captée pour nominaliser la puissance convertie par la turbine et empêcher la destruction de tout le système. Le réglage de la puissance captée par la turbine se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend de l'angle

d'incidence α et de calage β. Il existe trois méthodes principales pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et la limiter lorsque la vitesse du vent est trop élevée.

1.3.6.2 Contrôle par angle de calage variable (pitch control)

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à contrôler la puissance mécanique générée par la turbine pour les faibles et fortes vitesses du vent. Pour un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé l'angle de calage β (pitch control) (figure (1.13)). Pour modifier les performances de la turbine, plus précisément le coefficient de puissance, on varie l'angle d'orientation de ces pales lors des fortes vitesses du vent. Cette technique consiste à varier l'angle de calage des pales, donc l'angle d'incidence, ce qui limite l'action des forces aérodynamiques exercées sur les pales. Cela réduit considérablement toutes les contraintes sur la turbine face aux fortes vitesses du vent, tout en maintenant un couple mécanique constant qu'on peut annuler par une mise en drapeau [49].

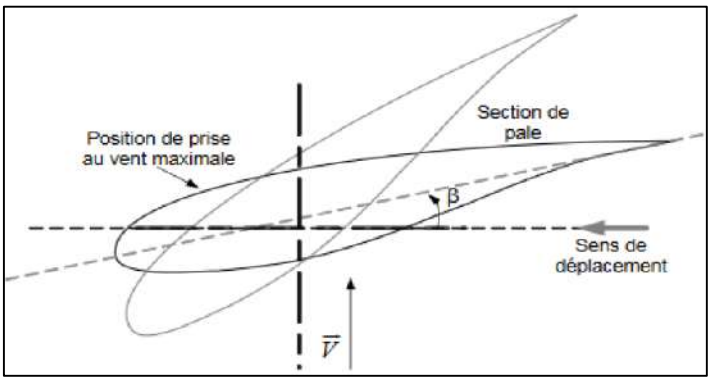


Figure 1. 13. Variation de l'angle de calage d'une pale [49].

1.3.6.3 Contrôle par décrochage aérodynamique passif (passive stall)

Ce système est plus léger et moins coûteux que le système précédent, à cause de l'absence du système de contrôle de l'angle de calage ; comme il est simple et robuste, du fait qu'il ne dispose d'aucun système mécanique ou électrique auxiliaire (figure (1.14)). L'angle de calage est fixe, alors que l'angle d'incidence varie avec la vitesse du vent incident, et son augmentation entraîne une augmentation de la traînée, un décrochage progressif des pales et un maintien de la vitesse de rotation de la turbine constante. Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine Aussi, il faut s'assurer que pour une certaine vitesse du vent, l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée [49].

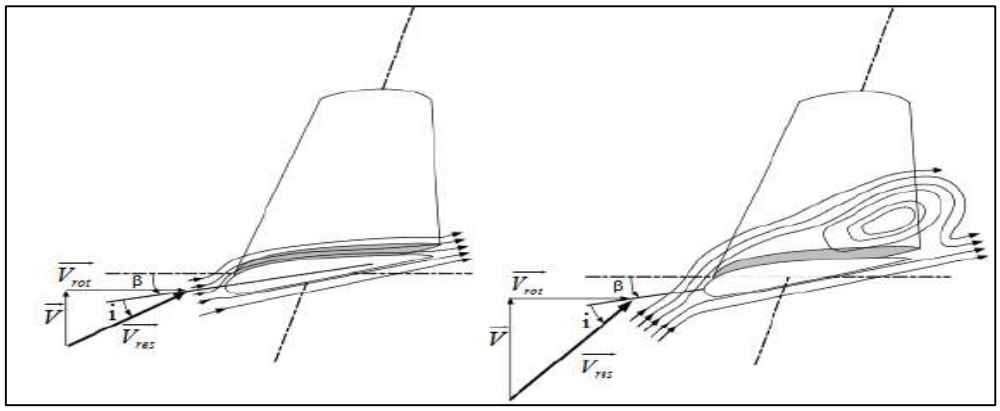


Figure 1. 14. Flux d'air sur un profil de pale " stall " [49].

1.3.6.4 Contrôle par décrochage aérodynamique actif

Ce système est l'hybridation des deux systèmes décrits précédemment. Il est utilisé pour les systèmes de très grandes puissances. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est plus simple et moins coûteux [50]. La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (figure (1.15)).

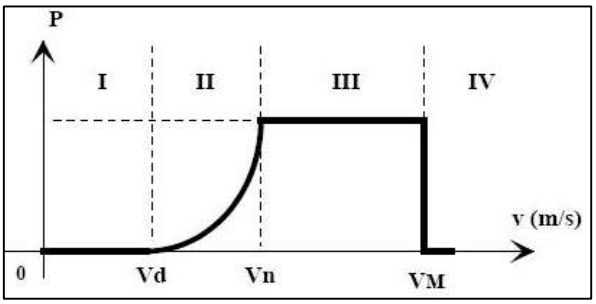


Figure 1. 15. Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [50].

- La zone I, où P=0 (la turbine ne fonctionne pas).
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n.
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

1.3.7 Critère de choix d'un potentiel éolien

L'énergie cinétique de vent constitue une ressource énergétique inépuisable mais fluctuante. Pour toute installation d'une éolienne dans un endroit, il faut d'abord faire une étude des caractéristiques des sites:

- Quantifier la ressource éolienne sur les sites d'application.
- Estimer la puissance moyenne annuelle disponible sur ces sites.

1.3.7.1 Le vent

Le vent joue un rôle important comme une variable d'entrée dans un système éolien. Son utilisation est en plein développement dans le monde, actuellement elle commence à être importante en Algérie. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température [51]. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd).

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes altitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des aires anticycloniques [52]. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. On repère la direction du vent par le coté d'où il souffle. On dit que la direction du vent est ouest si le courant d'air vient de l'ouest [24]. La figure (1.16) montre la représentation synthétique de la circulation atmosphérique globale. De l'équateur aux pôles, la circulation atmosphérique peut être divisée en trois zones de circulation des vents. Elles sont respectivement composées des cellules de Hadley, des cellules de Ferrel et des cellules polaires. Ces grandes cellules de la circulation atmosphérique sont séparées par les anticyclones (A) et les dépressions (D). Dans chacune des cellules, les flèches bleues symbolisent les courants froids et les flèches rouges les courants chauds [53].

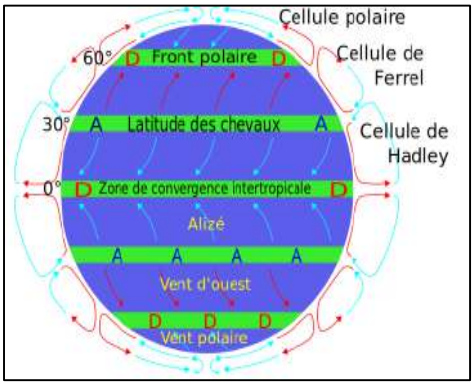


Figure 1. 16. Circulation du vent dans le monde [53].

1.3.7.2 Gisement éolien en Algérie

Les ressources éoliennes mondiales sont très abondantes, mais le développement de leur exploitation dépend non seulement de difficultés technologiques pratiquement surmontées dans leur ensemble à l'heure actuelle, mais surtout et en grande partie de données économiques et politiques [52]. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien [54].

L'Algérie possède un gisement éolien important à cause de leur situation, principalement sur une bande côtière des centaines de kilomètres. De plus, en se plaçant vers l'intérieur du pays on trouve un gisement intérieur aux hauts plateaux aussi élevé que sur les rivages et à une hauteur bien moindre. En se déplaçant encore d'avantage vers l'intérieur, au Sahara, on rencontre les gisements les plus intéressants en Algérie [52]. la première carte du vent de l'Algérie proposé par Kasbadji-Merzouk [52] estimée à 10 m du sol est présentée en figure (1.17). Les résultats obtenus ont permis de détecter des zones ventées en Algérie, les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. Le sud algérien est caractérisé par des vitesse plus élevées que le nord (figure 1.17), plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée[55].

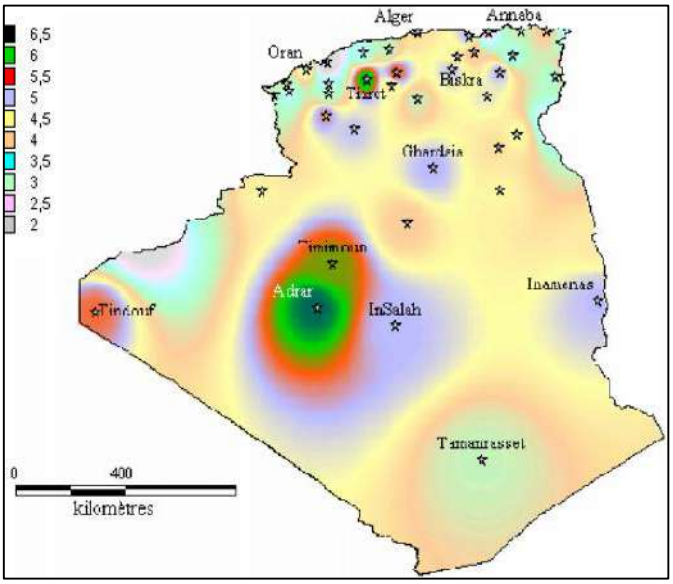


Figure 1. 17. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [56].

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en figure (1.18) (été et printemps, hiver et automne). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année.

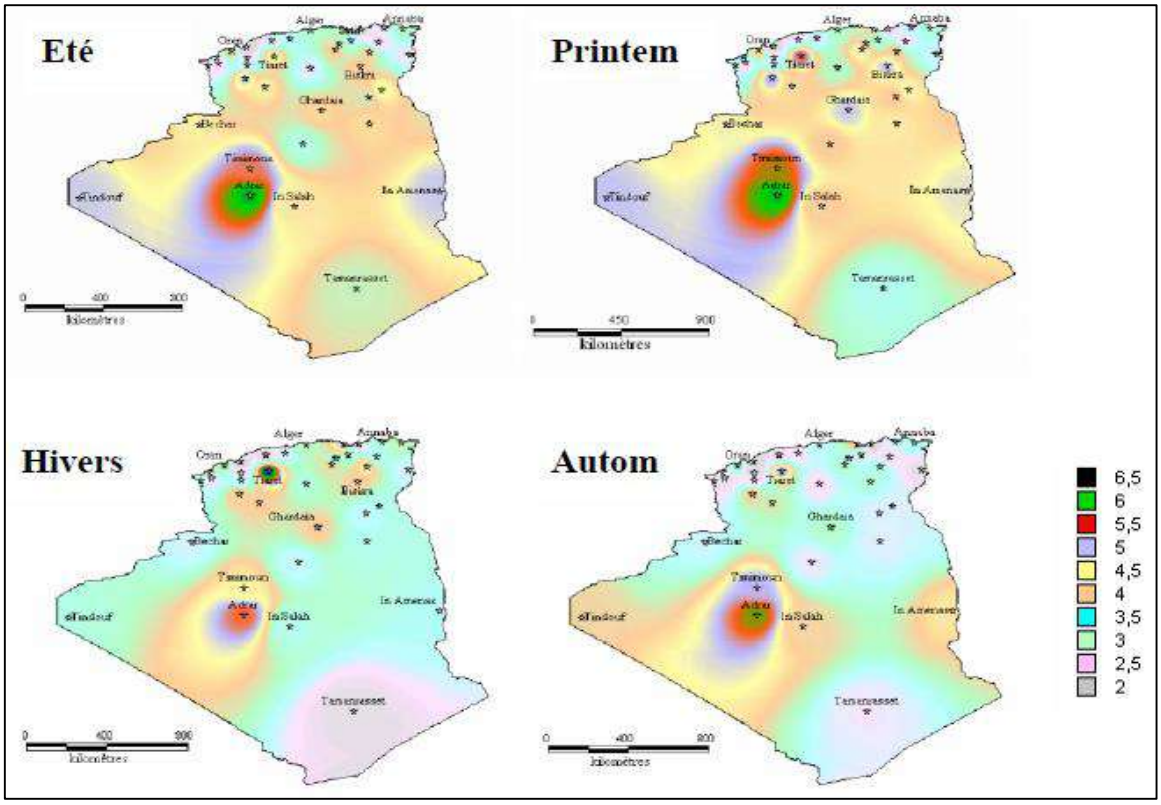


Figure 1. 18. Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (hiver et automne, été et printemps) [56].

1.3.7.3 Lois de distributions de vent

La connaissance de la loi de distribution de la vitesse du vent est importante pour de nombreuses applications de l'énergie éolienne. Le vent se caractérise par trois grandes variables par rapport au temps [52]:

- Sa vitesse (modélisée par la loi de probabilité de Weibull).
- Sa direction (modélisée par la loi de probabilité de Smith).
- Son altitude (modélisée par la loi de Monin-Obukov).

↳ Distribution du vent en fonction de la vitesse (loi de Weibull)

La loi de Weibull vient des statistiques. Elle est adaptable à beaucoup de types de statistiques. Sur des séries des mesures du vent (au moins un an) on l'utilise comme modèle.

Ses paramètres 'K' et 'C' sont calculés en fonction des mesures. Toutefois, le modèle le plus utilisé est celui de la distribution de Weibull qui s'avère approprié à la représentation des propriétés statistiques du vent [57].

La distribution de Weibull est un cas particulier de la loi de distribution gamma généralisée, elle peut être réduite en deux autres distribution théoriques : la distribution exponentielle (K=1) [58], et la distribution Rayleigh (K=2) [59]. La formule mathématique de la distribution de Weibull est comme suite:

$$f(V)=\left(\frac{K}{C}\right)\left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} e^{\left[-\frac{V}{C}\right]^k} \tag{1.11}$$

Avec

C : est le paramètre d'échelle;

K : est le paramètre de forme.

La densité de probabilité f(V) représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées. K et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre K (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse. La détermination de ces paramètres permette la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par:

$$\begin{cases} f(V \le V_x)=\int_0^x f(V)dV = 1-e^{\left[-\frac{V_x}{C}\right]^k} \\ f(V \succ V_x)=\int_x^\infty f(V)dV = e^{\left[-\frac{V_x}{C}\right]^k} \end{cases} \tag{1.12}$$

- **Distribution du vent en fonction de la direction**

Si les composantes horizontales des vecteurs de directions du vent sont U et V en coordonnée cartésiennes $U = v\cos(\varphi)$ et $V = v\sin(\varphi)$.

En coordonnée polaire, la loi de distribution des directions de Smith est:

$$P(v)=\frac{d}{a^2}\exp\left(-\frac{c^2}{2}\right)\left[1+\sqrt{2\pi}b\,\exp\left(\frac{b^2}{2}\right)\phi(b)\right] \tag{1.13}$$

D'où

$$a^2 = \left(\frac{1}{1-P^2}\right)\left\{\cos^2\varphi/\sigma_U^2 - 2\rho_{UV}\left(\cos\varphi\sin\varphi/\sigma_U\sigma_V\right) + \sin^2\varphi/\sigma_V^2\right\} \quad (1.14)$$

$$b^2 = \left(\frac{1}{1-P^2}\right)\left\{\overline{U}\cos\varphi/\sigma_U^2 - \rho_{UV}\left(\overline{U}\sin\varphi + \overline{V}\cos\varphi\right)/\sigma_U\sigma_V + \overline{V}\sin\varphi/\sigma_V^2\right\}\frac{1}{a} \quad (1.15)$$

$$c^2 = \left(\frac{1}{1-P^2}\right)\left[\overline{U}^2/\sigma_U^2 - 2\rho_{UV}\overline{U}\overline{V}/\sigma_U\sigma_V + \overline{V}^2/\sigma_V^2\right] \quad (1.16)$$

La fonction caractéristique de distribution est donnée par la formule suivante:

$$\Phi(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{b}\exp\left(-t^2/2\right)dt$$

$$\rho_{UV} = \frac{\sigma_{UV}}{\sigma_U\sigma_V} \quad (1.17)$$

Avec

ρ_{UV} : Coefficient de corrélation;

La covariance entre U et V: $\sigma_{UV} = \frac{1}{T}\int_{\frac{-T}{2}}^{\frac{+T}{2}} U(t)V(t)dt = \overline{uv}$;

T : Temps de mesure;

L'écart type de la composante U et l'écart type de la composante V sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{cases} \sigma_U = \left\{\frac{1}{T}\int_{\frac{-T}{2}}^{\frac{+T}{2}}\left[U(t)-\overline{U}(t)\right]^2 dt\right\}^{1/2} \\ \sigma_V = \left\{\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}}\left[V(t)-\overline{V}(t)\right]^2 dt\right\}^{1/2} \end{cases} \quad (1.18)$$

En déduit la loi de distribution des directions de vent dans un secteur angulaire déterminée par:

$$P(\varphi_1 \le \varphi \le \varphi_2) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi)d\varphi \quad (1.19)$$

Distribution du vent en fonction de l'altitude

La variation de la vitesse moyenne du vent U calculée sur une courte période, en fonction de la hauteur Z est donnée par la théorie de la similitude de la couche limite turbulente de Monin-Obukov par [60]:

$$U(Z)=\frac{u(x)}{k}\left[\log\left(\frac{Z}{Z_0}\right)-\psi\left(\frac{Z}{L}\right)\right] \tag{1.20}$$

Avec $u(x)$ la vitesse de frottement en m/s que l'on détermine par la relation précédente en remplaçant Z par 10m:

$$U(Z)=\frac{K_{U10}}{\left[\log\left(\frac{10}{Z_0}\right)-\psi\left(\frac{10}{L}\right)\right]} \tag{1.21}$$

Avec

L : Longueur de Monin-Obukov en m qui est négative pour des conditions instables;

Z_0 : Paramètre de rugosité;

K : Constante de Von karman qui vaut à peu près 0.4;

$\psi(Z/L)$: Fonction universelle de la hauteur relative à Z par rapport à l'échelle de turbulence L.

Plusieurs auteurs [61, 62] ont proposé des approximations qui sont décrites pour les différents états de stabilité de l'atmosphère et sont données par:

$$\begin{cases} \psi\left(\frac{Z}{L}\right)=-4{,}7\left(\frac{1}{L}\right) \quad pour \quad \left(\frac{1}{L}\right)>0{,}003m^{-1} \quad stabilité \\ \psi\left(\frac{Z}{L}\right)=0 \quad pour \quad -0{,}003<\left(\frac{1}{L}\right)<0{,}003m^{-1} \quad indifférence \\ \psi\left(\frac{Z}{L}\right)=2\log\left(\frac{1+x}{2}\right)+\log\left(\frac{1+x^2}{2}\right)-\frac{2}{tg\left(x+\frac{\pi}{2}\right)} \quad pour \quad \left(\frac{1}{L}\right)<0{,}003m^{-1},\ x=\left(1-\frac{10z}{L}\right)^{1/4} \quad instabilité \end{cases}$$

La théorie de la similitude de la couche limite turbulente de Monin-Obukov n'est pas applicable dans le cas de la vitesse moyenne de vent et qui a été calculée sur une période d'un mois à un an car les conditions de stabilité sont extrêmement variables sur cette période, alors Justus et Mikhail [63] ont préféré assimiler l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur, dans la couche de surface, à une loi de puissance donné par la relation suivante:

$$\frac{u}{u_1}=\left(\frac{Z}{Z_1}\right)^{\alpha} \tag{1.22}$$

L'équation (1.22) a été reprise par Justus et al. [63] en proposant une expression permettant l'estimation du coefficient de friction (cisaillements) α afin de tracer le profil vertical permettant ainsi l'extrapolation instantanée des vitesses du vent. Elle s'écrit sous la forme suivante:

$$\alpha = a + b \ln v_0 \tag{1.23}$$

D'où

u , u_1 : sont les vitesses moyennes à la hauteur Z , Z_1 ;

Où a et b sont des constantes dont les valeurs dépendent de la hauteur de l'anémomètre donner par la loi de puissance Justus C.G. et Mikhail (1976), donnés par [63]:

$$\begin{cases} a = \dfrac{0{,}37}{1 - 0{,}088 \ln\left(\dfrac{Z1}{10}\right)} \\ b = \dfrac{-0{,}088}{1 - 0{,}088 \ln\left(\dfrac{Z1}{10}\right)} \end{cases} \tag{1.24}$$

1.3.8 Différentes défaillances dans les systèmes éoliens

La surveillance des systèmes éoliens de production d'énergie électrique exige la détection précoce de leurs défaillances, pour assurer leur fonctionnent normal et avoir un rendement énergétique optimal. Des analyses des données réelles de défaillances dans les turbines éoliennes ont montré les composants principaux d'un système éoliens qui sont concernés par l'analyse de défaillance [64]. La figure (1.19) montré que la plupart des défaillances sont liées au système électrique, les différents capteurs, le système d'orientation des pales et le système de contrôle respectivement.

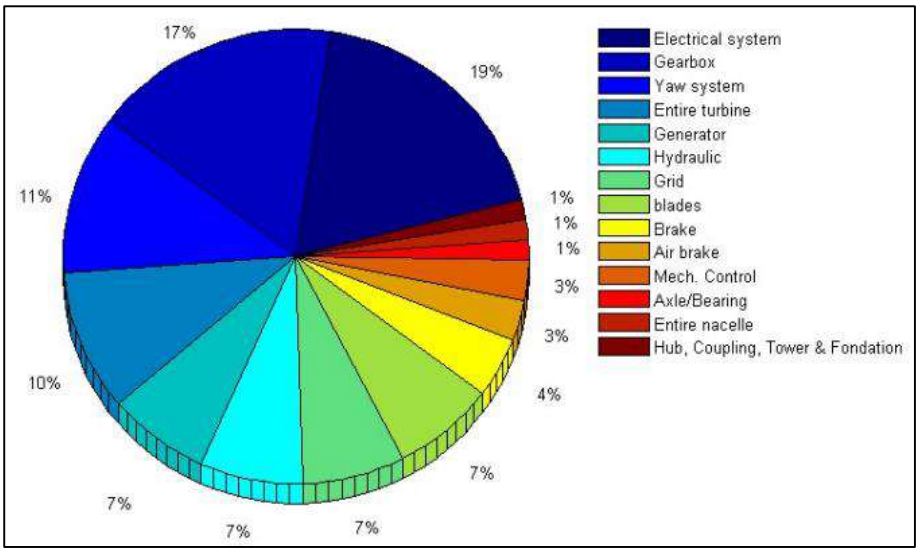


Figure 1. 19. Taux de défaillance des composants des éoliennes [64].

Défaillance du système électrique

Les progrès en ingénierie et en sciences des matériaux ont entrainé les machines électriques à devenir plus légères, tout en ayant une durée de vie considérable. Néanmoins, malgré les améliorations apportées aux techniques de conception, les défauts peuvent encore se produire [65]. Les défauts les plus rencontrés sur les machines électriques de faible et moyenne puissance sont les défauts statoriques et les défauts dus aux contraintes mécaniques occupent les pourcentages les plus élevés (Figure 1.20) pour les machines électriques de grande puissance.

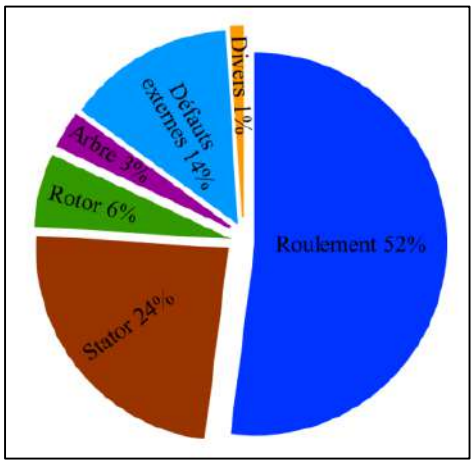


Figure 1. 20. Distribution des défauts des machines électriques [65].

En général, la machine électrique peut présenter différents types de défauts qui peuvent être citées comme suit [66]:

- Les défauts statoriques.
- Les défauts rotoriques.
- Les défauts de roulement.
- La tension d'alimentation.
- Le Flux rayonnant de dispersion.
- La tension du neutre.
- Le couple électromagnétique.
- La vitesse de rotation.
- La puissance instantanée.
- Les courants dans le repère de Park.
- La vibration mécanique.
- Les pannes des bobines.
- Les courts circuits et les dommages qui peuvent atteindre les composantes électriques.
- Les pannes des transformateurs et coupures des fils électriques.

Ces défauts sont les principaux modes de défaillance du système électrique d'une éolienne (figure (1.21)) [64]. Les plus importantes causes de ce genre de défaillances étant la foudre, la mauvaise installation électrique et les défauts techniques de quelques composantes électroniques (résistances, capacité, ...) [67]. La présence des défauts dans une génératrice d'une éolienne provoque des courts circuits dans la génératrice.

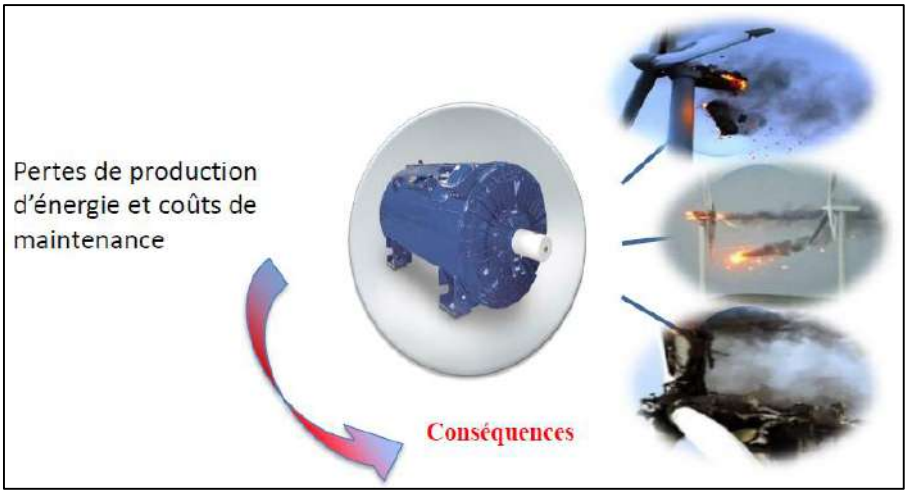


Figure 1. 21. Défaillances dans une éolienne.

La sûreté de fonctionnement des éoliennes devient un aspect important pour la sécurité des génératrices et du réseau électrique. Les éoliennes possèdent différentes causes des défaillances, la figure (1.22) montre les quatre causes principales de défaillance de la nacelle d'une éolienne.

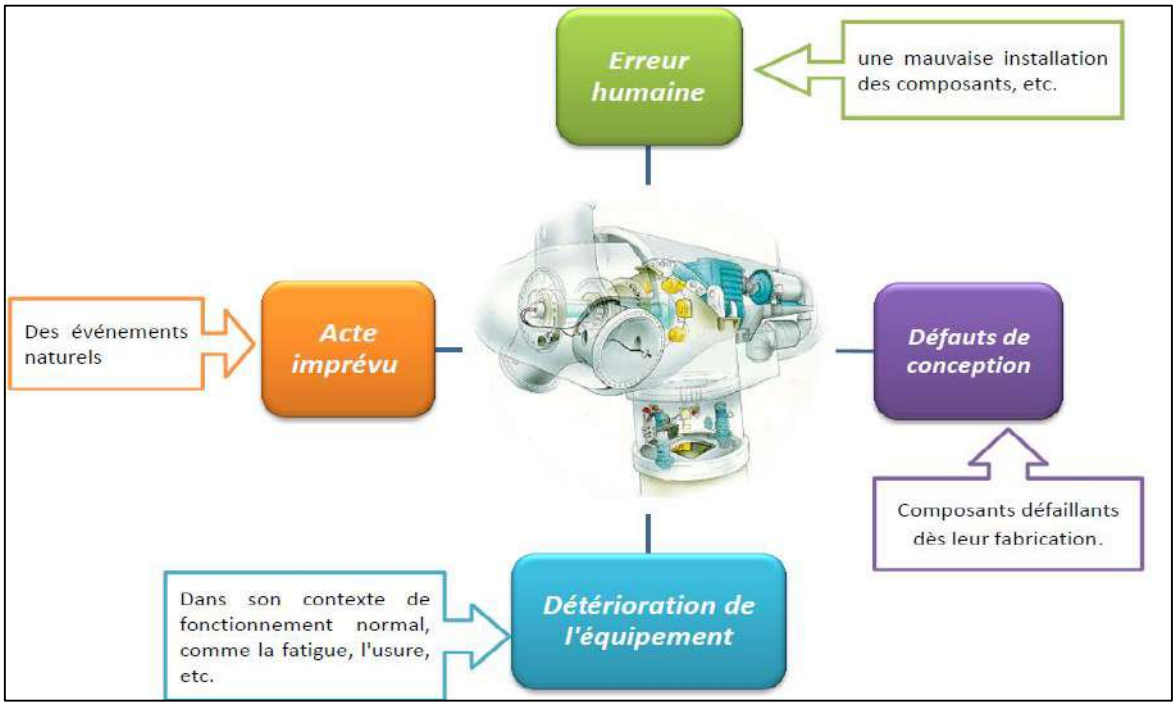


Figure 1. 22. Différentes causes des défaillances dans une éolienne [67].

Le tableau (1.2) propose l'origine des défaillances de la génératrice asynchrone triphasée des turbines éoliennes selon les causes internes de défauts et les causes externes de défauts.

Origine des défaillances de la génératrice	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée	**Mécaniques**	-Frottement rotor/stator -Excentricité -Déplacement des conducteurs -Défauts des roulements
		Electriques	-Rupture des barres -Défauts statoriques -Défauts d'isolement
	Causes externes de défauts de machine asynchrone triphasée	**Mécaniques**	-Pulsation de couple -Surcharge -Mauvais montage
		Environnementales	-Température -Encrassement -Humidité
		Electriques	-Fluctuation de tension -Tension transitoire -Déséquilibre de tension

Tableau 1. 2. Origine des défaillances de la génératrice [64].

1.3.9 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie à également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [55].

Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.

- L'énergie éolienne est une énergie propre, elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO_2. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO_2, etc. … [68].

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique , et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [69]. L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs.

- L'exploitation de l'énergie éolienne 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.

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [70].

- C'est l'énergie renouvelable la moins chère à produire [71].

- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année ou la demande est plus forte.

Inconvénients

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [68].

- Le bruit : Le bruit mécaniques ou aérodynamiques ont été nettement réduits, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

- La source d'énergie éolienne étant stochastique [71], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas

toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

1.3.10 Applications des éoliennes

La technologie des systèmes éoliens, très fiable et très souple depuis des siècles, Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne, de multiples usages :

- En ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...).

- Le pompage de l'eau : Depuis des générations, on utilise le vent comme source d'énergie fiable et économique dans les systèmes de pompage de l'eau. Dans les régions rurales ou éloignées, l'installation d'un système de pompage éolien mécanique ou électrique peut constituer le meilleur moyen d'assurer les besoins en eau du bétail, du ménage ou même de la communauté.

- Récréation : Utiliser le vent pour assurer les besoins énergétiques d'un chalet ou d'un bateau peut être plus efficace et plus économique que d'utiliser des générateurs à carburant fossile. Un système éolien écologique peut fournir l'électricité nécessaire à l'éclairage, de même qu'au fonctionnement de la radio et des petits appareils ménagers.

- Fermes et ranchs : Les fermiers utilisent le vent pendant des siècles pour pomper eau. Les systèmes éoliens peuvent, de nos jours, rendre encore plus de services dans une exploitation agricole moderne. Comme ils représentent la solution idéale lorsqu'on a besoin d'électricité à basse tension dans des endroits éloignés, les générateurs fonctionnant à l'énergie éolienne sont utilisés, dans les fermes, pour alimenter en électricité les clôtures électriques et les systèmes d'éclairage extérieur.

- Usage domestique : Les habitants de la campagne, désireux de réduire l'effet indésirable sur l'environnement de leur consommation d'énergie, peuvent restreindre leur dépendance par rapport au réseau d'électricité en utilisant un système éolien. Même un mini système éolien permet d'économiser de l'électricité produite à partir de carburants fossiles ou de l'énergie nucléaire.

➢ Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configurations : l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure et l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

1.4 Conclusion

Les énergies renouvelables permettent de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité...) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ...).

Nous avons présenté dans ce présent chapitre un état de l'art sur les énergies éoliennes qu'on va utiliser dans notre étude, on a essayé de le présenter d'une façon générale, ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur. De plus, un aperçu sur quelques notions principales au sujet de la technologie éolienne a été données comme la formule de la puissance d'une éolienne, limite de Betz, les méthodes de description du gisement éolien.

CHAPITRE 2 : DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE DES EOLIENNES

2.1 Introduction

La technologie des aérogénérateurs a évidemment évolué ceci a permis, à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique. La littérature atteste un grand intérêt accordé aujourd'hui à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pour diverses applications, en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime.

Dans ce chapitre une synthèse des travaux qui ont été réalisés, va permettre de situer nos travaux par rapport à ceux qui ont été déjà faits. Avant d'aborder l'étude et la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation, nous allons présenter d'abord un état de l'art des travaux sur cette dernière, en regroupant l'ensemble des articles ou contenus d'ouvrages.

2.2 Technologie des éoliennes

Les éoliennes peuvent être divisées en différentes technologies:

2.2.1 Selon la puissance des éoliennes

Les systèmes éoliens permettant de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. ces systèmes exigés aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables [72]. Les éoliennes sont divisées selon leur puissance nominale en trois catégories. Le tableau (2.1) propose une classification des turbines éoliennes selon la puissance nominale qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [73].

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

Tableau 2.1. Différentes catégories des éoliennes [73].

La figure (2.1) illustre la correspondance de taille en fonction de puissance des éoliennes.

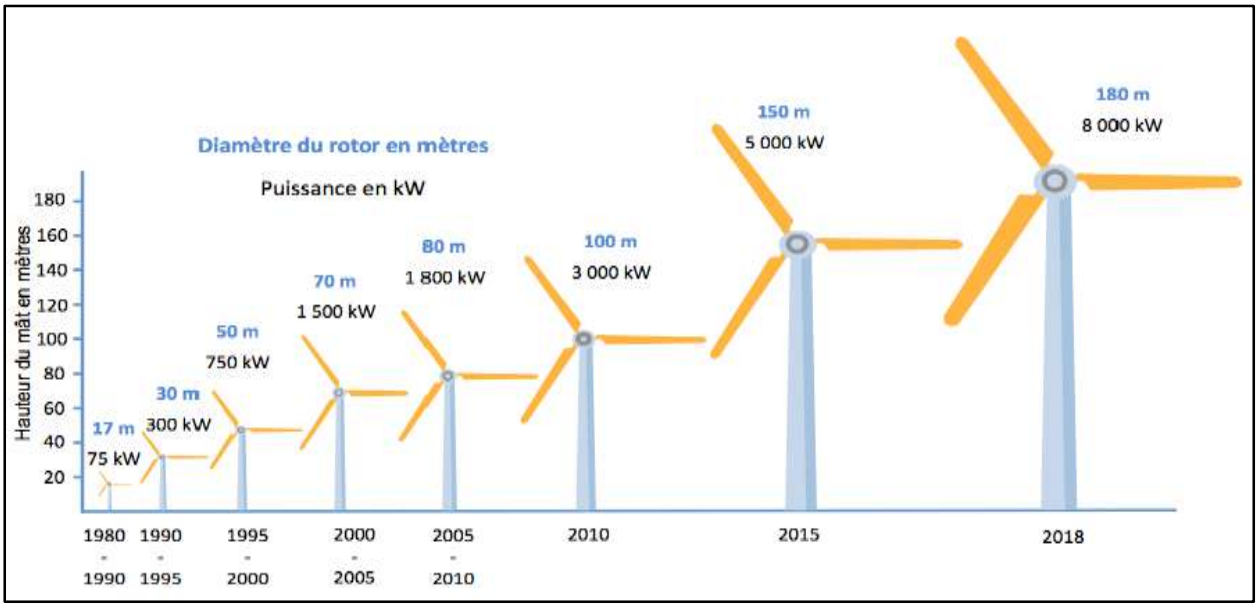


Figure 2. 1. Correspondance taille-puissance des éoliennes [74].

2.2.2 Selon la disposition géométrique d'éoliennes

On classe les éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice en deux grandes familles de turbines éoliennes : les éoliennes à axe horizontal (HAWT) et les éoliennes à axe vertical (VAWT) (figure 2.2).

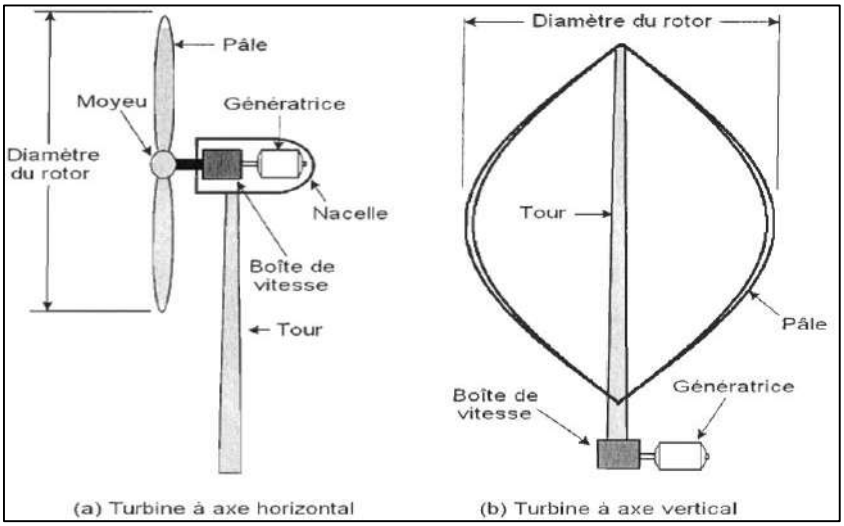


Figure 2. 2. Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical [75].

2.2.2.1 Eoliennes à axe vertical

L'éolien à axe vertical est le premier à être utilisé pour convertir l'énergie éolienne. Leur rotor est monté perpendiculairement par rapport à la terre. Ceci permet de placer le système d'entraînement ainsi que la génératrice au niveau du sol. Leur fonctionnement est basé sur la

poussée axiale du vent et son incidence sur l'arbre du système. Cette catégorie d'éolienne a vu plusieurs prototypes, mais deux seulement ont atteint l'étape d'industrialisation [76].

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus classique et Darrieus en forme de H:

- **Rotor de Savonius**

Inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924, ce rotor est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble [29]. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (figure 2.3).

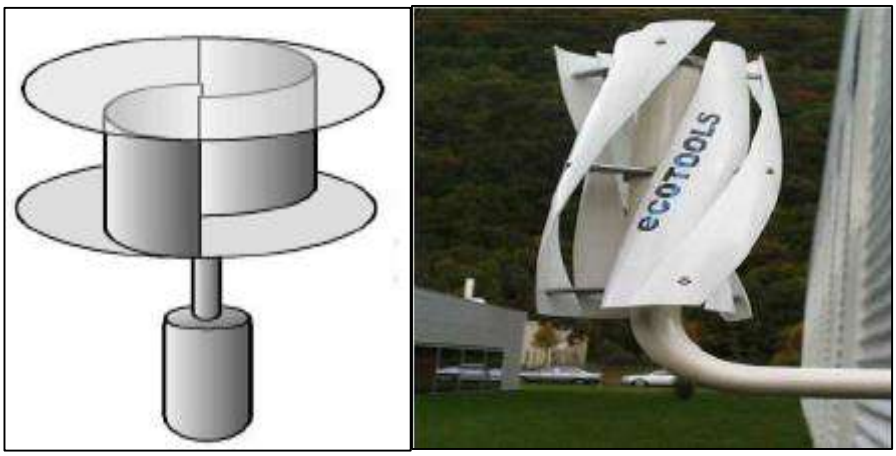


Figure 2. 3. Eolienne à axe vertical (Structure de Savonius) [45, 77].

- **Rotor de Darrieus**

Inventé par l'ingénieur français George Darrieus en 1931, l'éolienne de Darrieus est caractérisée par ses pales de rotor en forme de « C » qui la font ressembler un peu à un « batteur d'œufs ». Le rotor de Darrieus fonctionne grâce à la portance et se base sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (figure 2.4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (ex. montage d'une petite éolienne Savonius sur son même rotor) [29].

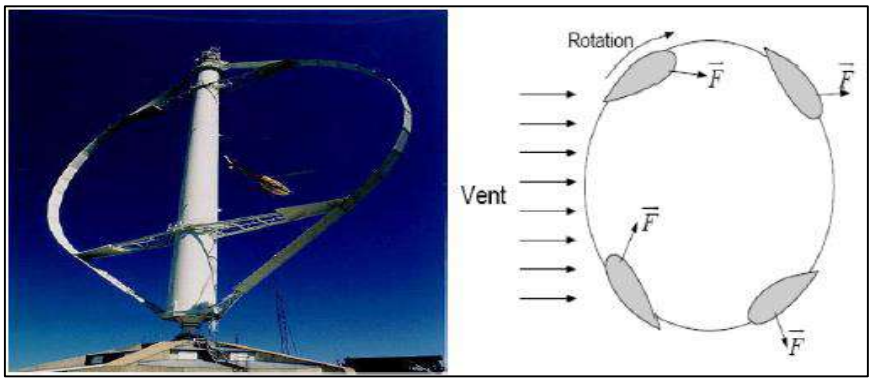


Figure 2. 4. Eolienne à axe vertical (Structure de Darrieus) [29].

- **Rotor H-type**

D'autre type de rotor vertical est connu sous l'appellation de rotor en « H » ou le rotor de Musgrove, dont les lames prennent une forme de « H » (figure 2.5). Ce type de rotor peut démarrer seul, produite de l'énergie dès les très faibles vents (1m/s), ne nécessite pas de régulation mécanique et résiste à des vents violents. Ont ainsi été développés en utilisant des pales droites, offrant une plus grande surface utile, car formant en rotation un cylindre.

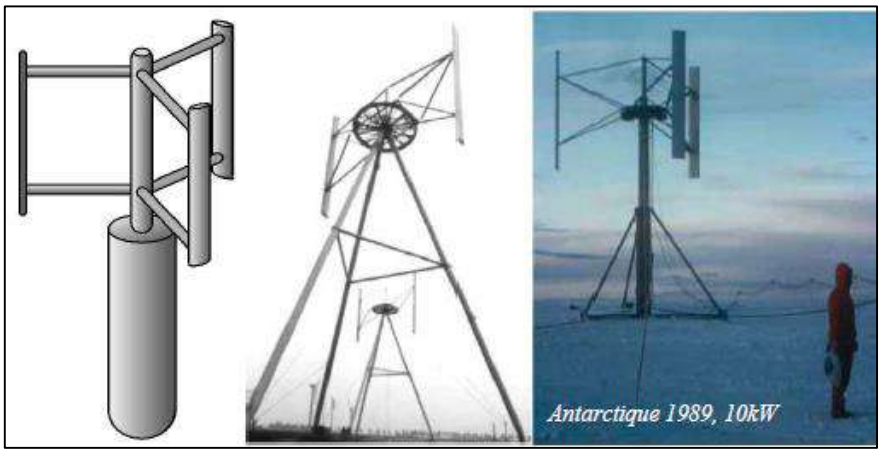


Figure 2. 5. Eolienne de Darrieus de type H [77].

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants [45]:

- Coût d'installation réduit.
- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- Maintenance des équipements plus aisée.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelle que soit sa direction.

Cependant, les éoliennes à axe vertical possèdent tout de même quelques inconvénients, soient:

- Le faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- L'occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Doit démarrer en mode moteur.
- La haute variation du couple mécanique et des forces sur les éléments des pales.
- Options limitées pour le contrôle de la vitesse ou de la puissance.

2.2.2.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont composées principalement d'une tour au sommet de laquelle une nacelle est installée. Cette nacelle supporte le rotor de la turbine - moyeu et pales – et comporte le système d'entraînement ainsi que la génératrice. L'axe de rotation du rotor de la turbine est donc horizontal.

Les turbines à axe horizontal (figure 2.6) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisqu'elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Ce type de turbine présente une efficacité de conversion d'énergie environ deux fois plus élevée que les éoliennes à axe vertical. Par ailleurs, les éoliennes à axe vertical présentent des phénomènes de fatigue causés par la haute variation du couple mécanique ; ceci en réduit sa robustesse et sa durée de vie. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [32]. Le choix du nombre de pales est reposé sur différents facteurs dont le coût, la performance, les charges mécaniques en présence, l'impact sur l'entraînement mécanique et son coût, le bruit et l'apparence visuelle du rotor. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées en face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.



-Moulin américain -Éoliennes : trois pales -Éoliennes : deux pales -Éolienne : une pale

Figure 2. 6. Eoliennes à axe horizontal [44].

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont les suivants:

- Efficacité de conversion d'énergie élevée.
- Auto-démarrage possible.
- Rotor positionné en hauteur donnant accès à des vents élevés.

Les éoliennes à axe horizontal possèdent tout de même quelques inconvénients, soient:

- Coût d'installation élevé.
- Nécessitent une tour robuste.
- Nécessitent de longs câbles électriques.

2.3 Configuration des éoliennes

La configuration des éoliennes détermine leur capacité de régulation en vitesse et en puissance. La nature de leur partie électrique et de leur connexion au réseau définit si l'éolienne est à vitesse fixe ou à vitesse variable. Quant au rotor, sa nature détermine la méthode de régulation de la puissance, soit le décrochage aérodynamique passif, le décrochage aérodynamique actif et le calage variable des pales. La section suivante présente les configurations d'éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable les plus couramment utilisées [78].

2.3.1 Éoliennes à vitesse fixe

Appelées en anglais (FSWT : Fixed Speed Wind Turbine), elles constituent les premières éoliennes qui ont été conçues. Elles se caractérisent par le fait que le rotor de l'éolienne tourne toujours à la même vitesse angulaire quelle que soit la vitesse du vent, la vitesse angulaire dépend essentiellement du profil des pales et de la fréquence du réseau dans le cas d'une éolienne à vitesse fixe raccordée au réseau électrique.

Depuis le début des années 1970, soit lors de l'arrivée de la machine asynchrone dans le domaine de l'éolien, la presque totalité des turbines éoliennes à vitesse fixe utilise la machine asynchrone à cage [79].

Les aérogénérateurs à vitesse fixe sont employés principalement dans le cas des faibles puissances (inférieures à 1MW). Ils sont connus par leur robustesse et la facilité de leur maintenance. Cependant, la puissance extraite n'est pas optimisée car la vitesse du rotor de la génératrice est fixe. Par ailleurs, le coût de maintenance est élevé à cause des couts de réparation du multiplicateur de vitesse et la puissance réactive n'est pas contrôlée, elle est seulement compensée. Aussi, le raccordement direct de la génératrice au réseau via le stator, augmente l'influence de celui-ci sur tout le système lors de la présence des défauts [80].

Dans le figure (2.7), le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone (Seules les génératrices asynchrones sont utilisées

dans ce cas). Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée [81].

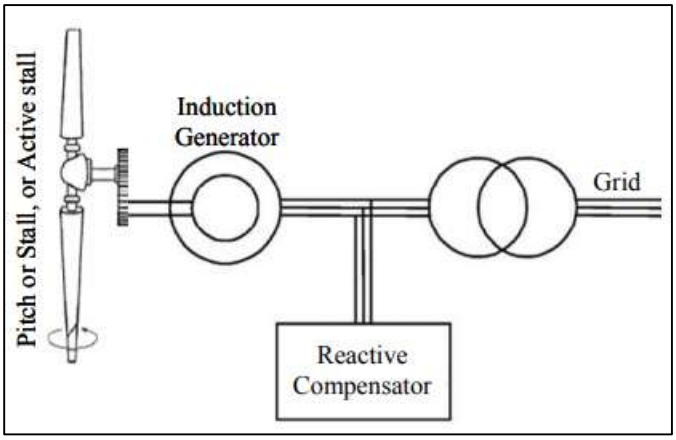


Figure 2. 7. Éolienne à vitesse fixe [81].

A- Les avantages de l'éolienne à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce type d'éoliennes sont [78]:

- C'est une technologie simple, robuste et éprouvée.
- Absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- C'est une solution économique.
- Demande peu de maintenance (MAS à cage).
- Une grande fiabilité.
- Un faible coût.

B- Les inconvénients de l'éolienne à vitesse fixe

Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [78]:

- Une puissance extraite non optimisée (on rate les maximas théoriques).
- Génère du stress sur les composantes mécaniques.
- Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.
- Une nécessité de maintenance périodique de la boite de vitesse.
- La perte du contrôle de la puissance réactive.
- L'absence de contrôle du système de magnétisation de la génératrice.

2.3.2 Éoliennes à vitesse variable

Appelées en anglais (VSWT : Variable Speed Wind Turbine), Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. Les éoliennes à vitesse variable sont initialement conçues afin d'augmenter l'efficacité de la conversion énergétique en adaptant la vitesse de la turbine à la vitesse du vent. De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable pour les éoliennes sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien [82, 32], où le surcoût entraîné par la vitesse variable du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire est compensé par le surplus de production.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Ce fonctionnement à vitesse variable est devenu possible grâce au développement des convertisseurs statiques et de leurs dispositifs de commande. Ces convertisseurs présentent donc un coût d'installation plus élevé mais le fait de convertir plus d'énergie leur permet de produire à des coûts inférieurs. L'avantage principal d'utiliser la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15% plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe [83].

Pour ce faire, l'utilisation de l'électronique de puissance est essentielle. En fait, les convertisseurs de puissance habituellement utilisés sont des convertisseurs de source de tension (VSC - Voltage Sourced Converters) composés de transistors de type IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistors) [79, 84]. Ces convertisseurs admettent des flux de puissance bidirectionnels, permettent de réguler indépendamment la puissance active et réactive et de produire peu d'harmoniques. Ce type de convertisseur de puissance est en croissance pour de nombreuses applications, en particulier pour l'intégration de ressources distribuées [85, 86]. On peut classer les éoliennes à vitesse variable à l'intérieur de deux catégories, soit les éoliennes avec convertisseur pleine puissance ou les éoliennes avec convertisseur de puissance partiel.

La configuration la plus simple est celle présentant des éoliennes à vitesse variable avec convertisseur pleine puissance. Le principe est de découpler le stator de la génératrice électrique de la fréquence du réseau via le convertisseur de puissance. De cette façon, l'ensemble de la puissance électrique produite par la génératrice passe par le convertisseur de puissance. Typiquement, ce convertisseur de puissance est composé de deux convertisseurs dos à dos reliés par un lien à courant continu (2.8). L'un est appelé le convertisseur de puissance côté génératrice (redresseur) et l'autre le convertisseur de puissance côté réseau (onduleur).

Les génératrices utilisées pour ce type de configuration sont:

a. Machine asynchrone à cage

Dans ce type de machine, le rotor est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse (figure 2.8). Étant donné que la fréquence électrique de la machine est indépendante de la fréquence du réseau, la boîte de vitesse peut être réduite comparativement à une MAS utilisée à vitesse fixe ou une MASDA utilisée à vitesse variable. Ceci réduit les pertes mécaniques et les coûts d'achat de la boîte de vitesse. Cette configuration est utilisée chez Siemens.

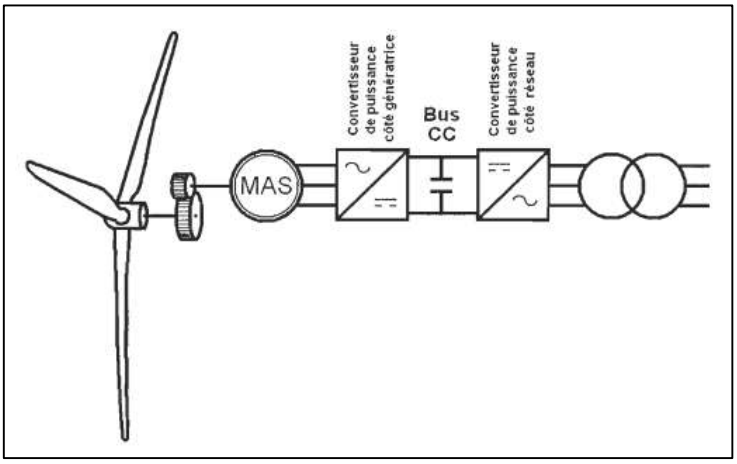


Figure 2. 8. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à cage et un convertisseur pleine puissance [78].

b. Machine synchrone avec ou sans un nombre élevé de pôles

Dans cette configuration, le rotor de la machine est directement couplé au rotor de la turbine (figure 2.9). C'est ce qu'on appelle une transmission à attaque directe. La génératrice peut posséder un circuit d'excitation externe ou être auto-excitée. Ce type de turbine est offert chez Enercon. Pour ce qui est des machines synchrones conventionnelles (figure 2.10), elles doivent être composées d'une boîte de vitesse entre le rotor de la machine et le rotor de la turbine.

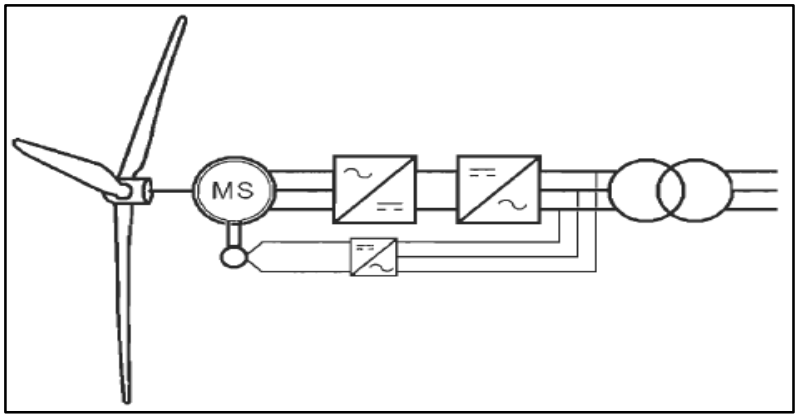


Figure 2. 9. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à nombre élevé de pôles et un convertisseur pleine puissance [78].

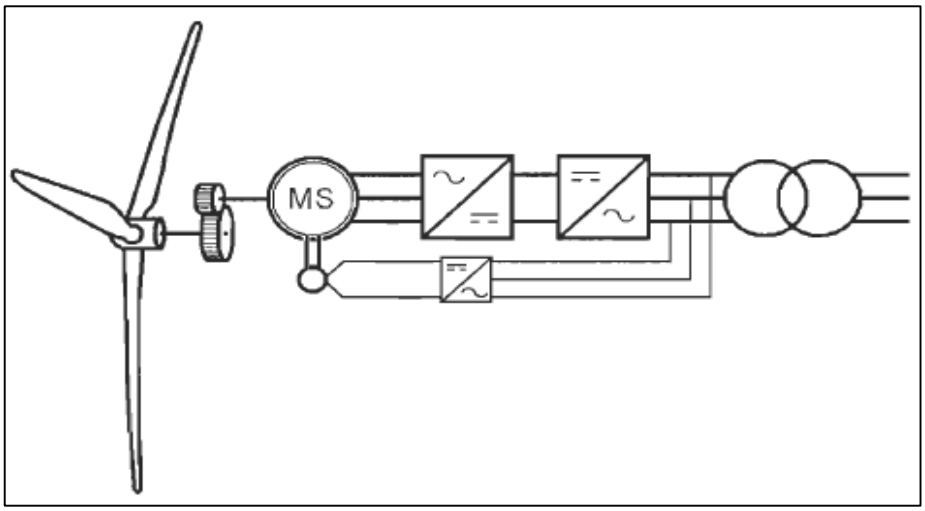


Figure 2. 10. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone et un convertisseur pleine puissance [78].

c. Machine synchrone à aimant permanent avec nombre élevé de pôles

Dans cette machine, le rotor est couplé au rotor de l'éolienne via une boîte de vitesse ou non (figure 2.11). Ceci dépend du nombre de paires de pôles de la machine. Par contre, le circuit d'excitation de la machine n'est plus nécessaire à cause de la magnétisation permanente de la génératrice. Cette technologie est présente chez GE et Siemens.

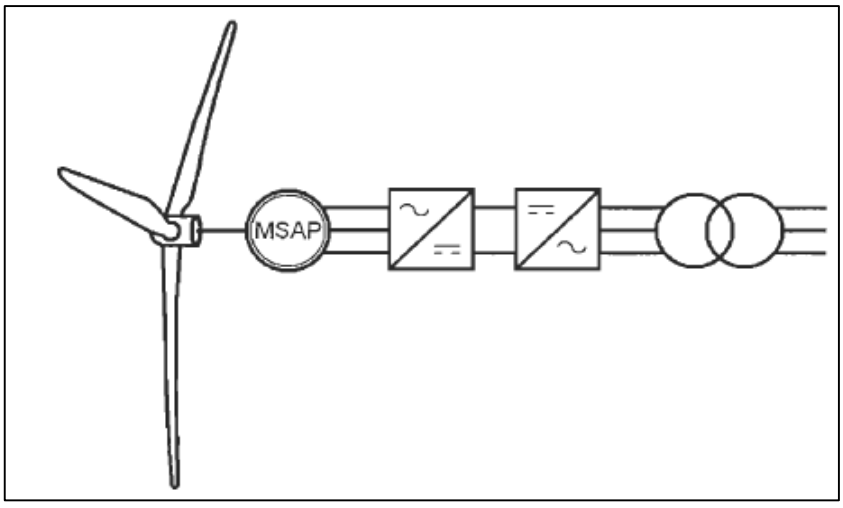


Figure 2. 11. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents et un convertisseur pleine puissance [78, 87].

Les éoliennes à vitesse variable avec convertisseur de puissance partiel sont composées de génératrices asynchrones à double alimentation (GADA ou Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)). Cette technologie a vu le jour dans le domaine de l'éolien au début des années 1990 avec la compagnie Vestas Wind Systems. Elle est maintenant la technologie la plus répandue pour les éoliennes de grande puissance [79]. Le principe est de jouer sur le glissement de la

génératrice en injectant ou en retirant de la puissance active. Ceci permet d'avoir une vitesse variable autour de la vitesse de synchronisme de la génératrice. Pour ce faire, le stator de la machine est connecté directement au réseau tandis que le rotor est connecté via un convertisseur de puissance au réseau (figure 2.12). Une boîte de vitesse sert de couplage entre la vitesse du rotor de la turbine et le rotor de la machine asynchrone. Cette configuration est utilisée principalement chez Vestas Wind Systems, GE, Gamesa, RePower et Nordex [79].

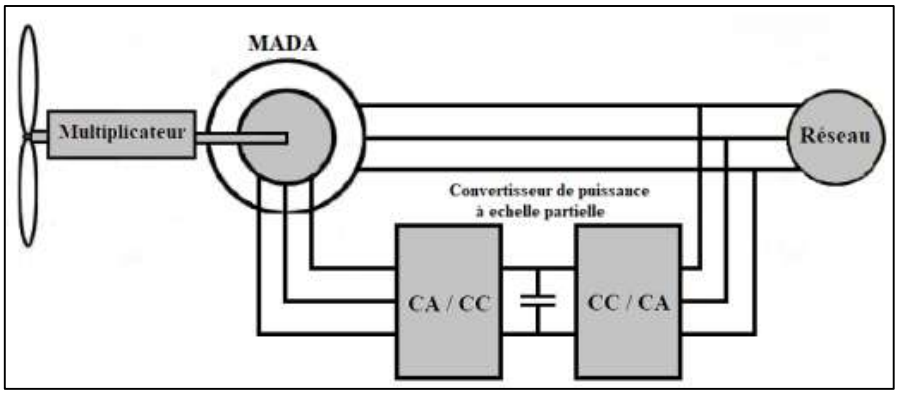


Figure 2. 12. Éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation [78, 88].

a- Avantages de l'éolienne à vitesse variable

Ce système possède beaucoup d'avantages lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [78]:

- Réduit le stress sur les composantes mécaniques de l'éolienne.
- Permet de maximiser l'efficacité aérodynamique pour une grande plage de vitesses de vent.
- Permet le lissage de la puissance de sortie de la turbine.
- Permet le contrôle de la tension et de la fréquence sur le réseau (contrôle du flux de puissance).
- Permet l'utilisation d'une boite de vitesse réduite (ou absente) produisant moins de pertes par frottement (pleine vitesse variable seulement).
- Une exploitation optimale de l'énergie du vent.
- Une limitation des oscillations mécaniques.
- Une possibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.

b- Inconvénients de l'éolienne à vitesse variable

Les principaux inconvénients de ce type d'éoliennes sont [78]:

- Nécessite un contrôle complexe.
- Les convertisseurs de puissances sont dispendieux et engendrent des pertes de puissance électrique.

2.4 Topologies et développement des génératrices des turbines éoliennes

Depuis les années 1980, la technologie des éoliennes a débuté par des dizaines de kW et maintenant elle a connu une évolution importante dépasse les 10 MW. Cette évolution mène à une variation de prix et un choix multiple pour des différents types des générateurs.

Les types de générateurs électriques utilisés dans le domaine de l'énergie éolienne sont différents, à savoir les machines synchrones, les machines asynchrones et les machines à courant continu. Ceux-ci sont utilisés pour convertir l'énergie mécanique tournante en énergie électrique et peuvent être connectés directement au réseau ou via un convertisseur de puissance.

2.4.1 Génératrices synchrones

Les génératrices synchrones sont largement utilisées dans des différentes centrales de conversion et production de la puissance électrique. Elles ont la capacité de contrôler facilement leur tension de sortie et leur puissance réactive. Ce type de génératrice est également préférable aux machines à induction en raison de leur plus grande efficacité, particulièrement aux grandes puissances [89]. Généralement, l'inducteur est le rotor tandis que le stator est celui de l'induit. Ces génératrices synchrones ont la capacité de tourner à des vitesses variables allant de 0 à 100% de la vitesse nominale.

Selon le type de champ d'excitation, les génératrices synchrones sont principalement divisées en deux types de machines synchrones dans l'énergie éolienne : la génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB ou WRSG) et la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP ou PMSG).

A. Génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB ou WRSG)

Contiens des nombres élevés de pôles et le rotor tourne à des vitesses faibles. Elle nécessite d'installer le circuit d'excitation et cela va réduire l'efficacité, augmenter les coûts de fabrication et d'exploitation et rendra également la modélisation et leur étude très compliquée. Deux types de circuits d'excitation sont utilisés :

- Le circuit d'excitation avec convertisseurs statiques (convertisseur d'addition) ;
- Le circuit d'excitation de la machine synchrone inversée (élimine les bagues/brosses).

Les génératrices synchrones à rotor bobiné (GSRBs) utilisées dans les systèmes de conversion éolien ont différents types de configuration (SCEEs). La figure (2.13.a) présente un SCEE à base de GSRB à vitesse fixe couplée à la turbine éolienne via une boite de vitesse. En raison de fonctionnement à vitesse fixe, il n'y a pas d'option de MPPT.

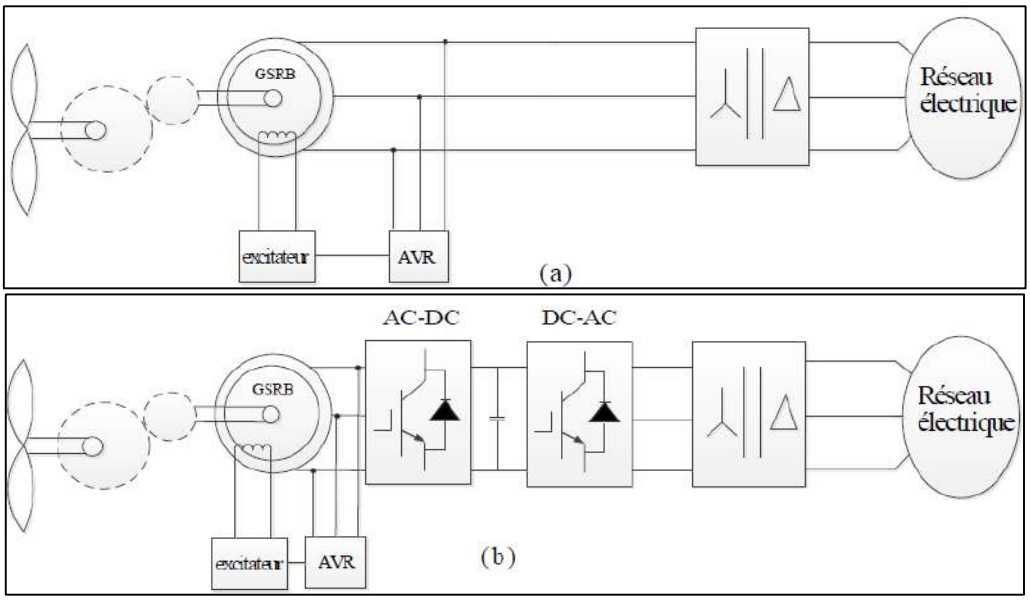


Figure 2. 13. Configuration des SCEEs à base de la GSRB [90].

Une autre configuration de SCEE à base de la GSRB est montrée dans la figure (2.13.b). Elle permette de montrer le fonctionnement de la turbine éolienne à vitesse variable où les enroulements statoriques de la génératrice sont connectés au réseau électrique à travers un système de conversion de puissance AC/DC/AC à grande échelle [91]. Ce type de configuration de SCEE peut être à entrainement direct ou connecté via une boite de vitesse.

B. Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP ou PMSG)

Dans ces dernières années, ces machines deviennent une solution très intéressante pour les applications des éoliennes de petite et grande puissance. Il est important d'utiliser un nombre de paires de pôles élevé pour éviter la boîte de vitesse afin de réduire les pertes mécaniques [92]. De plus, l'inconvénient de cette machine est la variation des caractéristiques magnétiques du rotor et le coût très élevé des aimants. Les différentes topologies de PMSG sont présentées dans la figure (2.14).

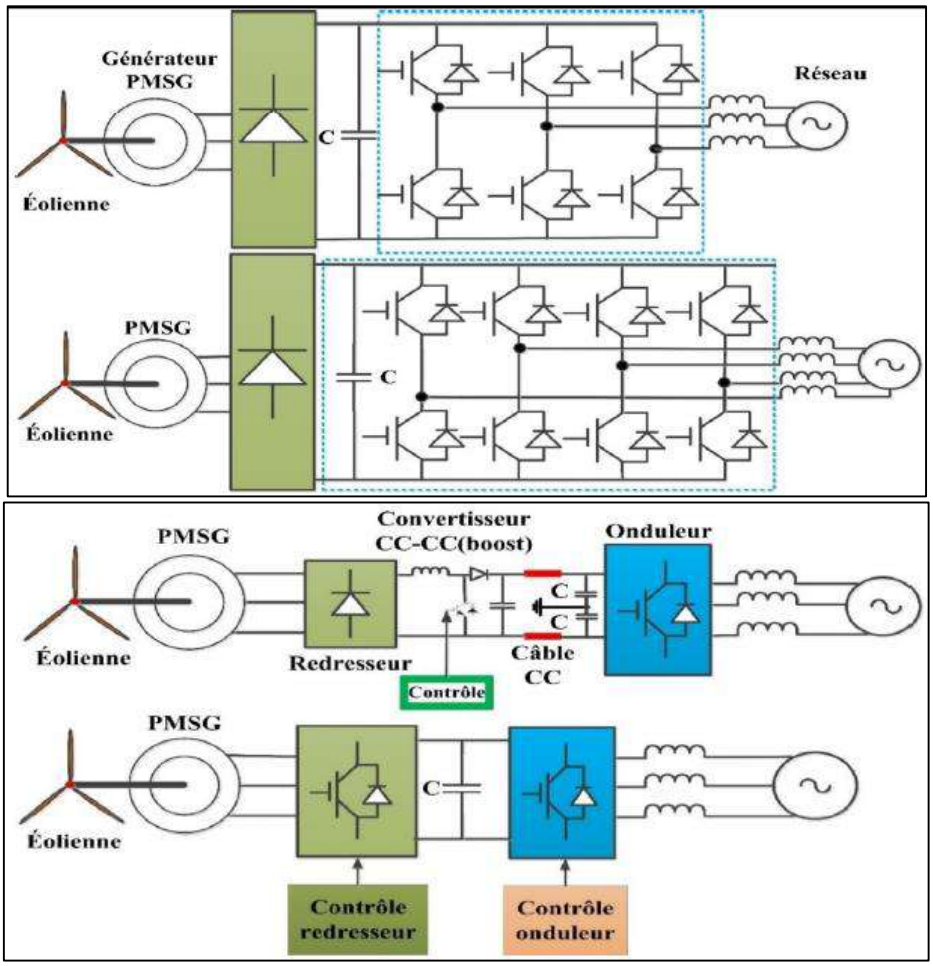


Figure 2. 14. Configuration des SCEEs à base de la PMSG [93].

2.4.2 Génératrices asynchrones

Les génératrices asynchrones appelées aussi les génératrices à induction, sont souvent utilisées dans les applications des systèmes éoliens [94]. Ces machines représentent une technologie de choix pour les génératrices éoliennes puisqu'elles sont de construction robuste et peu coûteuse, nécessitent peu de maintenance et se synchronisent facilement lorsqu'elles sont connectées directement au réseau. De plus, le glissement au rotor permet d'absorber des changements brusques de couple suite à des turbulences importantes du vent. C'est pour ces raisons qu'elles représentent 85% du marché en énergie éolienne.

La génératrice asynchrone doit être alimentée en courant pour créer le champ magnétique. Cependant, il est possible de faire fonctionner un générateur asynchrone dans un système autonome s'il a été branché aux condensateurs qui fournissent le courant nécessaire à l'aimantation. Sinon, il faut joindre une batterie ou d'un petit générateur diesel pour démarrer le système [93].

Il existe différents types des génératrices asynchrones couramment utilisés dans les systèmes éoliens et principalement divisés en trois types de machines asynchrones. Les

génératrices asynchrones les plus utilisées et connues sont : la génératrice à induction à cage d ’écureuil (GIAC ou SCIG), la génératrice asynchrone à rotor bobiné (GARB ou WRIG) et la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA ou DFIG).

A. Génératrice à induction à cage d’écureuil (SCIG)

Les machines asynchrones à cage sont également appelées les machines à induction (induction machine). La cage d'écureuil fait référence à la forme que possède le rotor. Ce nom provient du fait que ces machines n'ont pas de circuit d'inducteur. Dans la configuration d’une éolienne à base de SCIG, le stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau via un transformateur. De plus, cette configuration couple le rotor de l'éolienne au rotor de la machine asynchrone via une boîte de vitesse. Cette dernière, jumelée à un nombre de paires de pôles de la génératrice électrique, permet de déterminer une vitesse fixe d'opération. Cette configuration est utilisée principalement chez Vestas Wind Systems, Siemens et Nordex [79].

La figure (2.15) présente la génératrice qui fonctionne à une plage de vitesse faible qui peut s’adapter en utilisant une boîte à vitesse entre la turbine et la génératrice pour fournir la puissance nominale.

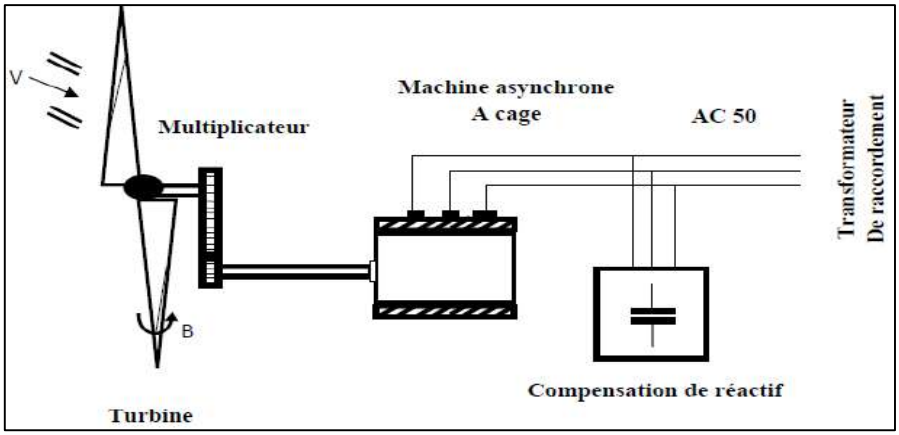


Figure 2. 15. Schéma d’éolienne à base de SCIG connecté au réseau [95].

B. Génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

GADA est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau par contre à les enroulements du rotor sont connectés au réseau par l’intermédiaire des convertisseurs de puissance bidirectionnels composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau), (figure 2.16). La génératrice asynchrone à double alimentation permet un fonctionnement à vitesse variable en ajustant la vitesse du rotor du générateur en fonction de celle du vent. Le facteur de la puissance peut atteindre 30% de la puissance nominale [93].

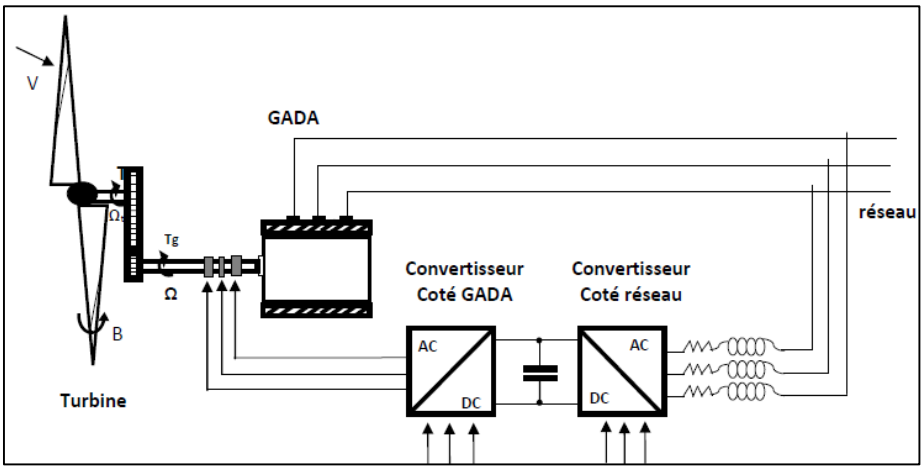


Figure 2. 16. Schéma d'éolienne à base de GADA connecté au réseau [95].

2.4.3 Machines à courant continu

Ce type de machine est peu utilisé dans les systèmes éoliens. Le stator de ces machines utilise une source à courant continu pour créer un champ magnétique constant à travers le rotor. Ce champ peut également être créé à l'aide d'aimants permanents. Contrairement aux machines à courant alternatif, le stator joue le rôle de l'inducteur. En mode génératrice, le rotor produit de la puissance avec un courant redressé et est connecté à la charge via un système collecteur-balais. Ces machines sont généralement coûteuses et leur maintenance est dispendieuse. Elles sont principalement utilisées afin de charger des batteries ou lors d'applications de chauffage. Par contre, il est plus commun d'utiliser une machine synchrone à aimant permanent avec un redresseur simple pour effectuer le même travail.

2.5 Fermes éoliennes

Le regroupement d'un ensemble d'éoliennes à vitesse variable ou à vitesse fixe constitue une ferme éolienne. Il existe deux architectures différentes pour connecter les éoliennes au réseau électrique. La première consiste à les connecter au réseau au moyen des liaisons en tensions alternatives à travers un transformateur (figure 2.17).

La seconde architecture repose sur la connexion des éoliennes entre elles via une liaison en tension continue dont le bus continu est dimensionné pour la tension nominale de la génératrice (figure 2.18). Ensuite un seul convertisseur continu-alternatif, permet de relier l'ensemble des éoliennes au réseau électrique. Cette architecture, envisagée particulièrement pour les fermes éoliennes off-shore, permet une meilleure participation de la ferme éolienne au réglage de la tension au point de raccordement [96, 97].

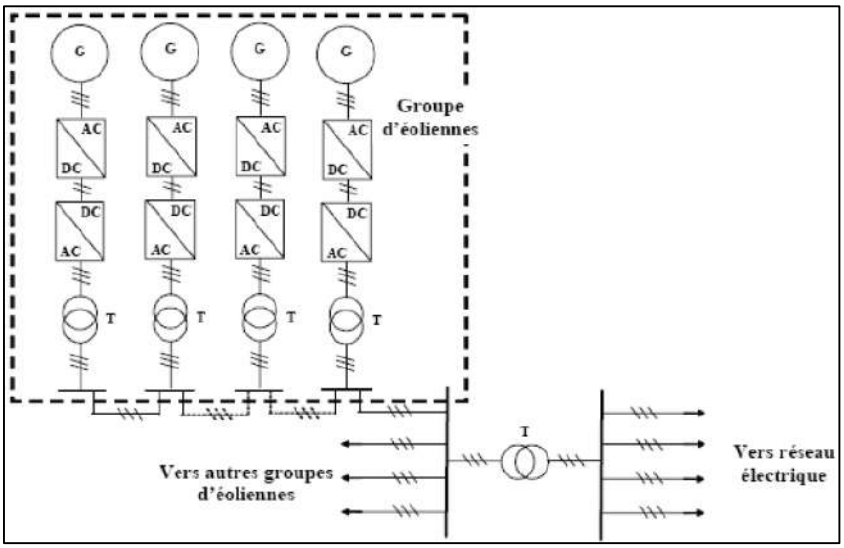


Figure 2. 17. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions alternatives [96].

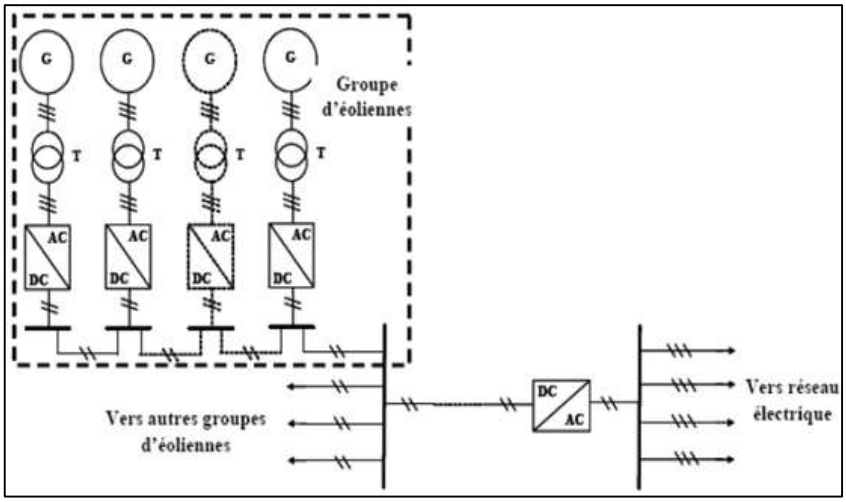


Figure 2. 18. Architecture d'une ferme d'éoliennes à vitesse variable avec des liaisons en tensions continues [96].

Le taux de pénétration des fermes éoliennes devient de plus en plus significatif dans les réseaux. La puissance produite par ces fermes définit le réseau auquel elles vont être connectées. En effet, le raccordement de la ferme au réseau publique de transport s'effectue alors à un niveau de tension supérieur ou égal à 63kV (domaine de la HTB), si la puissance produite de la ferme est supérieure à 12MW. Dans le cas contraire, si la puissance produite de la ferme est inférieure ou égale à 12MW, le raccordement s'effectue alors à un niveau de tension inférieur ou égal à 20kV (domaine de la HTA et de la BT) [98].

Pour les deux types de raccordement, plusieurs problèmes liés à l'instabilité de réseau mènent les fermes éoliennes à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique à cause de [45]:

- La difficulté de prévision de la production de puissance à cause de son profil aléatoire.
- L'absence de réglage des puissances active et réactive.
- L'absence de réglage (puissance active-fréquence).
- L'absence de réglage (puissance réactive-tension).
- La sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence pour certaines technologies.
- La sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent.

En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.

En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent :

- Les réglages primaire et secondaire de la tension;
- Les réglages primaire et secondaire de la fréquence;
- Le fonctionnement en réseau séparé;
- Le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

2.6 Aperçu général des travaux antérieurs sur le développement de la technologie des éoliennes

Parmi les recherches qui ont été menées au cours de la dernière décennie, il y a l'examen d'une éolienne augmentée par diffuseur (DAWT) étudiée par Gilbert et al. [12], Gilbert et al. [99], Igra [100] et d'autres vers 1980. Dans ces études, il y avait une étude sur l'énergie éolienne dans un diffuseur à grand angle ouvert contrôlé. Sur la base de cette idée, Bet et al [101] ont proposé une éolienne carénée avec une structure annulaire à profil d'aile. Le résultat a indiqué que l'utilisation du DAWT pourrait augmenter la puissance de sortie du système d'aile d'un facteur de 2,0, par rapport à l'éolienne nue. Un nouveau système d'éolienne a été développé par En outre, Yuji Ohya et al. [13], qui se compose d'un carénage diffuseur avec un large bord annulaire à la périphérie de sortie et une éolienne à l'intérieur. Le résultat a montré que l'éolienne enveloppée avec un diffuseur à rebords a une augmentation de puissance d'un facteur d'environ 2 à 5 par rapport à une éolienne nue. Parmi toutes les conceptions d'éoliennes à vitesse variable, deux technologies commerciales de pointe sont introduites à grande échelle ; générateur synchrone SG et GADA basé sur éolienne. En effet, la technologie GADA a dépassé les autres en raison de son coût, de sa robustesse, de sa fiabilité et des exigences de petits convertisseurs de puissance

[5, 11, 14]. Un générateur à induction à double alimentation (GADA) est une machine électrique asynchrone triphasée avec des enroulements à rotor ouvert pouvant être alimentés par des tensions externes [102, 103]. Le générateur à induction à double alimentation (GADA) est largement utilisé pour la production d'électricité dans les parcs éoliens en raison de son rendement élevé, de sa qualité d'énergie et de sa capacité à contrôler la puissance fournie au réseau [104]. De nombreux modèles d'éoliennes avec GADA ont été proposé ces dernières années. Un modèle de troisième ordre adapté à l'analyse de stabilité transitoire a été présenté par Y. Lei et al. [105]. De plus, F. Mei et al.[106] ont proposé un modèle dynamique détaillé de GADA et ont analysé la stabilité des petits signaux.

Dans les technologies de contrôle non linéaire, une tentative a été suggérée pour améliorer l'efficacité et les performances de la technologie des génératrices GADA. M. Loucif et al.[107] ont examiné un schéma de contrôle de la puissance réelle et réactive basé sur le contrôle en mode glissant pour les convertisseurs côté rotor et côté réseau électrique. D'après ces travaux, la technologie de commande par mode glissant (SMC) est très robuste face à l'incertitude des paramètres du système ainsi qu'aux perturbations externes mais son application s'accompagne du phénomène de broutage qui représente le défaut majeur inhérent à la commande par mode glissant. Par ailleurs, A. Bektache et al. [108] ont conçu un contrôleur prédictif non linéaire pour un système éolien à vitesse variable basé sur GADA, qui vise à optimiser l'extraction de l'énergie éolienne et à réduire les charges temporaires. Les chercheurs ont utilisé la technologie de contrôle de backstep non linéaire pour atteindre différents objectifs de contrôle pour les systèmes d'énergie éolienne à vitesse variable basés sur GADA.

La génératrice d'une éolienne est chargée de créer l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique. Ainsi, la génératrice est le composant le plus important de la turbine et peut facilement tomber en panne avant d'atteindre la durée de vie prévue. Plusieurs raisons peuvent entraîner la défaillance de la génératrice. Parmi ceux-ci, la charge du vent, les conditions météorologiques extrêmes et le cycle thermique. De plus, les irrégularités de tension, les vibrations excessives et les défaillances du système de refroidissement peuvent entraîner une chaleur excessive et un incendie. Malheureusement, la fabrication, la puissance réduite, l'installation incorrecte, la survitesse, la surcharge, le bruit, la contamination du lubrifiant, les vibrations et une isolation électrique inadéquate peuvent également entraîner la défaillance du générateur [109, 110].

Les génératrices des éoliennes peuvent avoir des problèmes et des défaillances dues à des pannes internes ou externes [102, 103]. Les défaillances externes surviennent par exemple en raison des courts circuits dans le réseau qui entraineront les surchauffes des générateurs, tandis que les défaillances internes sont habituellement en raison de la mauvaise isolation ou des

défaillances mécaniques telles que les roulements ou les composants. Ces défaillances engendrent un comportement chaotique à ces génératrices.

On considère que l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA) ou (FMECA) est une technique d'analyse qui facilite l'identification des problèmes potentiels dans la conception du processeur en testant les effets des défaillances de niveau inférieur. Il existe diverses études dans la littérature qui ont utilisé FMEA et FMECA aux éoliennes. Samet Ozturk et al. [110] ont proposé une méthodologie afin d'augmenter la précision des prévisions de fiabilité et de disponibilité et de comparer différents types de conception d'éoliennes et d'éliminer la sous-estimation des impacts de différentes conditions météorologiques en appliquant les modes de défaillance (FMECA). Pérez et autres. [111] ont comparé les taux de défaillance et les valeurs de défaillance en fonction de différents types et aspects d'éoliennes, indiquant que les éoliennes à engrenages ont des taux de défaillance plus faibles que les éoliennes à entraînement direct dans les composants électriques et électroniques où les défaillances de la boîte de vitesses provoquent le plus de défaillances. Il était donc nécessaire de déterminer la criticité de ces deux différents types d'éoliennes. Les impacts des conditions météorologiques sur les pannes d'éoliennes ont été étudiés par Reder et al. [112]. Il a été conclu que l'hiver est la saison au cours de laquelle les fréquences de pannes sont plus fréquentes et la vitesse du vent n'a eu aucun impact sur les occurrences de pannes. Répondre ainsi aux exigences de résistance aux pannes, est devenu un problème qui intéresse particulièrement les fabricants d'éoliennes d'une part et les propriétaires de parcs éoliens d'autre part.

2.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre un état de l’art sur les énergies éoliennes qu’on va utiliser dans notre étude, on a essayé de le présenter d’une façon générale, ainsi que les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. De plus, on a donné un aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique et les différentes génératrices utilisées dans les éoliennes récentes tout en mettant en valeur l’intérêt de l’utilisation de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA dans les aérogénérateurs et ses avantages justifiant le choix de cette génératrice GADA. Une synthèse des travaux qui ont été réalisés, va permettre de situer nos travaux par rapport à ceux qui ont été déjà faits

Vue l’importance de l’énergie éolienne on s’intéressera dans le chapitre suivant à la conception et la simulation d’un modèle pédagogique du système de conversion éolienne basé sur l'utilisation d'une seule génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) dans le but de réaliser une commande indépendante des puissances actives et réactives.

CHAPITRE 3 : ANALYSE, MODELISATION ET STRATEGIES DE COMMANDE D'UN SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE BASE SUR UNE SEULE GADA

3.1 Introduction

Actuellement, la plupart des systèmes de conversion d'énergie éolienne utilisent la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cela est dû à de nombreux avantages comme : un très bon rendement énergétique, une bonne robustesse ainsi qu'une facilité d'exploitation et de commande. En plus, elle permet de fonctionner sur une plage de vitesse de ±30% autour de la vitesse de synchronisme, garantissant ainsi un dimensionnement réduit des convertisseurs statiques. Grâce à ces avantages, cette machine a suscité beaucoup de curiosité de la part des chercheurs qui ont essayé de développer des stratégies pour exploiter au mieux ses points forts. Pour commander la génératrice asynchrone à double alimentation, comme bien d'autres procédés, il faut connaitre son modèle avec une connaissance plus ou moins précise des éléments le constituant. Mathématiquement, à partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation de commande, ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est utile de poser des conditions et des hypothèses pour la modélisation.

Dans ce chapitre, le modèle du système de conversion éolien basé sur l'utilisation d'une seule génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) sera présenté et modélisé dans le but de réaliser une commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques.

3.2 Modélisation globale de la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur une seule GADA

3.2.1 Description du système éolien

Les configurations les plus populaires des systèmes de conversion d'énergie éolienne (SCEE) utilisent la génératrice asynchrone à double alimentation GADA. Nous nous sommes intéressés dans cette partie d'étude sur l'analyse et la modélisation d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur une seule génératrice asynchrone à double alimentation GADA qui est constitué d'une éolienne d'une puissance nominale de 7.4 MW, avec un rayon des pales 78m et entraînant la génératrice asynchrone à double alimentation GADA à travers le multiplicateur comme illustré dans la figure (3.1). La production d'énergie éolienne dépend de l'interaction entre la pale, la vitesse et la masse du vent. La turbine éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit d'abord en couple mécanique qui fait tourner les pales du rotor, puis la génératrice GADA convertit la puissance mécanique en puissance électrique. Dans cette configuration, l'éolienne tourne à une vitesse de vent variable.

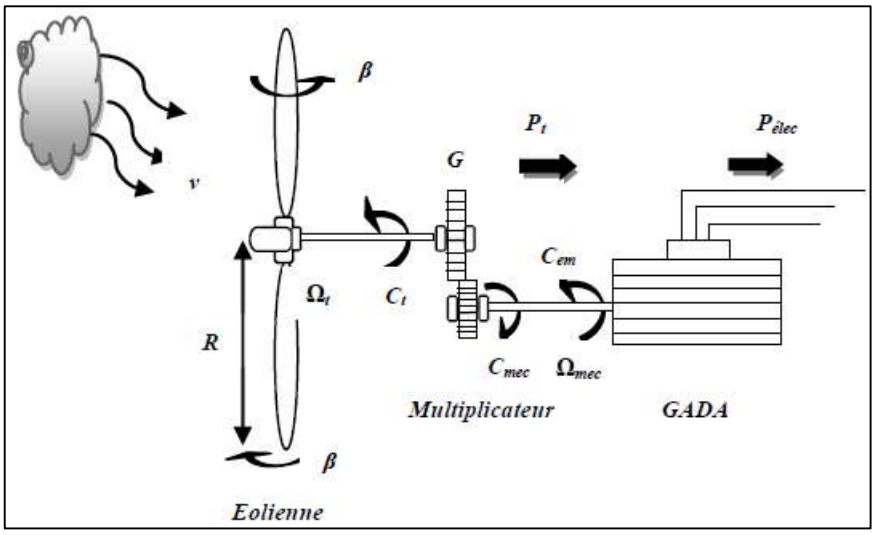


Figure 3. 1. Schéma de la chaine de conversion éolienne à base d'une seule GADA.

3.2.2 Modélisation de la turbine éolienne

La modélisation de la turbine (figure 3.2) consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaitre le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne.

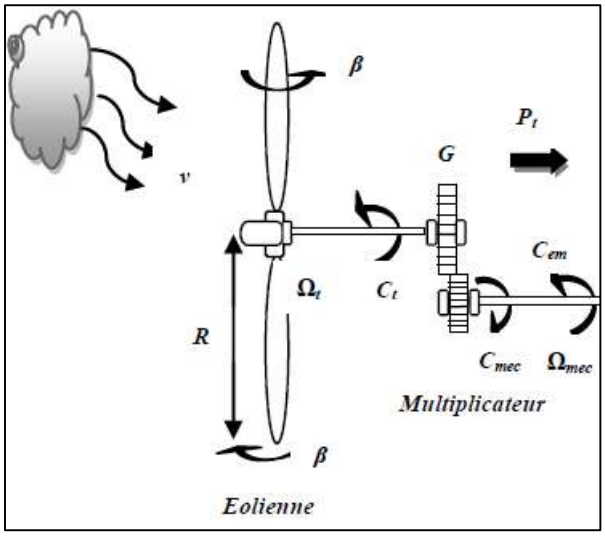


Figure 3. 2. Schéma de la turbine éolienne.

3.2.2.1 Partie aérodynamique (Vent)

Le vent ne peut pas être représenté par des expressions exclusivement déterministes. ce qui explique que la modélisation du vent n'est pas une chose aisée car les variations spatiales vont du centimètre au kilomètre et celles dans le temps de la seconde à des mois [81]. Par

conséquent, Il existe deux méthodes pour représenter le vent, la première basée sur des mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la deuxième basée sur l'utilisation d'une modélisation analytique à partir d'un modèle mathématique représentant le fonctionnement réel du système. Alors, la deuxième méthode serra adoptée en raison de sa flexibilité éprouvée.

Parmi les méthodes les plus utilisées pour modéliser le vent, celle qui utilise la caractéristique spectrale de Van Der Hoven [113, 114]. La vitesse de vent est peut-être modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [32, 44] par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés [26]. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [115]. Une composante moyenne à variation lente « V », qui représente le niveau de vitesse du vent [32, 44].

$$V = f(t) \tag{3.1}$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette étude, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme suivante [116]:

$$V = V_0 + \sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i + \varphi_i) \tag{3.2}$$

Avec

V_0 : est la composante moyenne (composante lente);

- V_0=6 m/s, pour un vent faible vitesse;
- V_0=12 m/s, pour un vent moyen vitesse;
- V_0=18 m/s, pour un vent fort vitesse.

$\sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i + \varphi_i)$: Les fluctuations (turbulences);

A_i, ω_i et φ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

Un exemple de profil de vent reconstruit à partir de la caractéristique spectrale de Van der Hoven [116] et il est à signaler que ce profil de vent sera exploité pour appliquer à la chaîne éolienne utilisé dans cette étude. L'équation est donnée par la relation suivante:

$$V(t) = 8 + 0.2\sin(0.1047.t) + 2\sin(0.2665.t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \tag{3.3}$$

Cette équation est modélisée sous MATLAB / SIMULINK par le schéma conventionnel comme montré dans la figure (3.3).

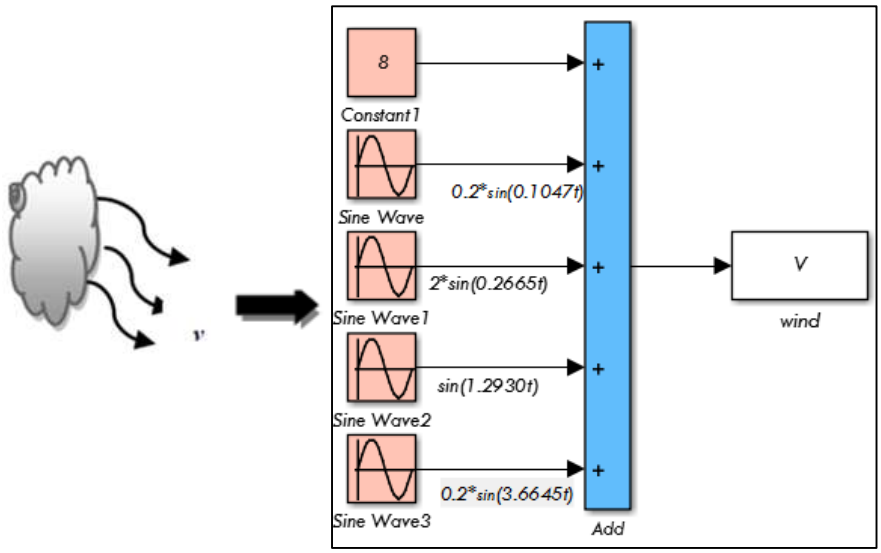


Figure 3. 3. Modèle de profil de vent utilisé sous Matlab/Simulink.

3.2.2.2 Modélisation de la turbine

La technologie de l'éolienne est utilisée pour convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par l'intermédiaire d'une éolienne. Le dispositif étudié dans cette partie de travail est la turbine. La turbine est un dispositif de conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique. En effet, si nous considérons une masse d'air, m, qui se déplace avec la vitesse du vent V , l'énergie cinétique de cette masse est donnée par [117]:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \tag{3.4}$$

La puissance disponible du vent traversant une surface A est définie par la formule suivante [68, 118, 119]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3 \tag{3.5}$$

Où

V : est la vitesse du vent (m/s);

ρ : est la masse volumique de l'air (approximativement 1.225kg/m^3 à pression atmosphérique et à température 15°C) [120];

A : est la surface circulaire.

La puissance de la turbine est donnée par la formule suivante [22, 68, 121]:

$$P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \tag{3.6}$$

D'où

R : est la longueur d'une pale ou le rayon de l'aérogénérateur (m);

C_p : est le coefficient de puissance ou de performance qui représente le rendement aérodynamique d'une éolienne. Il dépend des caractéristiques de la turbine. Le coefficient de puissance décrit l'efficacité dont laquelle une éolienne convertit l'énergie éolienne en électricité. Plusieurs approximations numériques ont été développées dans la littérature pour déterminer l'expression du coefficient C_p. Parmi ces approximations , on trouve [122, 123, 124]:

$$C_p(\lambda,\beta) = 0{,}5176\left(\left(\left(\frac{116}{\lambda_i}\right) - 0{,}4\beta - 5\right)e^{\left(\frac{21}{\lambda_i}\right)} + 0{,}0068\lambda\right) \tag{3.7}$$

Où λ_i est donné par:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0{,}08\beta} - \frac{0{,}035}{\beta^3 + 1} \tag{3.8}$$

λ : est la vitesse spécifique;

Ω_{tur} : est la vitesse angulaire mécanique de la turbine (rad/s);

R : est le rayon de la turbine (m);

V : est la vitesse du vent (m/s);

β : est l'angle d'orientation des pales.

La vitesse spécifique est définie comme étant le rapport entre la vitesse angulaire mécanique, le rayon de la turbine et la vitesse du vent comme suit [125]:

$$\lambda = \frac{\Omega_{tur} R}{V} \tag{3.9}$$

L'expression du couple aérodynamique est donnée par [126]:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}} = \frac{1}{2\Omega_{tur}} C_p(\lambda,\beta)\rho\pi R^2 V^3 \tag{3.10}$$

On définit C_c le coefficient du couple:

$$C_c(\lambda,\beta) = \frac{C_p(\lambda,\beta)}{\lambda} \tag{3.11}$$

3.2.2.3 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et la génératrice GADA pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice [127]. Dans cette partie de l'étude, nous nous sommes basés sur les hypothèses simplificatrices suivantes:

- ✓ Le multiplicateur est considéré comme rigide et a été présenté par un simple gain;
- ✓ L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés;
- ✓ Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles.

Le couple mécanique de l'arbre de la génératrice est le rapport entre le couple mécanique de la turbine éolienne et le coefficient de multiplicateur. De plus, la vitesse de rotation de la turbine est liée à la vitesse mécanique et le coefficient du multiplicateur et est donnée par la formule suivante:

$$\Omega_{mec} = G\Omega_{tur} \tag{3.12}$$

Où

G : est le gain du multiplicateur de vitesse;

Ω_{tur} : est la vitesse mécanique de la turbine;

Ω_{mec} : est la vitesse de rotation de la génératrice (tr/min).

Le couple sur l'axe lent est relié au couple sur l'axe rapide (côtés alternateur) par le gain du multiplicateur de vitesse [127]:

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \tag{3.13}$$

C_{mec} : est le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice (N.m);

C_{aer} : est le couple aérodynamique appliqué sur l'arbre de turbine (N.m).

3.2.2.4 Modélisation de l'arbre mécanique

L'arbre mécanique est composé d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice [22], comme il est présenté sur la figure (3.4).

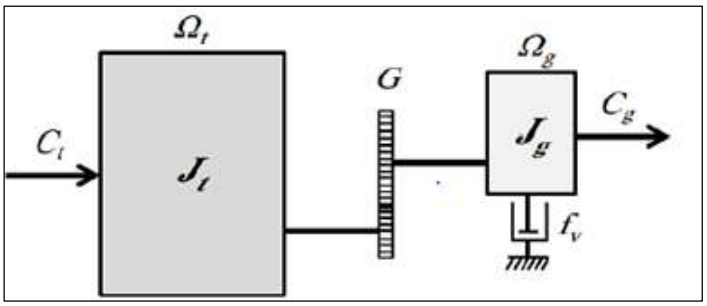


Figure 3. 4. Modèle mécanique de la turbine éolienne [22].

Avec :

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

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

f_v : est le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice GADA;

C_g : est le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice GADA;

Ω_g : est la vitesse de rotation de la génératrice GADA.

L'évolution de la vitesse mécanique dépend du couple appliqué au rotor de la génératrice qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice, d'un couple de frottement visqueux et d'un couple du multiplicateur de vitesse. L'équation dynamique est modélisée par la relation suivante [128]:

$$J_T \frac{d}{dt}\Omega_{méc} = \sum des\ couples = C_g - C_{em} - C_f = C_{méc} \tag{3.14}$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f_v [68].

$$C_f = f_v \Omega_{méc} \tag{3.15}$$

Avec

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

Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale est celle de la génératrice et l'inertie de la turbine ramenée au rotor de la génératrice [68]:

$$J_T = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_{génératrice} \tag{3.16}$$

J_{tur} : est le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des pales de l'éolienne;

$J_{génératrice}$: est le moment d'inertie de la génératrice.

La figure (3.5) montre que la turbine produire un couple aérodynamique à partir de la puissance cinétique du vent sous l'action de l'angle d'orientation des pales. Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique de la turbine en couple du multiplicateur et en même temps, il transforme la vitesse de la turbine en vitesse mécanique.

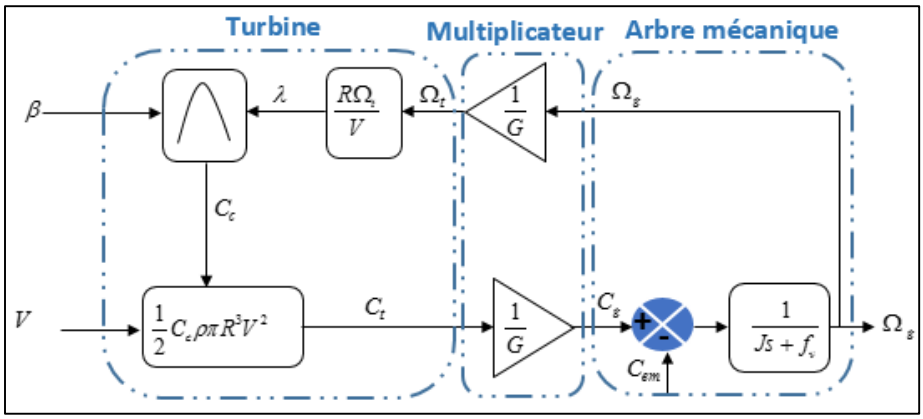


Figure 3. 5. Schéma conventionnel du modèle de la turbine.

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur auquel s'oppose le couple électromagnétique. Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.

3.2.3 Stratégie de commande de la turbine (maximisation de puissance MPPT)

Comme il est illustré dans la figure (3.6), on distingue quatre zones principales de fonctionnement des turbines à vitesse variable [68].

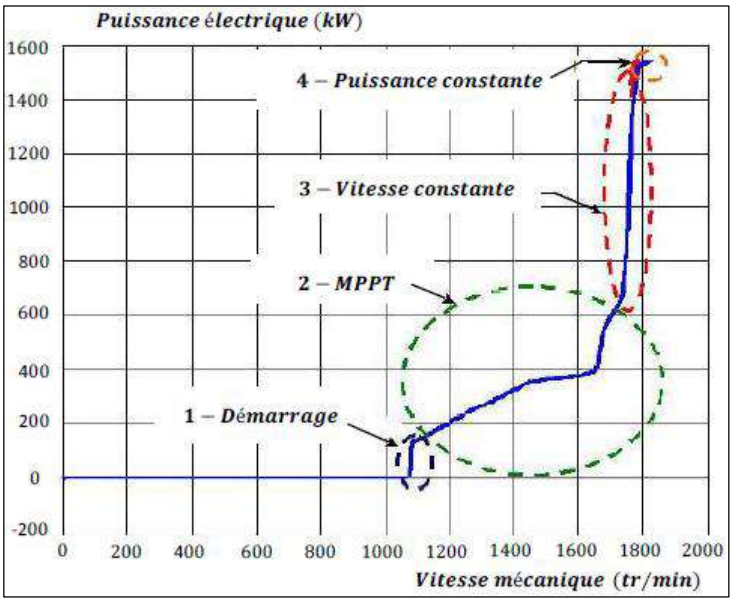


Figure 3. 6. Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable d'une éolienne de 1.5 MW [68].

- **La zone 1** : représente la zone de démarrage de la machine ou la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit pas d'énergie ($P_{turbine}$= 0).
- **La zone 2** : est la zone d'extraction de la puissance maximale "MPPT" dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V .
- **La zone 3** : est destinée à la limitation de la vitesse autour de la vitesse nominale ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance $P_{turbine}$ fournie reste sensiblement égale à P_n.
- **La zone 4** : à la limitation de la puissance dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie, lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aérogénérateur lorsque le vent devient trop important.

Puisque nous sommes intéressés au deuxième zone de fonctionnement, on va chercher l'extraction de la puissance maximale en temps réel en optimisant la conversion énergétique. L'angle d'inclinaison des pales étant fixe, et le couple électromagnétique de la génératrice est ajusté rotoriquement afin d'ajuster la vitesse de rotation et de rapprocher la vitesse spécifique de l'éolienne de sa valeur optimale et le coefficient de puissance C_p de sa valeur maximale [129]. Au moment actuel, les stratégies adoptées visent à extraire le maximum de puissance du vent. Cette puissance est extraite lorsque la turbine fonctionne au coefficient de puissance maximale. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation du vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance [45].

Dans notre travail, nous avons représenté deux stratégies visant à obtenir une maximisation de la puissance:

- Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse;
- Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

3.2.3.1 Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse mécanique

Cette première structure de stratégie de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse de rotation mécanique repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Donc, nous avons arrivé à l'équation suivante [130]:

$$J_T \frac{d}{dt}\Omega_{méc} = C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{3.17}$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($C_f = f_v \Omega_{méc} = 0$) par rapport au couple mécanique C_{em} on peut alors écrire:

$$C_g = C_{em} \tag{3.18}$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée $\widehat{\Omega}_{tur}$ est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la génératrice GADA:

$$\widehat{\Omega}_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{3.19}$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée $\widehat{V}$ est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse de rotation de la turbine:

$$\widehat{V} = \frac{R\widehat{\Omega}_{tur}}{\lambda_{opt}} \tag{3.20}$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par:

$$\hat{C}_t = \frac{1}{2} C_c^{\max} \rho \pi R^3 \hat{V}^2 \tag{3.21}$$

En remplaçant l'équation (3.20) dans l'équation (3.21), le couple de la turbine de référence s'exprime donc par:

$$\hat{C}_t^* = \frac{1}{2\lambda_{opt}^2} C_c^{\max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \tag{3.22}$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne:

$$\hat{C}_g^* = \frac{\hat{G}_t^*}{G} \tag{3.23}$$

Le schéma conventionnel de la figure (3.7) résume le principe de cette stratégie de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesse de rotation mécanique MPPT de la turbine éolienne.

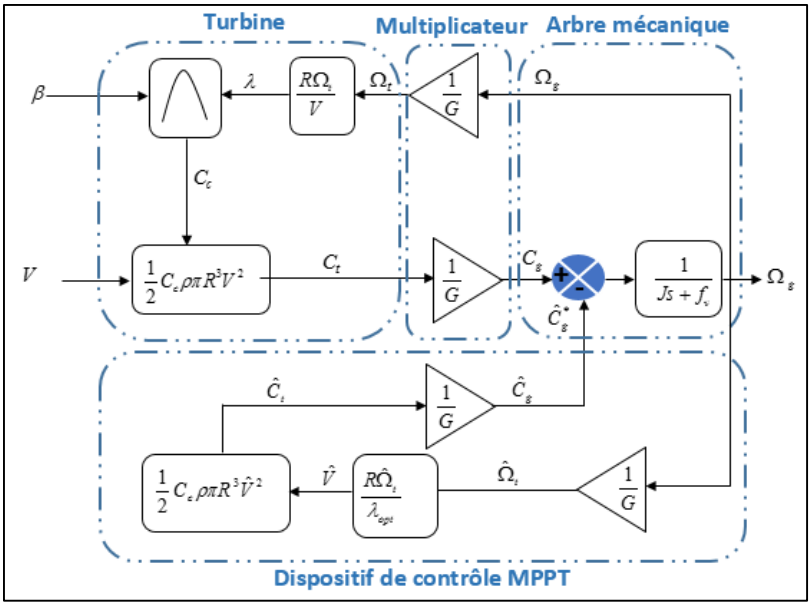


Figure 3. 7. Schéma conventionnel de la maximisation de puissance extraite sans asservissement de vitesse.

3.2.3.2 Stratégie de maximisation de puissance avec asservissement de vitesse mécanique

La deuxième structure de stratégie de maximisation de puissance extraite avec asservissement de vitesse de rotation mécanique repose sur l'hypothèse que les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance. Cette méthode de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la génératrice GADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la

génératrice GADA doit être effectué [22], comme la montre dans la figure (3.8). La vitesse de rotation de référence de la génératrice GADA Ω^*_{mec} est obtenue à partir de l'équation suivante:

$$\Omega^*_{mec} = G\Omega^*_{tur} \tag{3.24}$$

Avec

$$\Omega^*_{tur} = \frac{\lambda_{opt} \mathrm{V}}{\mathrm{R}} \tag{3.25}$$

Le couple électromagnétique de référence C_g^* permettant d'avoir une vitesse de rotation Ω_{mec} est égale à sa valeur de référence Ω^*_{mec} obtenue en sortie du régulateur de vitesse. Un régulateur de type Proportionnel-Intégral (PI) permette ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple de la génératrice GADA C_g considéré comme une perturbation. Dans ce travail, un type d'asservissement est envisagé pour égaler la vitesse mécanique à la consigne qui est fonction de la vitesse du vent est une régulation basée sur une loi linéaire de type PI.

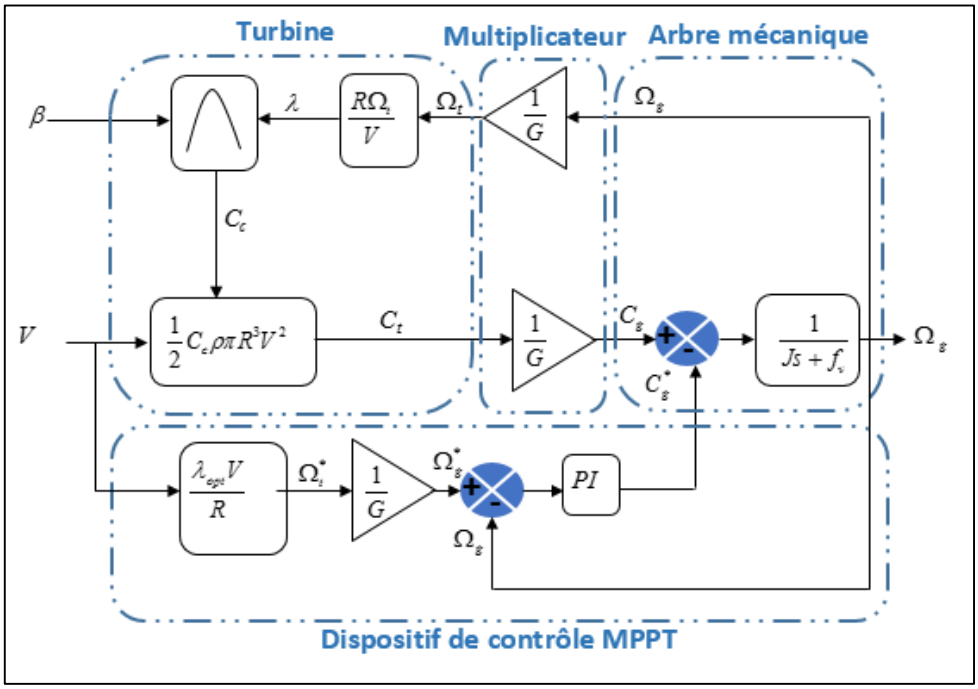


Figure 3. 8. Schéma conventionnel de la maximisation de puissance extraite avec asservissement de vitesse.

3.2.4 Résultats de simulations de la partie aérodynamique et mécanique de l'éolienne à base d'une seule GADA

La figure (3.9) représente le schéma conventionnel du modèle complet de chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique avec la commande MPPT sans

asservissement de vitesse de rotation a été obtenu en modélisant et en regroupant les équations mathématiques présentées ci-dessus sous MATLAB/SIMULINK.

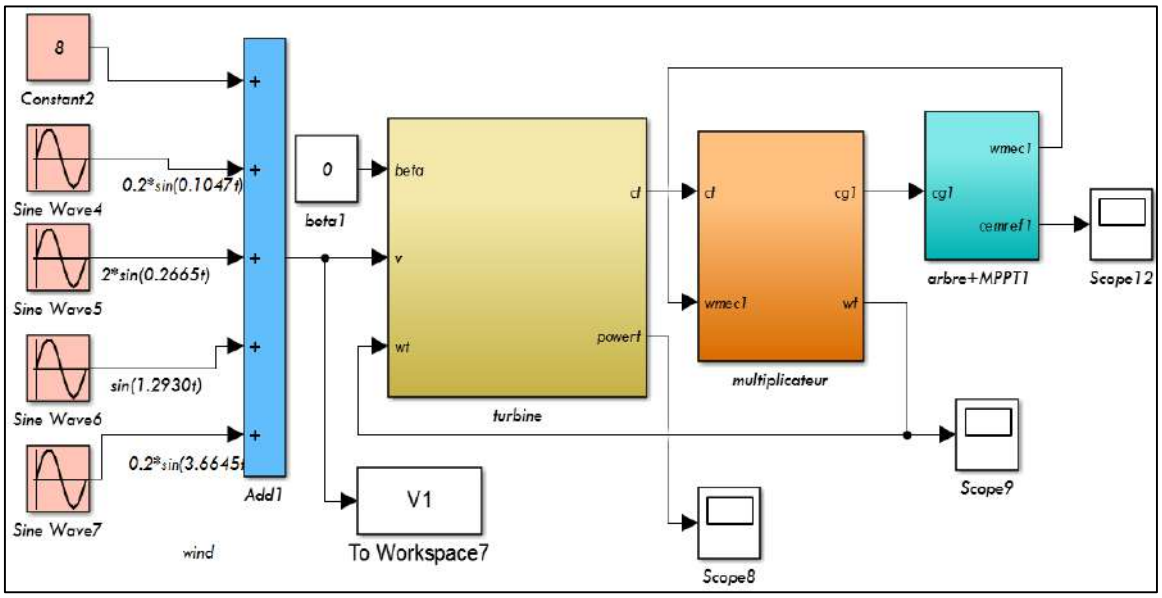


Figure 3. 9. Schéma conventionnel de la turbine sans génératrice à commande MPPT sans asservissement de vitesse.

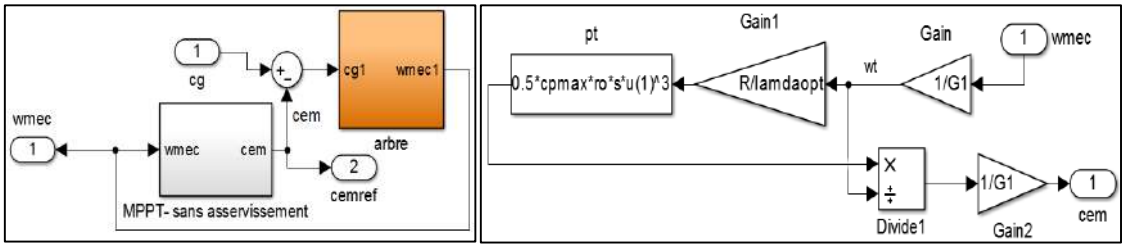


Figure 3. 10. Schémas conventionnels de l'arbre et sa commande MPPT sans asservissement de vitesse.

Cette structure de commande a été simulée en considérant le profil de vent variable allant de 5 m/s à 11 m/s comme le montre dans la figure (3.11). Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés pour notre système éolien (une turbine éolienne, un multiplicateur et l'arbre de la génératrice) pour extraire le maximum de puissance avec la technique de commande proposée MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique sont présentés. L'angle de calage β est fixé à sa valeur minimale (0°) pendant la simulation. Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{opt} = 8$, ce qui correspond au coefficient de puissance maximum $C_{p\max} = 0.45$ quelle que soit la vitesse du vent.

Le modèle du profil de vitesse du vent utilisé dans notre étude et qui sera appliqué pour la turbine éolienne est donné par l'équation (3.3).

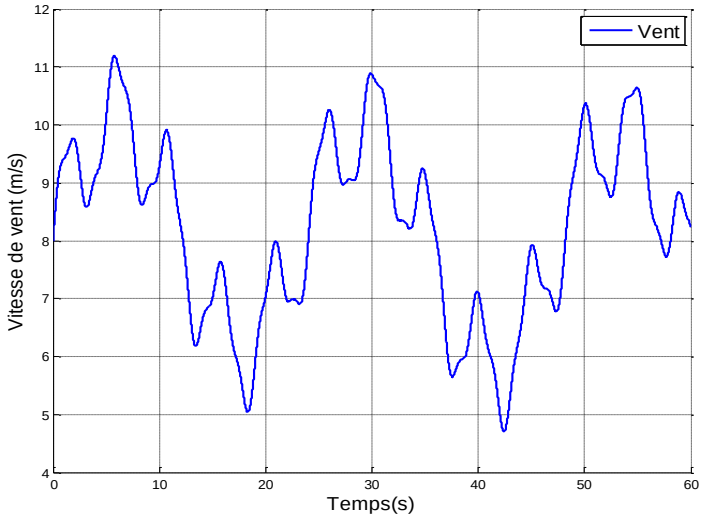


Figure 3. 11. Profil du vent appliqué.

D'après la simulation de notre système éolien sans raccordement par la génératrice (la simulation du fonctionnement de la partie aérodynamique et mécanique de l'éolienne), nous obtenons les allures de la vitesse mécanique, du coefficient de puissance et de la puissance mécanique en fonction de l'évolution du vent sous les conditions suivantes : Angle de calage fixe $\beta = 0^0$, rapport du multiplicateur $G = 110$ et rayon des pales $R = 78m$.

Sur les figures (3.12) à (3.19) nous avons représenté les différents résultats obtenus par le control sans asservissement de la vitesse mécanique. Nous constatons que les variations de la vitesse mécanique, la puissance et le couple aérodynamique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent. De plus, ces variations s'adaptent au profil du vent proposé avec un maximum de puissance achevé. On note également que la vitesse du vent relative et la vitesse spécifique λ suivent leurs références avec un léger temps de réponse au démarrage et une erreur statique non nulle en régime permanant. Ceci est dû au manque de régulation de la vitesse de la turbine.

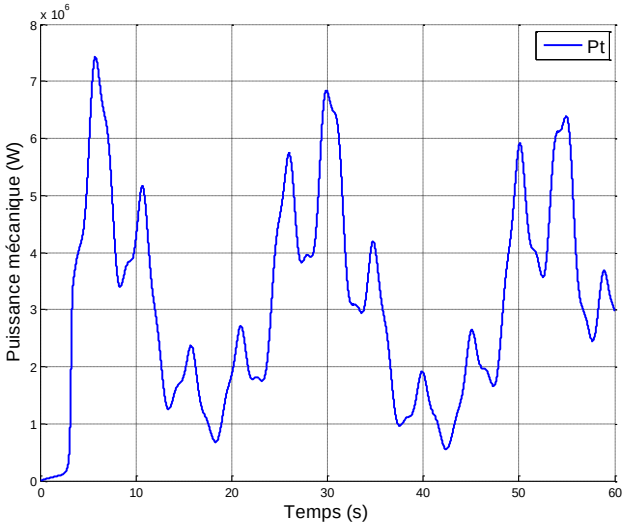


Figure 3. 12. Puissance mécanique produite par la turbine.

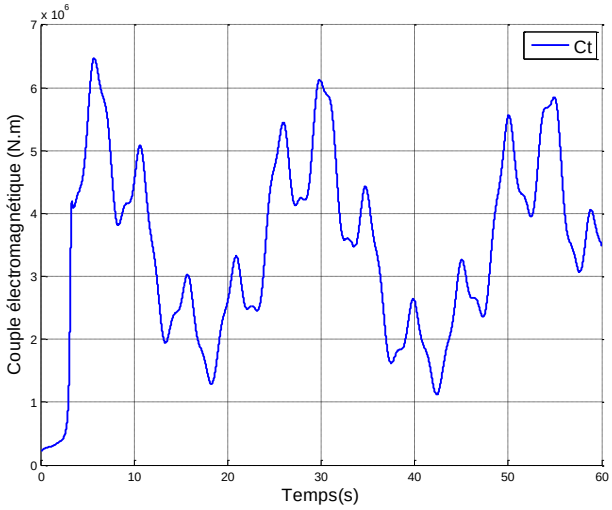


Figure 3. 13. Couple électromagnétique de la turbine.

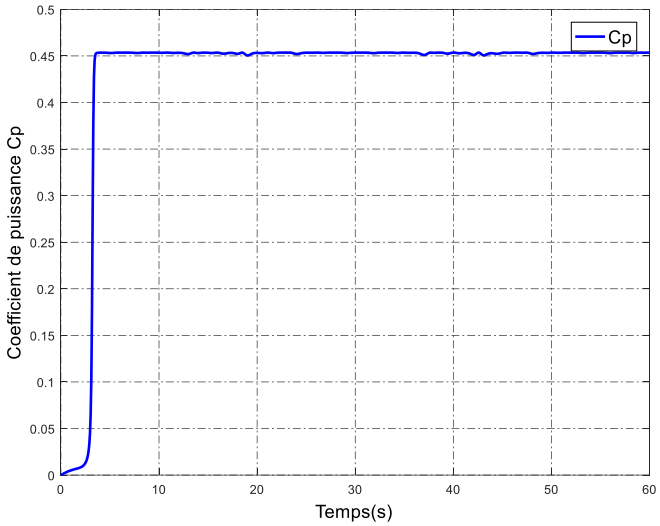


Figure 3. 14. Coefficient de puissance C_p.

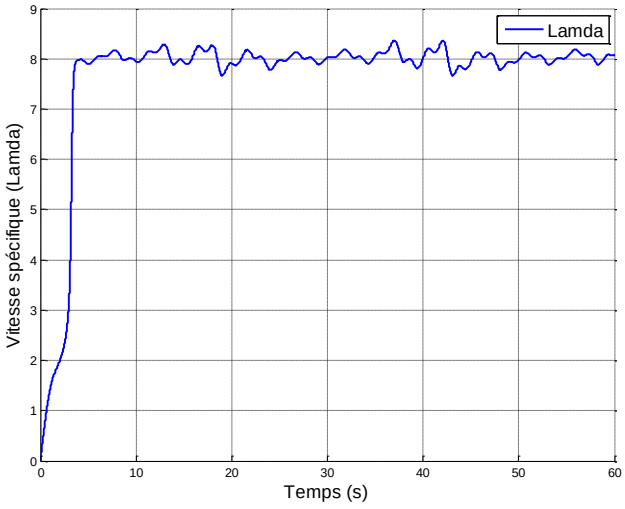


Figure 3. 15. Vitesse spécifique (λ).

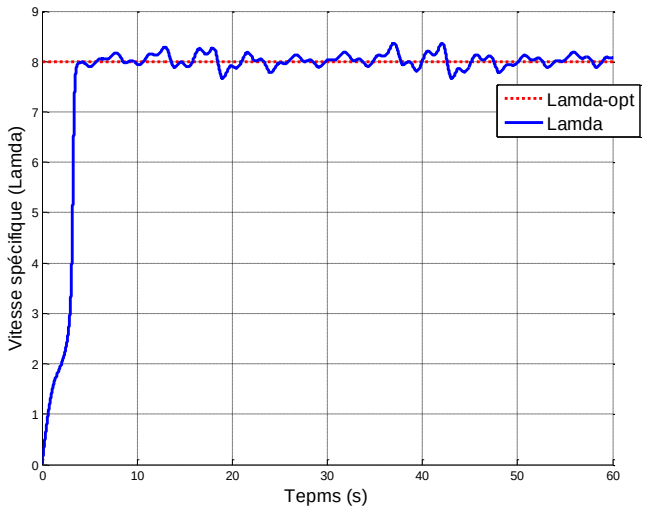


Figure 3. 16. Vitesse spécifique (λ) et Vitesse spécifique optimale (λ_{opt}).

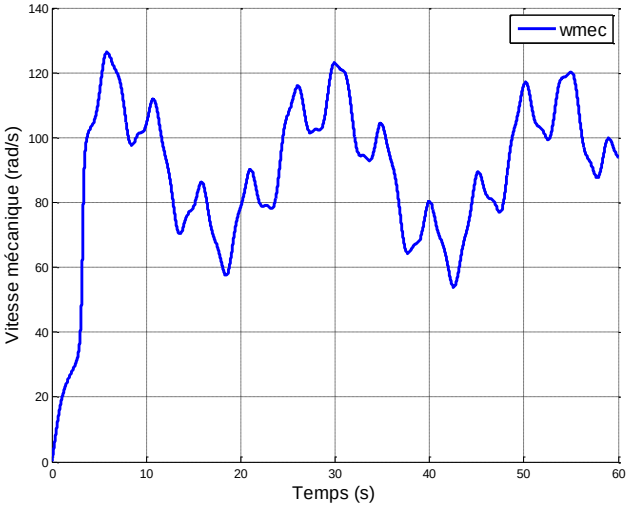


Figure 3. 17. Vitesse mécanique de l'arbre.

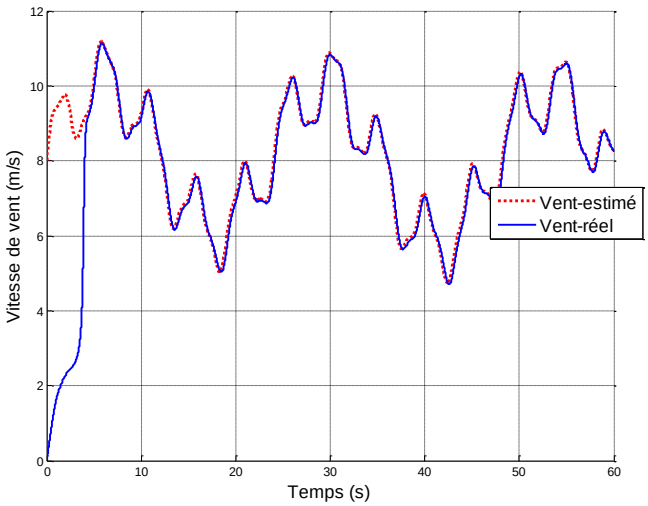


Figure 3. 18. Profil du vent réel et le vent estimé.

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. Cela démontre clairement l'impact du profil de vent sur les performances de l'éolienne. La vitesse spécifique et le coefficient de puissance varient en fonction de la vitesse du vent, ce qui implique la fiabilité du système.

3.2.5 Modélisation de la génératrice GADA

La génératrice est située dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est une génératrice à induction à rotor bobiné (figure (3.19)) ayant un stator similaire à celui des machines triphasées conventionnelles (asynchrone à cage ou synchrone), et souvent constituée de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles des enroulements espacés d'un angle électrique de 2π/3 sont insérés dans l'espace. Il est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [131]. Les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitude constantes. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution [132].

Le processus physique ne peut pas être convenablement contrôlé sans la représentation mathématique. C'est une étape très importante dans l'asservissement des systèmes. En effet, pour concevoir une structure de contrôle, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique qui représente fidèlement les caractéristiques du processus [133, 134]. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'écarter de la réalité physique et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse et la synthèse des structures de contrôle. On peut développer un modèle dynamique de la génératrice GADA à partir d'une bonne approximation du processus réel. Le modèle doit incorporer tous les effets dynamiques importants qui se passent durant les opérations de régimes transitoires et permanents [133, 134]. Le modèle mathématique de la génératrice GADA est similaire à celui de la génératrice asynchrone à cage [135]. En effet, la cage de la machine est assimilée au bobinage triphasé de la génératrice GADA. Le rotor de la génératrice GADA n'est pas en court-circuit et donc la tension au niveau de celui-ci n'est pas nulle [135, 136].



Figure 3. 19. Machine asynchrone à double alimentation [137].

3.2.5.1 Fonctionnement de la génératrice GADA

Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. La puissance Ps est fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie, $(1-g)P_S$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste $g.P$ sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g.f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g)P$ [138] .

Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique. Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (f.é.m) dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m crées au rotor et au stator s'exprimé par:

$$\frac{E_R}{E_S}-\frac{N_R}{N_S}=\frac{(\omega_s-\omega)}{\omega_s} \tag{3.26}$$

N_R et N_S: sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotorique et statorique.

ω_s et ω : sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

Le courant dans le stator et le rotor est défini comme dans le cas d'un transformateur parfait:

$$\frac{I_r}{N_r}=\frac{I_s}{N_s} \tag{3.27}$$

Donc le rapport entre la puissance P_R au rotor et la puissance P_S au stator devient:

$$\frac{P_R}{P_S}=\left(\frac{I_r}{I_s}\right)\left(\frac{E_R}{E_S}\right)=g \tag{3.28}$$

L'équation (3.28) montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor plus on augmente le glissement. La pulsation au stator

(imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g [138].

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme (vitesse du rotor supérieur à celle du champ tournant) ou hypo synchronisme (vitesse du rotor inférieur à celle du champ tournant) aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [131, 139].

La figure (3.20) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire du convertisseur. $P_{rés}$ est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_S, la puissance transitant par le stator, P_R, la puissance transitant par le rotor, et P_{mec}, la puissance mécanique. Pour le transfert de puissance, nous distinguons quatre modes de fonctionnement possibles [140]:

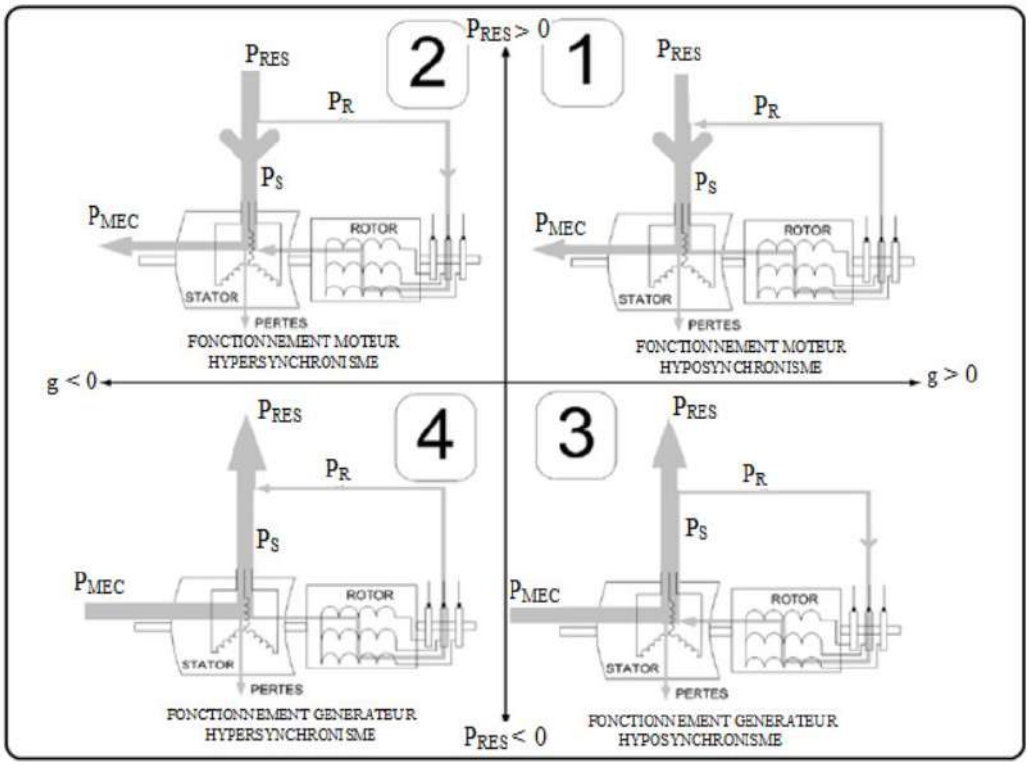


Figure 3. 20. Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [140].

- **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone**

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau au stator. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance P_R ‹‹ Puissance de glissement ›› est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur hypo-synchrone. Les conditions mathématiques qui traduisent ce fonctionnement en négligeant tous les pertes sont:

$$g > 0, P_S > 0, P_{mec} > 0, P_R = g.P_S > 0$$

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement, cependant la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

- **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone**

La puissance est fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor, les conditions mathématiques sont les suivants:

$$g < 0, P_S > 0, P_{mec} > 0, P_R = g.P_S < 0$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone**

La puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. La puissance est fournie au réseau par le stator et une partie de cette puissance transitant par ce dernier est réabsorbée par le rotor. Les conditions mathématiques sont les suivants:

$$g > 0, P_S < 0, P_{mec} < 0, P_R = g.P_S < 0$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas effectuer ce fonctionnement.

- **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone**

La puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor. Les conditions mathématiques sont les suivants:

$$g < 0, P_S < 0, P_{mec} < 0, P_R = g.P_S > 0$$

3.2.5.2 Représentation de la génératrice GADA dans un repère triphasé (abc)

Dans le cas de la production d'électricité par éoliennes, une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) permet d'optimiser la puissance produite. En effet, compte tenu du comportement de la vitesse des courants de marée, la génératrice GADA permet de compenser ces variations dans des proportions acceptables, tout en assurant une bonne qualité de l'énergie produite. Nous admettons que la génératrice est bien construite et que les forces magnétomotrices sont à répartition spatiale sinusoïdale. Cela revient à considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques (figure (3.21)).

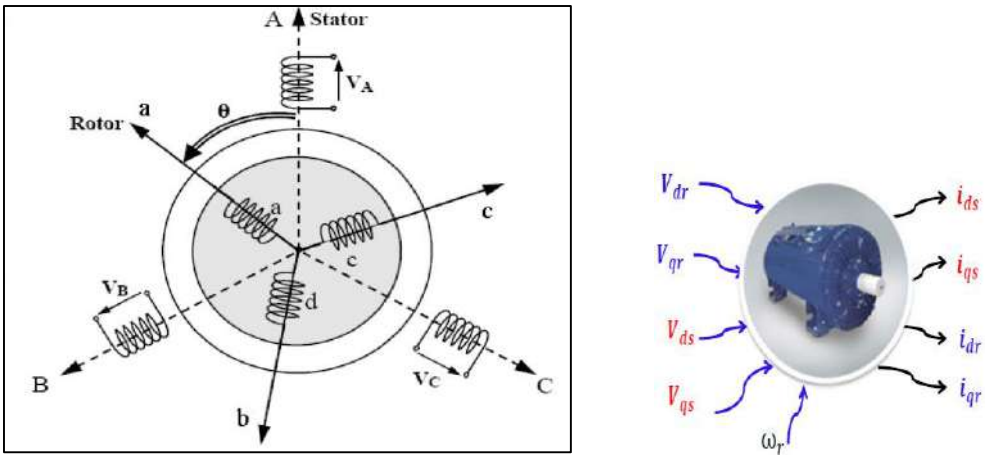


Figure 3. 21. Représentation schématique d'une génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé (abc) [141].

3.2.5.2.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable [132].
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau [132].
- On admet que la f.é.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale [132].

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer:

- L'additivité de flux.
- La constance des inductances propres.

- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

3.2.5.2.2 Equations électriques de la génératrice GADA dans le repère (abc)

Les enroulements statoriques et rotoriques sont illustrés par la figure (3.21), sont alimentés respectivement par les tensions ($V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}, V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$) et parcourus par les courants ($I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$), et sont obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante (application de la loi de Kirchhoff) [142, 143, 144]:

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s][I_{sabc}] + \dfrac{d}{dt}[\phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \dfrac{d}{dt}[\phi_{rabc}] \end{cases} \tag{3.29}$$

$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}$: est le vecteur tensions statoriques;

$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$: est le vecteur tensions rotoriques;

$[I_{sabc}]$: est le vecteur courants statoriques;

$[I_{rabc}]$: est le vecteur courants rotoriques;

$[\phi_{sabc}]$: est le vecteur flux statorique;

$[\phi_{rabc}]$: est le vecteur flux rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

$[R_s]$ and $[R_r]$: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques respectivement.

3.2.5.2.3 Equations magnétiques de la génératrice GADA dans le repère (abc)

Les hypothèses que nous avons présentées conduisent à des relations linéaires entre le flux et les courants. Elles sont exprimées sous forme matricielle par [143, 144]:

$$\begin{cases} [\phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \\ [\phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \end{cases} \tag{3.30}$$

$$[L_s]=\begin{bmatrix} L_s & M_s & L_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$: est la matrice d'inductances statoriques;

$$[L_r]=\begin{bmatrix} L_r & M_r & L_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$: est la matrice d'inductances rotoriques;

$[M_{sr}]$: est la matrice d'inductances mutuelles du couplage stator-rotor, elle est donnée par :

$$[M_{sr}]=M\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Avec

$$[M_{rs}]=[M_{sr}]^T$$

3.2.5.2.4 Equation mécanique de la génératrice GADA dans le repère (abc)

$$J\frac{d\Omega}{dt}=C_{em}-C_g-f_v\Omega \quad (3.32)$$

J : Moment d'inertie des masses tournants (Kg.m²) ;

f_v : Coefficient de frottement en (Nm.s/rad) ;

C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice GADA (Nm) ;

C_g : Couple moteur fourni par l'organe d'entrainement (Nm) ;

Ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor (rad).

Ainsi, l'analyse théorique du comportement du système est donc assez laborieuse, en raison du grand nombre de variables. Ainsi on utilise donc des transformations mathématiques qui assurent la présentation du comportement de la génératrice GADA à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

En tenant compte que le système est équilibré, la transformation de Park (présentée dans l'annexe1) appliquée sur le système (3.29) dans un référentiel tournant (avec la vitesse synchrone ωs), donne les système d'équations suivants :

Equations électriques de la génératrice GADA dans le repère (dq)

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.33)$$

D'autre part les puissances active et réactive statoriques sont données par:

$$\begin{cases} P_s = \dfrac{3}{2}\left(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}\right) \\ Q_s = \dfrac{3}{2}\left(V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}\right) \end{cases} \quad (3.34)$$

L'équation du couple électromagnétique (C_{em}):

$$\begin{cases} C_{em} = -P\dfrac{M}{L_r}\left(\phi_{dr} I_{qs} - \phi_{qr} I_{ds}\right) \\ C_{em} = P\dfrac{M}{L_s}\left(\phi_{ds} I_{qr} - \phi_{qs} I_{dr}\right) \end{cases} \quad (3.35)$$

L'équation mécanique peut être formulée par :

$$J\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \left(\frac{Jd\omega_r}{Pdt}\right) = -\frac{3}{2}P\frac{M}{L_s}\left(\varphi_{rd} i_{sq} - \varphi_{rq} i_{sd}\right) - C_g - f_v \Omega_{mec} \quad (3.36)$$

3.2.5.3 Commande vectorielle de la génératrice GADA

3.2.5.3.1 Principe de la commande vectorielle de la génératrice GADA

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator (figure (3.22)). La méthode du flux orienté consiste à choisir un système d'axes (d, q) où l'un de ces axes coïncide avec la direction désirée du flux qui peut être rotorique, statorique ou d'entrefer.

Ce repère nous permet d'avoir deux composantes directe et en quadrature, l'une de flux statorique et l'autre de courant rotorique [37].

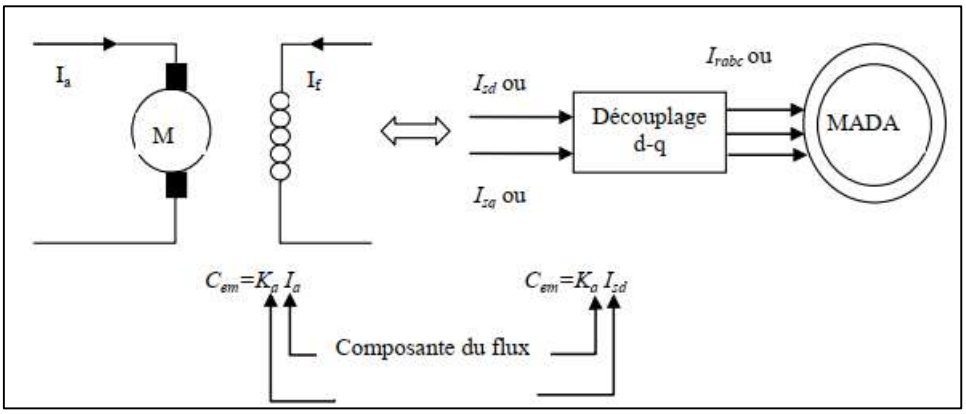


Figure 3. 22. Principe de la commande vectorielle [37].

3.2.5.3.2 Modèle de la génératrice GADA avec orientation du flux statorique

L'utilisation de la génératrice GADA consiste dans la plupart des cas d'amener le glissement à la valeur désirée, avec le meilleur rendement possible en alimentant les enroulements rotoriques par un convertisseur électronique de puissance. Le modèle de la génératrice établi précédemment sera considéré pour appliquer un contrôle vectoriel. Ainsi, l'analyse des équations en régime permanent détermine la dépendance des variables d'action et les objectifs de commande (orientation du repère tournant dq suivant le flux statorique) [145].

Dans ce travail, on choisit l'orientation du flux statorique suivant l'axe d référentiel diphasé (d, q) lié au champ tournant, on obtient:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \tag{3.37}$$

L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (3.23).

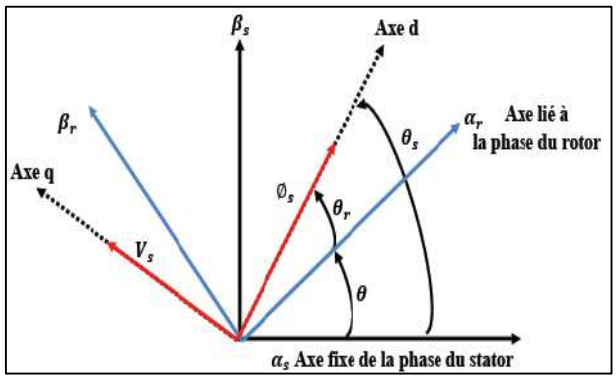


Figure 3. 23. Orientation de la tension et de flux statorique [131].

Alors, le modèle de la génératrice sera plus simple comme il est présenté dans les équations (3.37). L'équation des flux devient:

$$\begin{cases} 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{dr} = \sigma L_r I_{dr} + \dfrac{M}{L_s}\phi_{ds} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \dfrac{M}{L_s}\phi_s \\ \phi_{qr} = \sigma L_r I_{qr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (3.38)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple Vs, cela conduit à un flux statorique ϕ_s constant. Cette considération montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature I_{qr}.

De plus;

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{dI_{dr}}{dt} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \omega_r I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{dI_{qr}}{dt} - \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \omega_r I_{dr} + \omega_r \dfrac{M}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad (3.39)$$

Si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [145]:

$$\begin{cases} V_{ds} = \dfrac{d\phi_s}{dt} \\ V_{qs} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (3.40)$$

avec ω_s la pulsation électrique des grandeurs statoriques. Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} \approx 0 \\ V_{qs} = V_s \approx \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (3.41)$$

A l'aide de l'équation (3.38), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = -\dfrac{M}{L_s} I_{dr} + \dfrac{\phi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\dfrac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.42)$$

D'après l'équation (3.41) les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent:

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (3.43)$$

Pour obtenir l'expression des puissances en fonction des courants rotoriques, on remplace dans l'équation précédente les courants par l'équation (3.42) [106, 145]:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \dfrac{\phi_s}{L_s} + V_s \dfrac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \tag{3.44}$$

A partir des équations (3.40) et (3.41), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante: $\phi_s = \dfrac{V_s}{\omega_s}$

L'expression des puissances (3.44) peut donc se simplifier de la manière suivante:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -V_s \dfrac{M}{L_s} I_{dr} + \dfrac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \tag{3.45}$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante M constante, on remarque que l'équation (3.45) fait apparaître que la puissance active P_s statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{qr}. De plus, la puissance réactive Q_s est proportionnelle au courant rotorique direct I_{dr}, à une constante près $\dfrac{V_s^2}{L_s \omega_s}$.

Afin de pouvoir contrôler correctement la génératrice, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la génératrice. En remplaçant dans l'équation des flux les courants statoriques par l'expression (3.42) on obtient:

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \dfrac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{dr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \tag{3.46}$$

En introduisant ces expressions des flux rotoriques de l'équation précédente (3.46) dans les équations des tensions rotoriques du système (3.39), on obtient:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \dfrac{M V_s}{L_s} \end{cases} \tag{3.47}$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible maintenant de décrire le schéma conventionnel de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA qui sera le bloc à réguler par la suite. En

examinant les équations (3.45) et (3.47), on peut établir le schéma conventionnel de la figure (3.24) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement, il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [37].

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande vectorielle en puissance de la génératrice.

- Stratégie de contrôle vectoriel direct en puissances statoriques active et réactive;
- Stratégie de contrôle vectoriel indirect en puissances statoriques active et réactive;

Dans notre travail, nous représentons ces deux stratégies de contrôle vectoriel en puissances active et réactive.

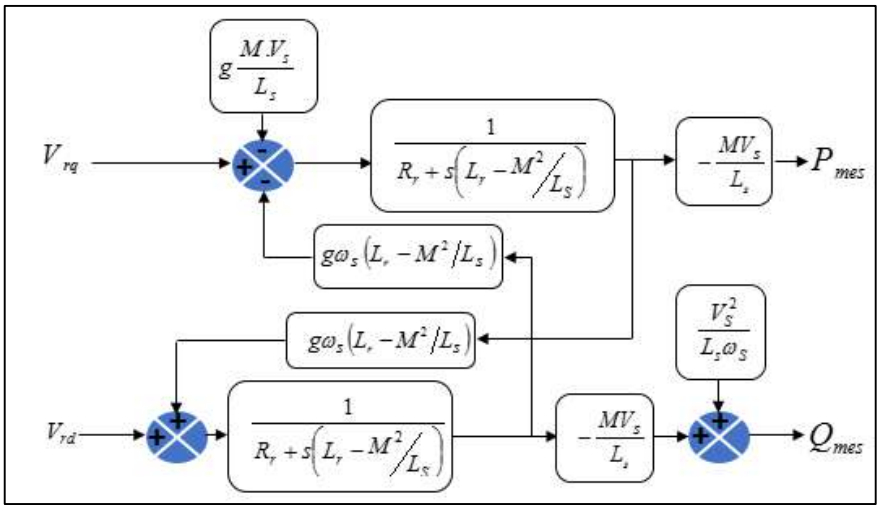


Figure 3. 24. Schéma conventionnel de la génératrice GADA.

3.2.5.3.3 Commande vectorielle directe en puissances active et réactive de la génératrice GADA

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idée sur la régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la génératrice GADA, cette première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [131].

Si l'on observe les équations (3.46), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. Nous pouvons donc écrire:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \dfrac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (3.48)$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la génératrice pour obtenir les courants rotoriques voulus. Le schéma de la figure (3.25) présente le principe de la commande vectorielle directe en puissances active et réactive.

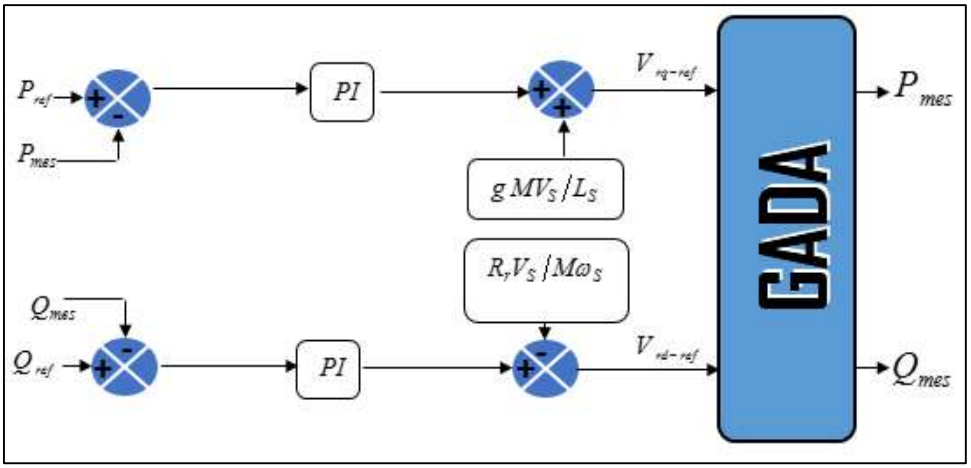


Figure 3. 25. Schéma conventionnel de la commande vectorielle directe.

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \dfrac{MV_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe [146].

3.2.5.3.4 Commande vectorielle indirecte en puissances active et réactive de la génératrice GADA

La deuxième méthode de contrôle vectoriel consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte [131]. Afin d'améliorer la commande directe, on introduit un algorithme de commande indirecte des puissances active et réactive de la génératrice GADA en fonction des courants rotoriques, d'où les termes de couplage $g\ \omega_s\ L_r\ \sigma\ I_{qr}$ et $g\ \omega_s\ L_r\ \sigma\ I_{dr}$ considérés comme étant des

perturbations non négligeables et seront compensés. La commande, ainsi découplée, est réalisée au moyen de régulateurs PI. Les grandeurs de références pour ces régulateurs sont la composante directe du courant pour l'axe d rotorique, et la composante en quadrature du courant pour l'axe q rotorique [131]. Il existe deux méthodes pour contrôler les puissances statorique, en boucle ouverte (sans boucle de puissance) et en boucle fermée (avec boucle de puissance).

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right)$$

3.2.5.3.4.1 Commande vectorielle indirecte en boucle ouverte

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions des puissances active et réactive statoriques du système (3.46), on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations:

$$\begin{cases} I_{qr} = -\dfrac{L_s}{MV_s} P_{s-ref} \\ I_{dr} = -\dfrac{L_s}{MV_s} Q_{s-ref} + \dfrac{V_s}{\omega_s M} \end{cases} \tag{3.49}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma conventionnel ci-dessous. Cette commande consiste à réguler les courants par une boucle dans chaque axe. Les consignes de régulation sont déduites à partir des valeurs de références de puissance (figure (3.26)).

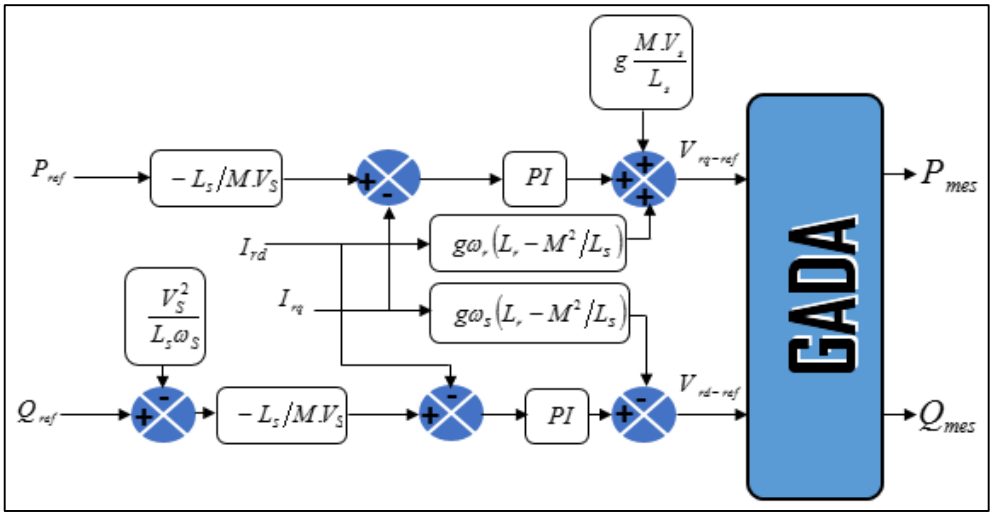


Figure 3. 26. Schéma conventionnel de la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte.

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe. Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive [147]

3.2.5.3.4.2 Commande vectorielle indirecte en boucle fermée

Dans cette méthode de contrôle vectoriel indirect en boucle fermée, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants I_{rd} et I_{rq} et les puissances Q_s et P_s en boucle fermée. Nous aboutissons un schéma conventionnel présenté à la figure (3.27) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. La même chose pour le calcul des régulateurs de cette structure, sont calculés de la même façon que pour la commande directe.

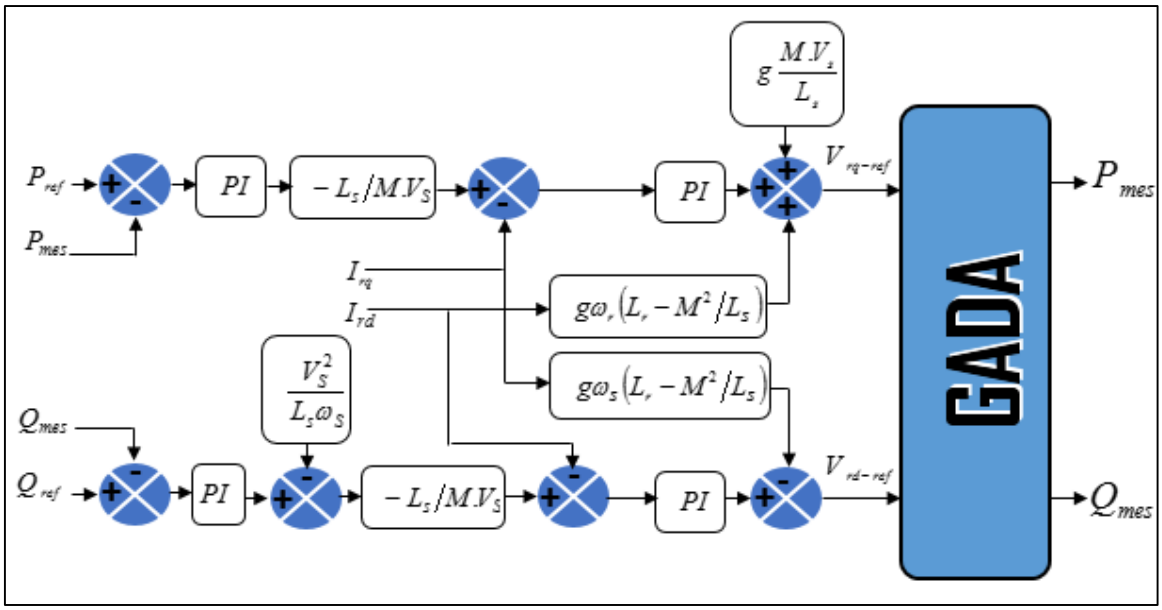


Figure 3. 27. Schéma conventionnel de la commande vectorielle indirecte en boucle fermée.

3.2.5.3.5 Type du régulateur PI

Nous allons maintenant procéder à la synthèse des régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la génératrice GADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la génératrice GADA (figure (3.28)), ainsi que dans de nombreux système de régulation industrielle.

Les régulateurs PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants I_{rd} et I_{rq}. Ces régulateurs offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [148]. Les régulateurs de chaque axe jouent un rôle d'annulation de l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée.

La fonction de transfert du régulateur (PI) est de la forme:

$$FT = \left(K_p + \frac{K_i}{P} \right) G(P) \tag{3.50}$$

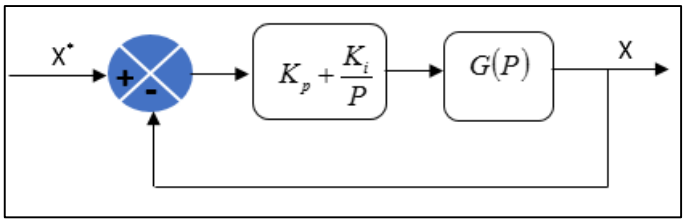


Figure 3. 28. Schéma conventionnel de la régulation par un PI.

Avec :

K_i : est le gain intégral du régulateur;

K_P : est le gain proportionnel du régulateur.

$$G(P) = \frac{G}{1 + \tau P} \tag{3.51}$$

Tel que G est le gain statique et τ est la constant du temps du processus.

À partir de la fonction de transfert, on peut calculer les deux paramètres de chaque régulateur PI. Les détails du calcul pour chaque régulateur PI sont présentés dans l'annexe2.

3.2.6 Résultats et discussion

Il est nécessaire de piloter la génératrice GADA avec un profil du vent typique proche de la réalité, à cet égard nous nous sommes intéressés à étudier la structure de la génératrice GADA ainsi que les stratégies de commandes vectorielles directe et indirecte en puissances statorique active et réactive avec des régulateurs PI d'une part, et d'analyser le comportement en régime dynamique du système d'autre part, donc en utilisant le profil du vent proposé ci-dessus (figure (3.11)). Nous avons utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK pour simuler le fonctionnement de l'ensemble du système. Tous les paramètres électriques et mécaniques de la génératrice GADA utilisés dans cette étude sont rassemblés et présentés dans le tableau suivant:

Tableau 3. 1. Paramètres de la génératrice GADA.

Puissance nominale	7.4 MW
Résistance statorique (Rs)	0.021Ω
Résistance rotorique (Rr)	0.012Ω
Inductance de fuite statorique (Ls)	0.0137 H
Inductance de fuite rotorique (Lr)	0.0136 H
Inductance mutuelle (M)	0.0135 H
Nombre de paires de pôles (P)	2
Inertie (J)	1000Kg.m^2
Coefficient de frottement (fv)	0.0024Nm/s
Fréquence d'alimentation (f)	50 Hz

Dans ce travail, la comparaison sera basée sur les performances et les caractéristiques dynamiques et statiques des deux méthodes de commande directe et indirecte dans le but d'évaluer l'influence de la commande à choisir sur les performances dynamiques et statiques du système éolien étudié, ainsi que de prévoir les avantages et les inconvénients inhérents à l'emploie de telle ou telle méthode de commande. Pour la commande vectorielle indirecte nous avons utilisé le schéma de la commande indirect en boucle ouverte, avec deux régulateurs PI des courants rotoriques. Au niveau de la turbine nous avons appliqué la technique de maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse mécanique. Donc, le but attendu est d'évaluer la méthode qui répond mieux aux exigences suivantes:

-Meilleure réponse du système sans dépassement;
-Robustesse vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA.

La figure (3.29) représente le schéma conventionnel du système de conversion étudié à commande vectorielle directe, qui contient une seule boucle de commande pour chaque axe avec un correcteur PI. Cela signifie que les courants du rotor ne peuvent pas être contrôlés. Le schéma ci-contre a été obtenu en effectuant une simulation du système basée sur la transformation de Park sans l'onduleur.

La figure (3.30) représente le schéma conventionnel du système de conversion étudié à commande indirecte, qui comprend deux boucles de commande pour chaque axe. Une boucle interne pour le contrôle des courants rotorique et l'autre boucle externe pour le contrôle des puissances. Afin que l'on puisse contrôler les courants ce qui signifie une bonne protection pour la machine.

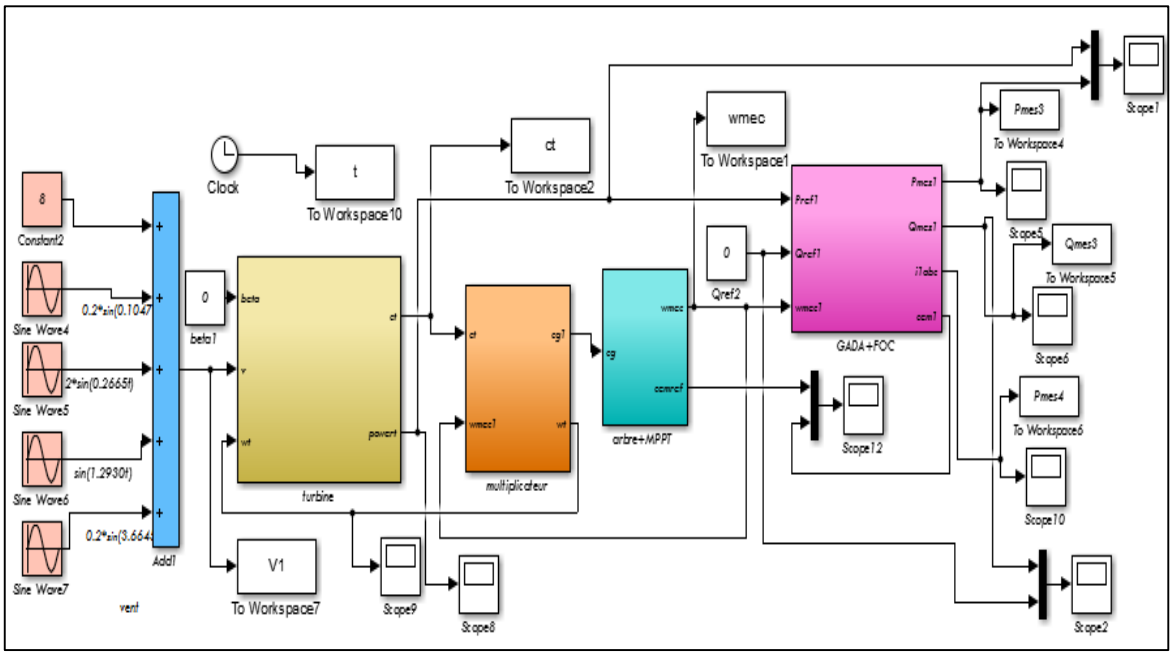


Figure 3. 29. Schéma conventionnel de l'éolienne étudiée basée sur une seule génératrice GADA à commande directe.

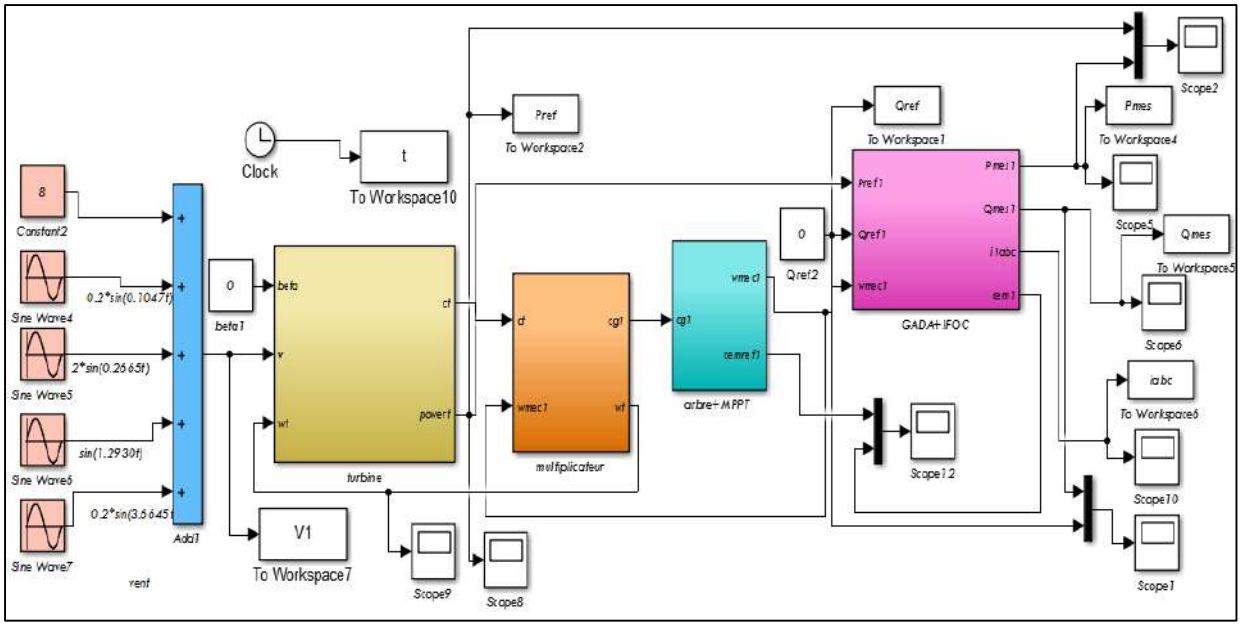


Figure 3. 30. Schéma conventionnel de de l'éolienne étudiée basée sur une seule génératrice GADA à commande indirecte.

Pour justifier les performances de la commande utilisée nous avons réalisé une simulation qui présente le mode de fonctionnement de la génératrice. Pour cela, nous avons appliqué au système des consignes en puissances active et réactive dont la référence de la puissance active fournie par le stator a la même allure que la puissance mécanique de la turbine qui varie en fonction de la variation du vent grâce à la stratégie de commande MPPT pour permettre à la

turbine de fonctionner dans des conditions optimales. La référence de la puissance réactive sera maintenue nulle afin d'assurer un facteur de puissance unitaire côté stator (cos(ϕ)=1).

3.2.6.1 Test de suivi de consigne

Les figures (3.31) à (3.34) montrent les résultats de la simulation du système en appliquant une commande directe sur la génératrice GADA en présence de la stratégie de commande MPPT appliquée à l'ensemble de la chaîne éolienne.

Les figures (3.31) et (3.32) montrent l'évolution de la puissance active et réactive en fonction de leurs références entre 0 et 60 secondes. Les résultats ont montré que la variation de la puissance active (figure (3.31)) est adaptée à la variation de la puissance de la turbine, et que cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Cela montre clairement l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance active produite. On peut constater aussi sur les résultats de simulation une bonne suive de consigne pour les puissances active et réactive statorique, ce qui signifié un bon réglage des puissances active et réactive.

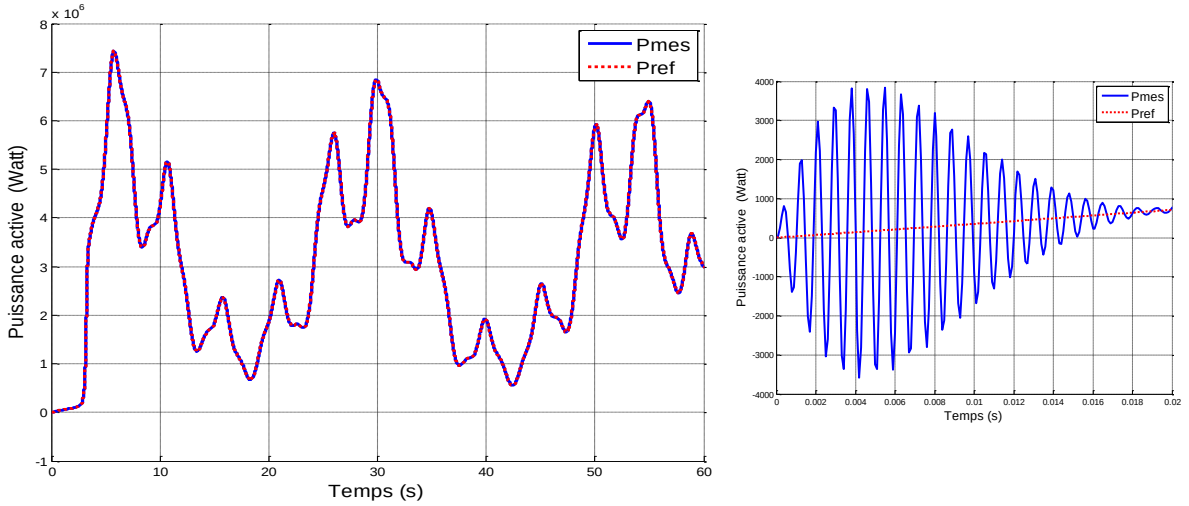


Figure 3. 31. Puissance active obtenue par la commande directe.

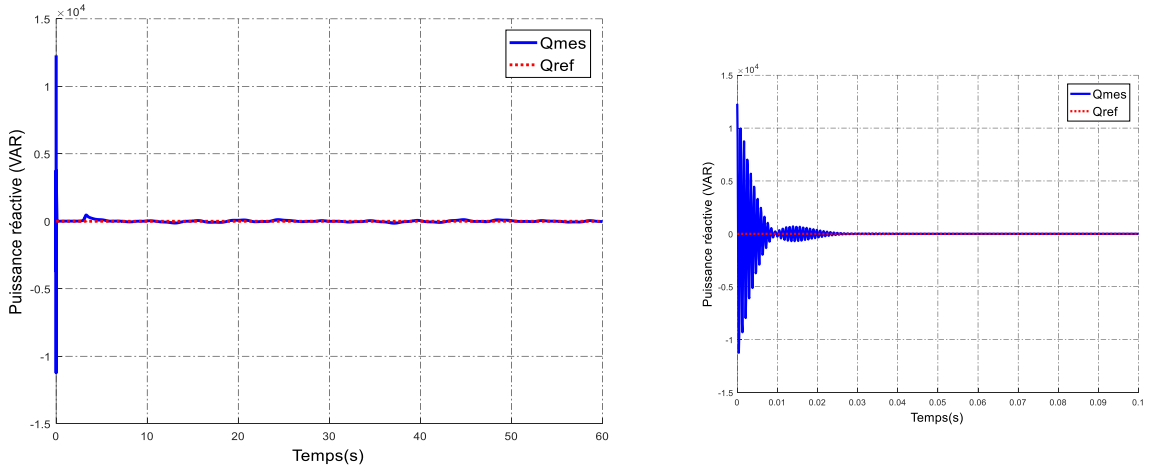


Figure 3. 32. Puissance réactive obtenue par la commande directe.

Le couple électromagnétique de la génératrice suit les mêmes variations du couple de la turbine qui est en fonction de la vitesse du vent, comme le montre sur la figure (3.33).

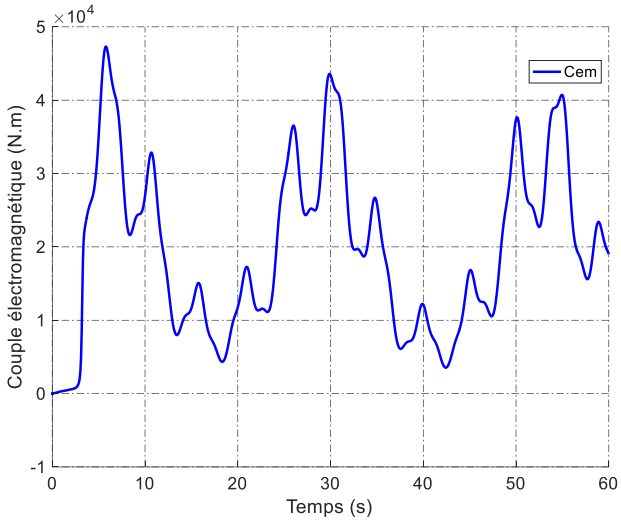


Figure 3. 33. Couple électromagnétique obtenu par la commande directe.

La figure (3.34) montre l'évolution des courants du rotor. Où l'on peut voir que le courant rotorique est sinusoïdal avec les oscillations et on remarque aussi que l'amplitude du courant augmente avec l'augmentation de la puissance active. Le courant du rotor varie suivant la variation de la vitesse du vent, puisque nous avons considéré que le stator de la génératrice GADA relié à une source de tension parfaite.

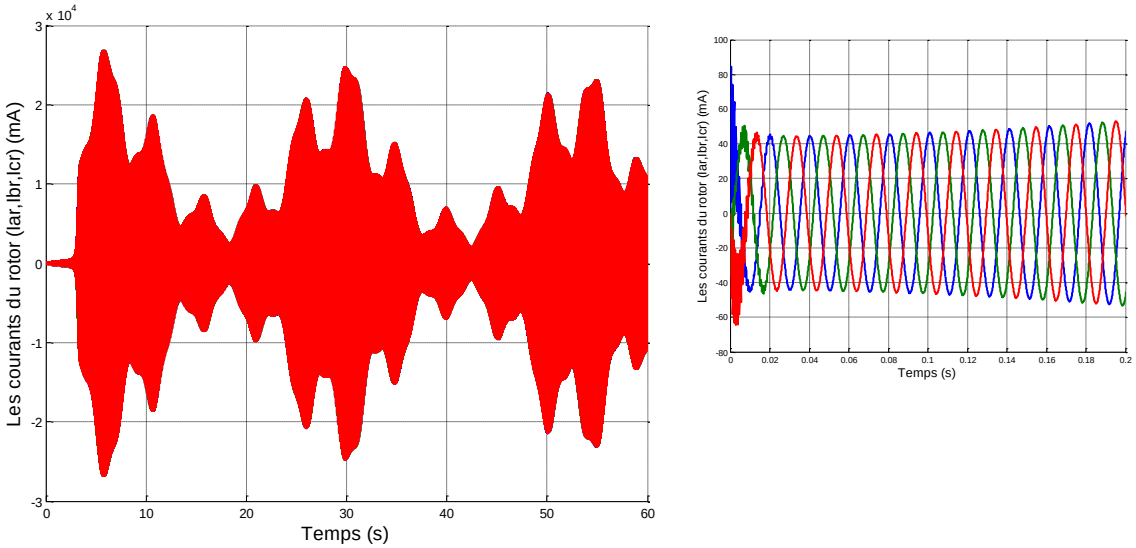


Figure 3. 34. Courants du rotor obtenus par la commande directe.

Les figures (3.35) à (3.38), montrent les résultats de la simulation du système en appliquant une commande indirecte en boucle ouverte dans la génératrice GADA, ainsi qu'en appliquant la même stratégie de commande MPPT pour l'ensemble de la chaîne éolienne.

Les figures (3.35) et (3.36) montrent l'évolution de la puissance active et réactive en fonction de leurs références pour les mêmes références utilisées pour la commande directe. Les figures montrent que les puissances active et réactive délivrées par la génératrice GADA suivent bien les références correspondantes. Ceci est dû au contrôle des composantes quadrature et directe du courant de la génératrice GADA. Ainsi que, on voit que le réglage des puissances est efficace, et l'influence de la variation d'une puissance sur l'autre est très faible par rapport au cas de la commande directe.

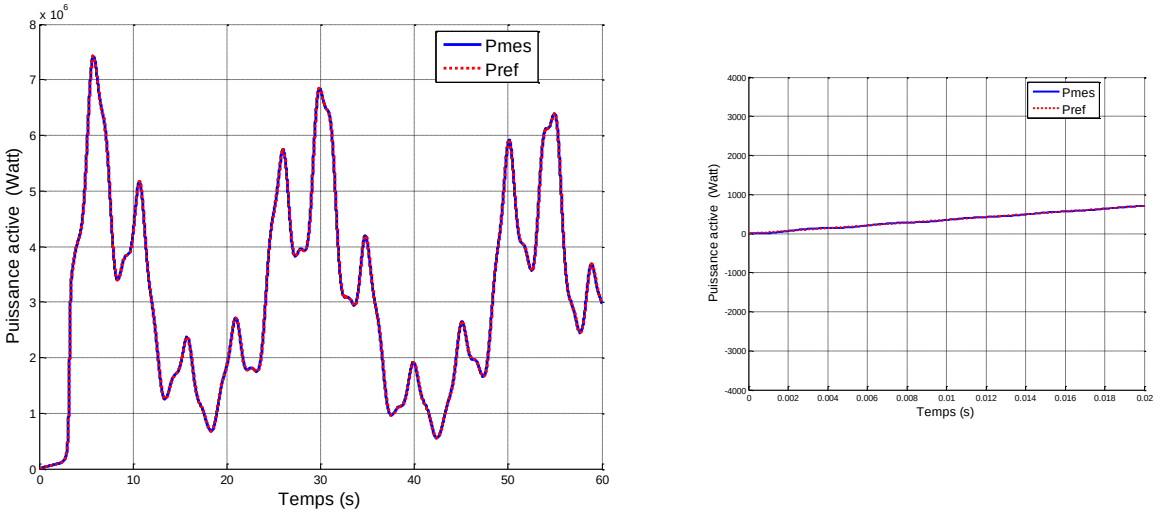


Figure 3. 35. Puissance active obtenue par la commande indirecte.

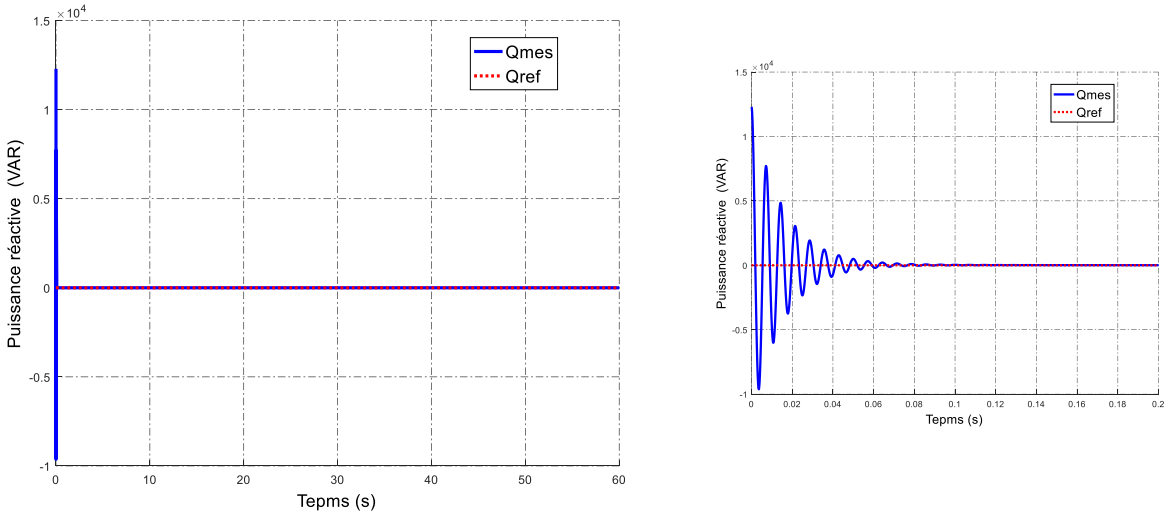


Figure 3. 36. Puissance réactive obtenue par la commande indirecte.

La figure (3.37) présente le couple électromagnétique de la génératrice, la figure montre que le couple électromagnétique suit aussi les mêmes variations du couple de la turbine qui est en fonction de la vitesse du vent.

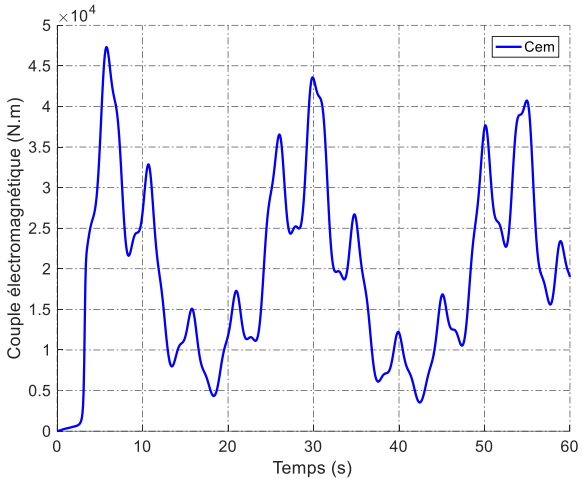


Figure 3. 37. Couple électromagnétique obtenu par la commande indirecte.

La figure (3.38) présente la forme d'onde du courant du rotor, et on remarque que l'amplitude du courant augmente avec l'augmentation de la puissance active, tandis que le courant du rotor varie suivant la variation du vent aussi car il s'agit d'une forme de puissance. Les réponses de courant rotorique sont plus régulières dans la commande indirecte, à cause de présence d'une boucle de régulation de courant rotorique.

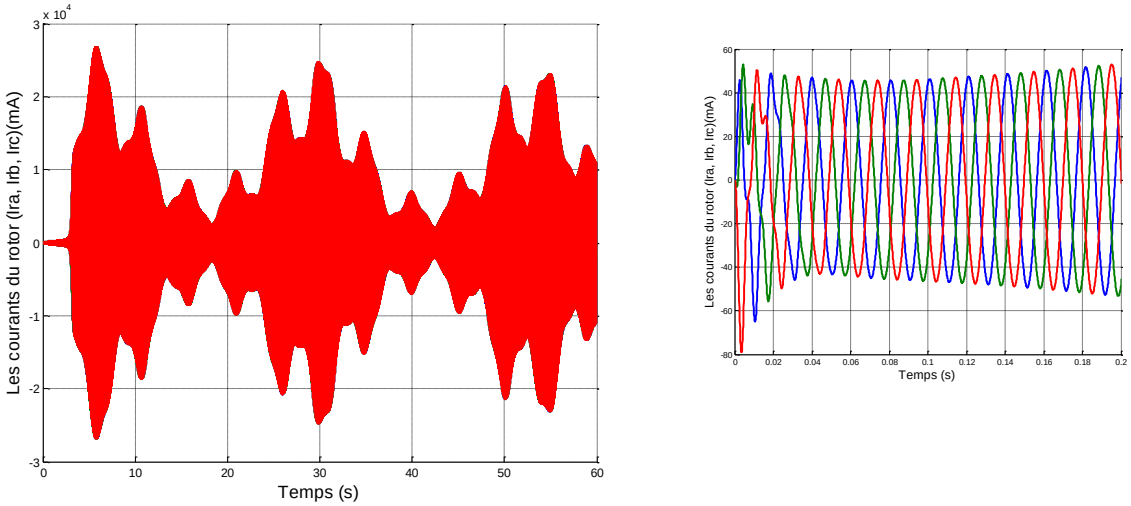


Figure 3. 38. Courants du rotor obtenus par la commande indirecte.

- **Comparaison des performances**

La figure (3.39) résume une comparaison des performances de réglage des puissances pour les deux méthodes de commande vectorielle de la génératrice GADA directe et indirecte.

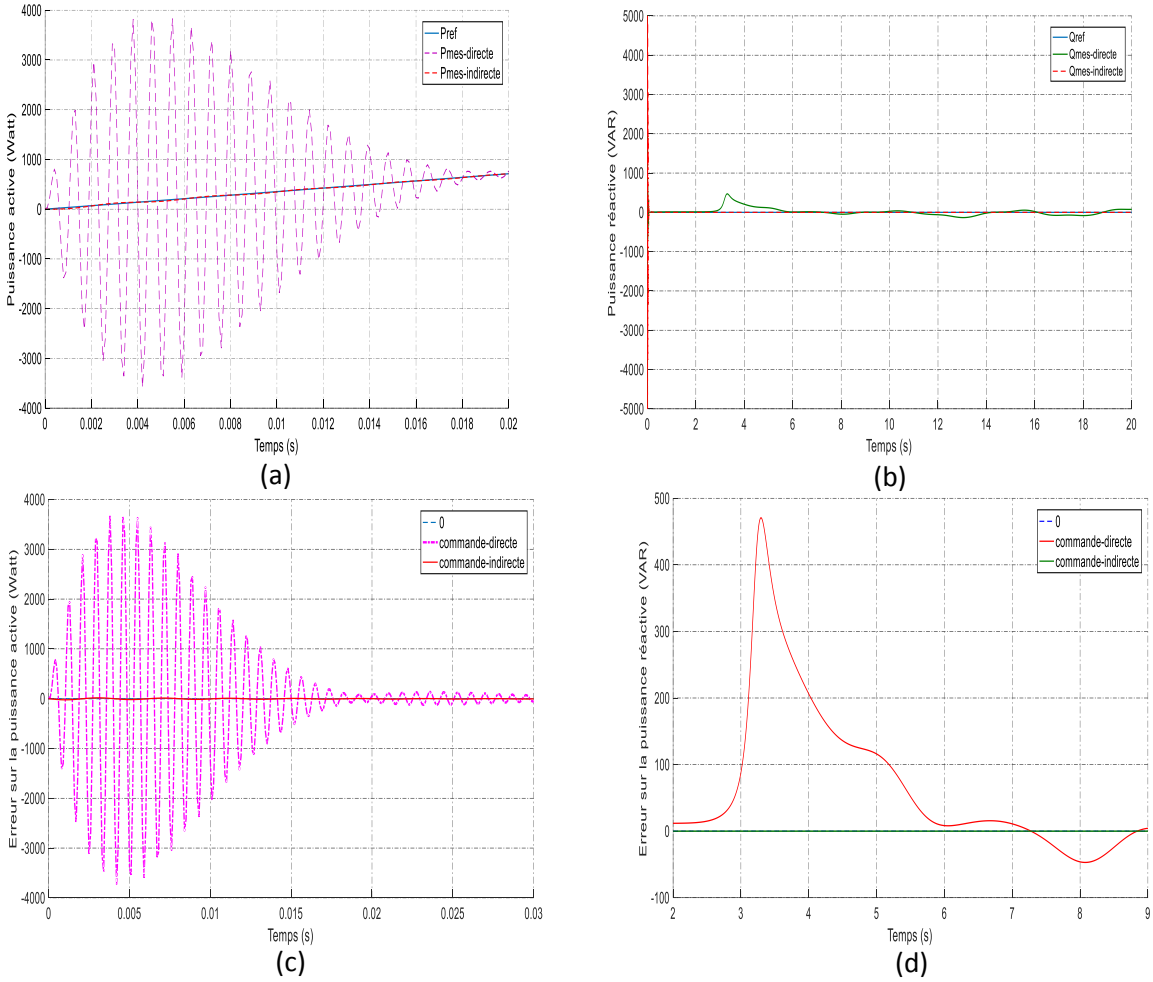


Figure 3. 39. Comparaison des performances : commande vectorielle directe et indirecte.

D'après les résultats de la figure (3.39), on peut dire que la méthode indirecte a donnée des bonnes performances dynamiques et statiques pour la puissance active et réactive. Nous observons une dynamique qui réagit rapidement sans dépassement par rapport à la commande directe, que soit pour la puissance active (figure 3.39.a) ou pour la puissance réactive (figure 3.39.b). En régime permanant, l'erreur statique est minime dans le cas de la méthode indirecte par rapport à la méthode directe pour la puissance active (figure 3.39.c) et la puissance réactive (figure 3.39.d). Ces résultats montrent que la méthode indirecte est un outil efficace pour réaliser la commande en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA. Evidemment, le fait qu'il y ait une commande indirecte avec deux boucles en cascades permet d'augmenter légèrement les performances du système car la perturbation subie par la génératrice est automatiquement corrigée par le régulateur supplémentaire de la boucle interne.

Afin on peut dire que les deux techniques permettent un bon contrôle des puissances active et réactive. Cependant, la commande indirecte réduit considérablement l'influence de la variation d'une puissance sur le réglage de d'autre, ce qui est une meilleure séparation entre les deux axes. En revanche, la commande directe permet une meilleure dynamique puisqu'elle contient une seule boucle.

3.2.6.2 Test de robustesse

L'identification paramétrique de la génératrice GADA ne donne pas lieu à des valeurs exactes et définitives. En plus, ces paramètres de la génératrice GADA sont souvent liées à l'état d'exploitation de la génératrice (échauffement, variation de la charge, saturation de circuits magnétiques, forme de l'entrefer, effet pelliculaire, régime défluxé, … etc.). Pour cela, nous avons pensé qu'il est plus judicieux de tester l'influence d'une éventuelle erreur des paramètres sur les performances de système étudié.

La robustesse de la commande suite au changement des paramètres de la génératrice GADA utilisée dans notre système éolien à base d'une seule génératrice GADA est testée par deux essais:

1- Variations de la résistance rotorique Rr (cas d'échauffement) de +100%;

2- Variations de l'inductance mutuelle M (cas de saturation) de -10%.

En effet les calculs de correcteurs basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes

La figure (3.40) représente les résultats obtenus à partir de la simulation du système éolien basé sur une seule génératrice GADA par la commande directe relatif à ce test de robustesse. Les figures (3.40.a) et (3.40.b) montrent le comportement de la commande directe lorsque la résistance rotorique Rr est augmentée de 100% de sa valeur nominale. Les figures (3.40.c) et (3.40.d) montrent le comportement de la commande directe lorsque l'inductance mutuelle M est diminuée de 10% de sa valeur nominale. D'après ces résultats on peut remarquer que la variation paramétrique excessive effectuée sur le modèle de la génératrice GADA a engendrée des effets clairs sur les courbes de la puissance active et réactive de la commande directe. Cependant, une variation de la résistance rotorique Rr de +100% de sa valeur nominale, augmente le temps de réponse de la puissance active (figure (3.40.a)) et la puissance réactive (figure (3.40.b)).

Tandis que la variation de l'inductance mutuelle M de -10% de sa valeur nominale, affecte les performances dynamiques et statiques de la commande directe. Cette sensibilisé à la variation de l'inductance mutuelle est traduite par l'augmentation du dépassement, du temps de réponse et de l'erreur statique au niveau de la puissance active (figure (3.40.c)) et la puissance réactive (figure (3.40.d)). Pour une augmentation de résistance rotorique Rr de 100% qui correspond au cas d'échauffement du bobinage et une diminution d'inductance de 10%, les puissances actives et réactives n'arrivent pas à suivre leurs consignes correctement ce qui détériore les performances de la commande directe.

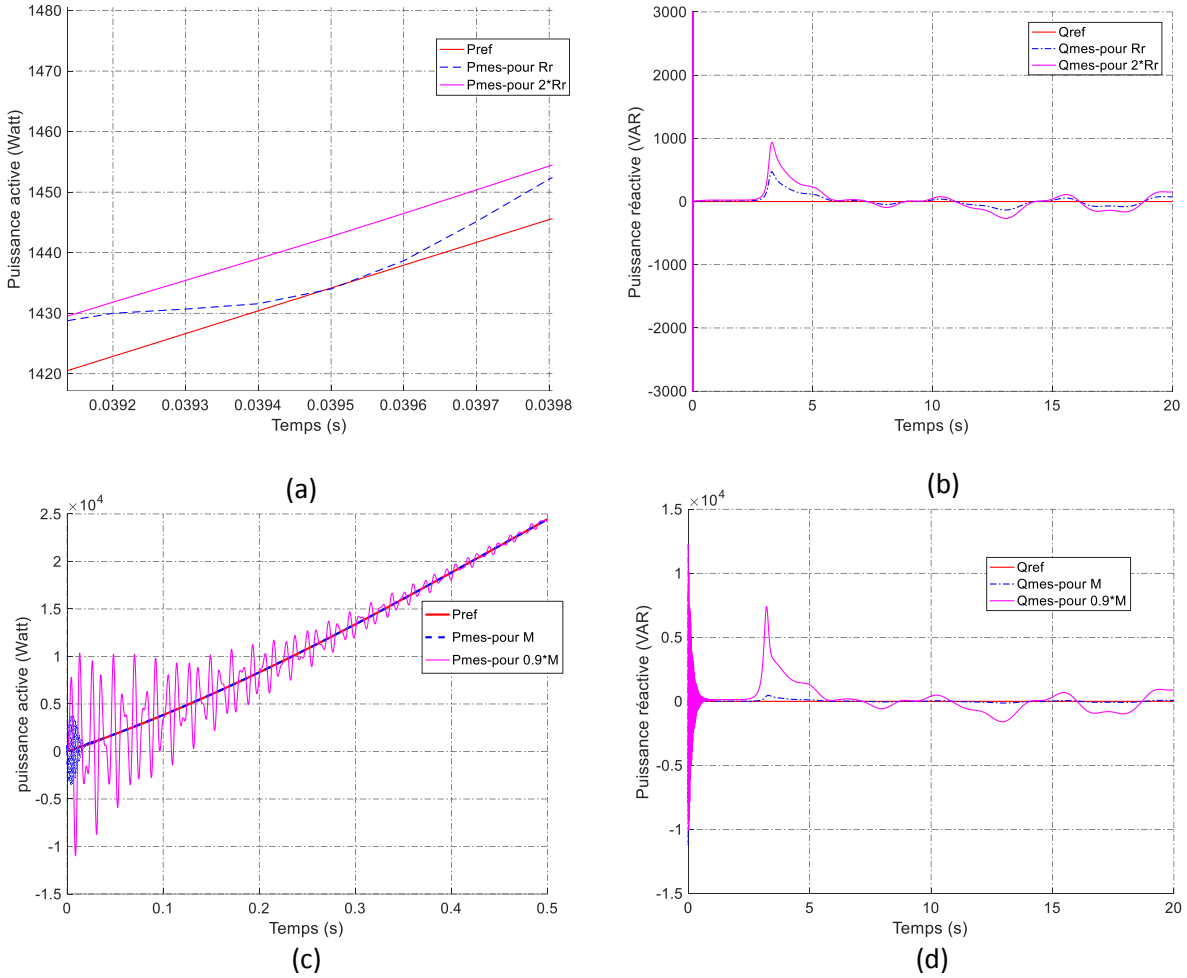


Figure 3. 40. Commande vectorielle directe vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA.

Le même test est réalisé pour la commande indirecte, La figure (3.41) représente les résultats obtenus à partir de la simulation du système éolien basé sur une seule génératrice GADA par la commande indirecte. Les figures (3.41.a) et (3.41.b) montrent le comportement de cette commande pour la variation de +100% de Rr, et les figures (3.41.c) et (3.41.d) pour la variation de -10% de M.

Les résultats présentés par la figure (3.41) montrent l'insensibilité de la commande indirecte dans le cas de la variation de la résistance rotorique, que soit pour la puissance active (figure (3.41.a)) ou pour la puissance réactive (figure (3.41.b)). Cette variation de la résistance rotorique n'a quasiment aucune influence sur la commande car les deux boucles de régulations permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus en rapport avec la bonne valeur de la résistance. Par contre l'effet de la variation de l'inductance mutuelle n'est pas négligeable (figures (3.41.c) et (3.41.d)), c'est-à-dire la commande indirecte perde partiellement l'efficacité de réglage mais le découplage reste maintenu.

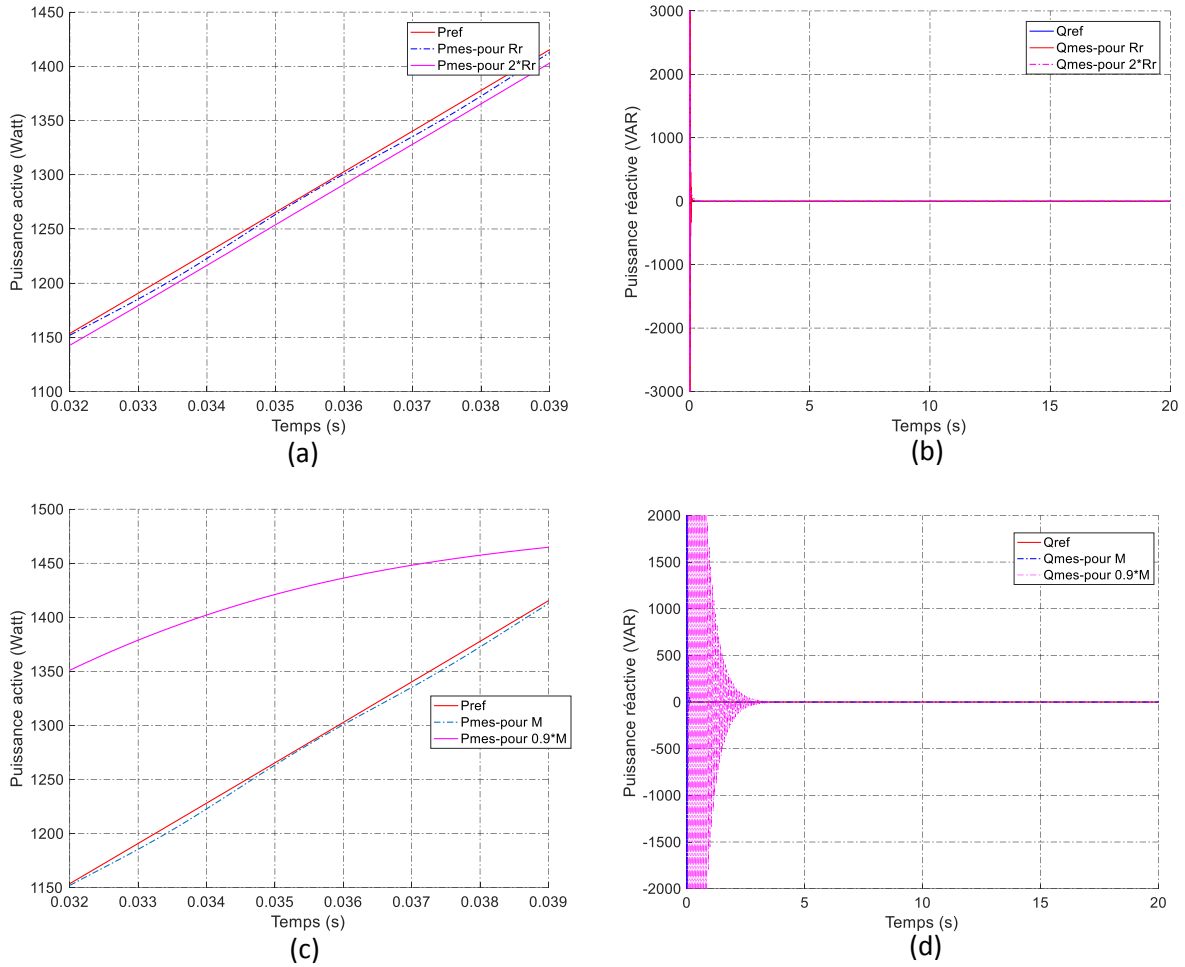


Figure 3. 41. Commande vectorielle indirecte vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a été consacré pour la modélisation d'un système éolien à base d'une seule génératrice asynchrone à double alimentation GADA. Nous avons présenté le modèle mathématique des éléments de notre chaine de conversion éolienne. Ces éléments sont : le vent, la turbine, l'arbre mécanique, le multiplicateur et la génératrice GADA.

Dans la première partie, nous avons modélisé la partie aérodynamique et mécanique de l'éolienne basée sur une seule génératrice GADA avec leurs différents paramètres. Deux méthodes de contrôle MPPT ont été étudiées en détail (avec ou sans asservissement de la vitesse de rotation). Dans ce qui suit nous avons étudié la génératrice asynchrone à double alimentation GADA la plus utilisé pour la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. Dans le cadre de ce travail nous avons développés le modèle de la génératrice GADA dans le repère de Park lié au champ tournant statorique pour simplifier le modèle final à cause de la complexité du modèle de la génératrice GADA dans le but d'effectuer

les différents types de commandes. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous avons respecté.

Dans la suite de ce chapitre, nous avons présenté la commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques d'une génératrice GADA qui nous a permis de simplifier notre modèle mathématique. Cette commande a été présentée par deux méthodes : contrôle vectoriel direct et indirect. Nous avons présenté aussi, les schémas conventionnels de chaque commande ainsi que la démarche pour la synthèse des correcteurs proportionnel intégral (PI). Enfin, nous avons montré plusieurs résultats de simulation obtenus sous MATLAB/SIMULINK d'un système éolien à base d'une seule génératrice asynchrone à double alimentation GADA et comparé ses performances en suivi de référence et devant les variations paramétriques de la génératrice GADA. Ces résultats, montrent que la commande indirecte règle mieux les puissances mais la commande directe offre une meilleur dynamique. Ainsi, la commande indirecte montre une grande précision de suivi de consigne entre les variables mesurées et les variables de consignes pour le contrôle vectoriel indirect. La stratégie indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant (prise en compte les termes du couplage).

On s'intéressera dans le chapitre suivant à la conception et la simulation d'un nouveau modèle éolien basé sur deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA.

CHAPITRE 4 : MODELISATION ET COMMANDE D'UNE EOLIENNE BASEE SUR DEUX GENERATRICES GADA

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons essayer d'améliorer les performances des éoliennes en mettant en œuvre un système éolien basé sur deux génératrices asynchrones à double alimentation(WT-deux-GADA) montées en cascade sous la variation de la vitesse du vent dans le but d'extraire le maximum de la puissance électrique. Afin de valider les performances dynamiques du système, des simulations ont été réalisées à l'aide de Simulink / MATLAB. On va présenter une description détaillée de notre nouveau aérogénérateur à base de deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA qui fait l'objet de notre étude ainsi que sa technologie de son fonctionnement.

Ce modèle proposé peut également être utilisé pour des applications dans des zones de vent fort afin d'obtenir une efficacité de conversion d'énergie élevée, de produire une grande puissance électrique et d'augmenter la capacité de l'éolienne tout en économisant les matériels d'une part et en réduisant les coûts d'installation d'autre part. De plus, il assure également la continuité de la production d'électricité car si l'une de ces deux génératrices tombe en panne, la deuxième génératrice continuera de fonctionner jusqu'à ce que la génératrice défaillante soit réparée.

Pour contrôler ces deux génératrices de notre nouveau système éolien proposé, différentes commandes seront développées ici, dont l'une appelée commande directe qui effectue la régulation directement sur les puissances sans tenir compte les couplages internes existants entre les puissances dans les deux génératrices GADA. Cette solution est simple à mettre en œuvre et permet d'obtenir rapidement des fonctionnements convenables de l'ensemble. Ensuite nous présentons la méthode indirecte qui s'intéresse d'abord de réguler les courants rotoriques des deux génératrice GADA et incorpore ensuite une boucle de régulation des puissances.

4.2 Description du modelé proposé

Le nouveau système de conversion de l'énergie éolienne proposé dans notre travail est à base de deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA montées en cascade. La figure (4.1) représente le système de conversion qui comporte trois parties.

- Deux génératrices à vitesse variable utilisant deux GADA, cette dernière était la plus populaire dans l'application d'énergie éolienne en raison de ses performances supérieures, de son coût et de sa flexibilité du contrôle;

- Un multiplicateur de vitesse utilisé dans l'aérogénérateur pour augmenter la vitesse de rotation d'un rotor;
- Une turbine éolienne à deux pales qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent.

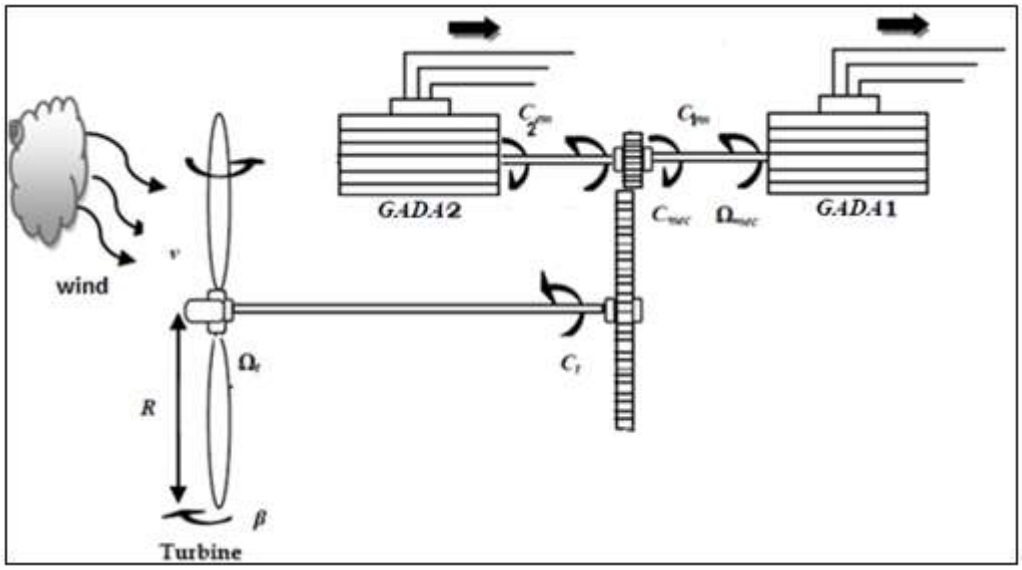


Figure 4. 1. Schéma du modèle d'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA.

4.3 Modélisation d'un système éolien basé sur deux génératrices GADA

4.3.1 Modélisation du vent

La vitesse du vent est modélisée sous forme déterministe par une somme de différentes harmoniques comme montré dans le chapitre précèdent:

$$V(t) = 8 + 0.2\sin(0.1047.t) + 2\sin(0.2665.t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \qquad (4.1)$$

4.3.2 Modélisation de la turbine

La technologie de l'éolienne est utilisée pour convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par l'intermédiaire d'une éolienne. Le dispositif étudié dans ce travail est constitué par une éolienne d'une puissance nominale 8MW, ayant un rayon des pales 78m et entraînant deux génératrices à travers le multiplicateur. La vitesse spécifique est définie comme étant le rapport entre la vitesse angulaire mécanique, le rayon de la turbine et la vitesse du vent comme suit:

$$\lambda = \frac{\Omega_{tur} R}{V} \qquad (4.2)$$

Le « coefficient de puissance » décrit l'efficacité avec laquelle une éolienne convertit l'énergie éolienne cinétique en énergie électrique. Ceci est donné par la relation suivante [122, 123, 124]:

$$C_p(\lambda,\beta)=0{,}5176\left(\left(\left(\frac{116}{\lambda_i}\right)-0{,}4\beta-5\right)e^{\left(\frac{21}{\lambda_i}\right)}+0{,}0068\lambda\right) \quad (4.3)$$

Où λ_i est donné par:

$$\frac{1}{\lambda_i}=\frac{1}{\lambda+0{,}08\beta}-\frac{0{,}035}{\beta^3+1} \quad (4.4)$$

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique présente dans le vent en énergie mécanique en utilisant le couple de production. L'énergie aérodynamique du vent peut être représentée par:

$$P_m=\frac{1}{2}\rho A V^3 \quad (4.5)$$

En utilisant l'énergie aérodynamique du vent, la puissance aérodynamique peut être produite par la turbine. Elle exprimée par [149, 150]:

$$P_v=\frac{1}{2}C_p(\lambda,\beta)\rho\pi R^2V^3 \quad (4.6)$$

Le couple aérodynamique sur l'axe lent est exprimé par [151]:

$$C_{aer}=\frac{P_{aer}}{\Omega_{tur}}=\frac{1}{2\Omega_{tur}}C_p(\lambda,\beta)\rho\pi R^2V^3 \quad (4.7)$$

4.3.3 Modélisation du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur de vitesse est de transformer la vitesse de la turbine en vitesse mécanique, et le couple aérodynamique en couple mécanique selon les formules mathématiques suivantes:

$$\Omega_{mec}=G\Omega_{tur} \quad (4.8)$$

Le couple sur l'axe lent est relié au couple sur l'axe rapide (côtés génératrice1 et génératrice2) par le coefficient du multiplicateur [127]:

$$C_{mec}=\frac{C_{aer}}{G} \quad (4.9)$$

C_{mec} : Couple mécanique appliqué sur l'arbre du génératrice1 et du génératrice2 (N.m);

C_{aer} : Couple aérodynamique appliqué sur l'arbre de turbine.

4.3.4 Modélisation de l'arbre mécanique

L'équation fondamentale de la dynamique du modèle d'arbre pour déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au génératrice1 et au génératrice2 est:

$$J_T\frac{d\Omega_{mec}}{dt}=\sum C=C_T-C_f \quad (4.10)$$

Inertie totale ramenée sur l'arbre, contenant les inerties de la turbine, de la génératrice1 et de la génératrice2 (Kg.m^2):

$$J_T = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_{génératrice1} + J_{génératrice2}$$

Le couple de frottement visqueux vaut : $C_f = f_v \Omega_{mec}$

f_v : est le coefficient dû aux frottements visqueux.

Le couple total, qui est égal à la somme des couples électromagnétique des deux génératrices et le couple mécanique, est donné par la relation suivante: $C_T = C_{mec} + C_{em1} + C_{em2}$

C_{em1} : est le couple électromagnétique du GADA1;

C_{em2} : est le couple électromagnétique du GADA2.

4.3.5 Modélisation de deux génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

La plupart des génératrices utilisées dans les systèmes de production d'énergie éolienne sont des génératrices asynchrones. Ils sont robustes et leur coût est relativement faible. Dans ce travail, nous nous intéresserons sur la génératrice asynchrone à double alimentation GADA, qui est la plus couramment utilisée dans les éoliennes tournant à vitesse variable.

Les équations électriques de deux génératrices GADA dans le plan stationnaire (abc) peuvent s'écrire:

$$\begin{cases} [V_{1sabc}] = [R_{1s}][I_{1sabc}] + \dfrac{d}{dt}[\phi_{1sabc}] \\ [V_{1rabc}] = [R_{1r}][I_{1rabc}] + \dfrac{d}{dt}[\phi_{1rabc}] \\ [V_{2sabc}] = [R_{2s}][I_{2sabc}] + \dfrac{d}{dt}[\phi_{2sabc}] \\ [V_{2rabc}] = [R_{2r}][I_{2rabc}] + \dfrac{d}{dt}[\phi_{2rabc}] \end{cases} \quad (4.11)$$

Où

$[V_{1sabc}] = \begin{bmatrix} V_{1sa} \\ V_{1sb} \\ V_{1sc} \end{bmatrix}$, $[V_{1rabc}] = \begin{bmatrix} V_{1ra} \\ V_{1rb} \\ V_{1rc} \end{bmatrix}$: sont les tensions triphasées du stator et du rotor respectivement de la première génératrice asynchrone à double alimentation GADA1.

$[V_{2sabc}] = \begin{bmatrix} V_{2sa} \\ V_{2sb} \\ V_{2sc} \end{bmatrix}$, $[V_{1rabc}] = \begin{bmatrix} V_{2ra} \\ V_{2rb} \\ V_{2rc} \end{bmatrix}$: sont les tensions triphasées du stator et du rotor respectivement de la deuxième génératrice asynchrone à double alimentation GADA2.

$[I_{1sabc}], [I_{1rabc}], [I_{2sabc}]$ et $[I_{2rabc}]$: sont les courants statoriques et rotoriques triphasés du GADA1 et GADA2 respectivement;

$[\phi_{1sabc}],[\phi_{1rabc}]$, $[\phi_{1sabc}]$ et $[\phi_{1rabc}]$: sont les flux triphasés du stator et du rotor du GADA1 et GADA2 respectivement;

$$[R_{1s}]=\begin{bmatrix} r_{1s} & 0 & 0 \\ 0 & r_{1s} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1s} \end{bmatrix},\ [R_{1r}]=\begin{bmatrix} r_{1r} & 0 & 0 \\ 0 & r_{1r} & 0 \\ 0 & 0 & r_{1r} \end{bmatrix},\ [R_{2s}]=\begin{bmatrix} r_{2s} & 0 & 0 \\ 0 & r_{2s} & 0 \\ 0 & 0 & r_{2s} \end{bmatrix} \text{ et } [R_{2r}]=\begin{bmatrix} r_{2r} & 0 & 0 \\ 0 & r_{2r} & 0 \\ 0 & 0 & r_{2r} \end{bmatrix}$$

$[R_{1s}]$ et $[R_{1r}]$: sont respectivement les matrices de résistance du stator et du rotor du GADA1 ;
$[R_{2s}]$ et $[R_{2r}]$: sont respectivement les matrices de résistance du stator et du rotor du GADA2.

Les équations magnétiques de deux génératrices GADA dans le plan triphasé (abc) sont exprimées en fonction des courants à l'aide des différentes inductances:

$$\begin{cases} [\phi_{1sabc}]=[L_{1ss}].[I_{1sabc}]+[M_{1sr}].[I_{1rabc}] \\ [\phi_{1rabc}]=[L_{1rr}].[I_{1rabc}]+[M_{1rs}].[I_{1sabc}] \\ [\phi_{2sabc}]=[L_{2ss}].[I_{2sabc}]+[M_{2sr}].[I_{2rabc}] \\ [\phi_{2rabc}]=[L_{2rr}].[I_{2rabc}]+[M_{2rs}].[I_{2sabc}] \end{cases} \quad (4.12)$$

En remplaçant les équations (4.11) dans les équations (4.12), on obtient le système d'équations ci-dessous:

$$\begin{cases} [V_{1sabc}]=[R_{1s}].[I_{1sabc}]+\dfrac{d}{dt}[[L_{1ss}].[I_{1sabc}]+[M_{1sr}].[I_{1rabc}]] \\ [V_{1rabc}]=[R_{1r}].[I_{1rabc}]+\dfrac{d}{dt}[[L_{1rr}].[I_{1rabc}]+[M_{1rs}].[I_{1sabc}]] \\ [V_{2sabc}]=[R_{2s}].[I_{2sabc}]+\dfrac{d}{dt}[[L_{2ss}].[I_{2sabc}]+[M_{2sr}].[I_{2rabc}]] \\ [V_{2rabc}]=[R_{2r}].[I_{2rabc}]+\dfrac{d}{dt}[[L_{2rr}].[I_{2rabc}]+[M_{2rs}].[I_{2sabc}]] \end{cases} \quad (4.13)$$

Le système d'équations fondamentales des couples mécaniques de deux génératrices GADA s'écrit par:

$$\begin{cases} C_{em1}=C_{1r}+f_{1r}\Omega+J\dfrac{d\Omega}{d\theta} \\ C_{em2}=C_{2r}+f_{2r}\Omega+J\dfrac{d\Omega}{d\theta} \end{cases} \quad (4.14)$$

C_{em1} et C_{em2}: sont les couples électromagnétiques du GADA1 et GADA2;

C_{1r} et C_{2r} : sont les couples résistants de GADA1 et GADA2;

f_{1r} et f_{2r} : sont les coefficients de frottement de GADA1 et GADA2;

Ω : est la vitesse de rotation angulaire du deux génératrices (rad/sec) ou (r/min);

J : est l'inertie totale qui apparaît sur les deux génératrices.

Les équations du couples électromagnétiques peuvent s'écrire sous la forme:

$$\begin{cases} C_{1em} = p[I_{1sabc}]^t \dfrac{d}{d\theta}[[M_{1sr}][I_{1rabc}]] \\ C_{2em} = p[I_{2sabc}]^t \dfrac{d}{d\theta}[[M_{2sr}][I_{2rabc}]] \end{cases} \quad (4.15)$$

p : est le nombre de paires de pôles de chaque génératrice (GADA1 et GADA2).

La transformation de Park permet de passer d'un plan triphasé (abc) à un plan diphasé (dq) et donc de réduire le nombre d'équations. On obtient les équations électriques suivantes:

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1} I_{ds1} + \dfrac{d\phi_{ds1}}{dt} - \omega_s \phi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_{s1} I_{qs1} + \dfrac{d\phi_{qs1}}{dt} - \omega_s \phi_{ds1} \\ V_{dr1} = R_{r1} I_{dr1} + \dfrac{d\phi_{dr1}}{dt} - \omega_r \phi_{qr1} \\ V_{qr1} = R_{r1} I_{qr1} + \dfrac{d\phi_{qr1}}{dt} - \omega_r \phi_{dr1} \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} V_{ds2} = R_{s2} I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds2}}{dt} - \omega_s \phi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_{s2} I_{qs} + \dfrac{d\phi_{qs2}}{dt} - \omega_s \phi_{ds2} \\ V_{dr2} = R_{r2} I_{dr} + \dfrac{d\phi_{dr2}}{dt} - \omega_r \phi_{qr2} \\ V_{qr2} = R_{r2} I_{qr2} + \dfrac{d\phi_{qr2}}{dt} - \omega_r \phi_{dr2} \end{cases} \quad (4.17)$$

Les équations magnétiques dans le plan biphasé (dq) sont :

$$\begin{cases} \phi_{ds1} = L_{s1} I_{ds1} + M I_{dr1} \\ \phi_{qs1} = L_{s1} I_{qs1} + M I_{qr1} \\ \phi_{dr1} = L_{r1} I_{dr1} + M I_{ds1} \\ \phi_{qr1} = L_{r1} I_{qr1} + M I_{qs1} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} \phi_{ds2} = L_{s2} I_{ds2} + M I_{dr2} \\ \phi_{qs2} = L_{s2} I_{qs2} + M I_{qr2} \\ \phi_{dr2} = L_{r2} I_{dr2} + M I_{ds2} \\ \phi_{qr2} = L_{r2} I_{qr2} + M I_{qs2} \end{cases} \quad (4.19)$$

où: $\omega_r = \omega_s - \omega, \quad \omega = p\Omega$

$V_{ds1/2}, V_{qs1/2}, V_{dr1/2}$ et $V_{qr1/2}$: sont les tensions directes statoriques et rotoriques dans le plan diphasé (dq) pour les deux génératrices GADA1 et GADA2;

$I_{ds1/2}, I_{qs1/2}, I_{dr1/2}$ et $I_{qr1/2}$: sont les courants continus statoriques et rotoriques dans le plan diphasé (dq) pour les deux génératrices GADA et GADA2;

$\phi_{ds1/2}, \phi_{qs1/2}, \phi_{dr1/2}$ et $\phi_{qr1/2}$: sont les flux directs statoriques et rotoriques dans le plan dans le plan diphasé (dq) pour les deux génératrices GADA1/2;

ω_s, ω_r : sont la fréquence angulaire du stator en (rad/s) et la vitesse angulaire du rotor en (rad/s) pour les deux génératrices GADA1 et GADA2.

L'expression des couples électromagnétiques sont données sous les formes suivantes :

$$\begin{cases} C_{em1} = -P\dfrac{M}{L_{r1}}\left(\phi_{dr1}I_{qs1} - \phi_{qr1}I_{ds1}\right) \\ C_{em1} = P\dfrac{M}{L_{s1}}\left(\phi_{ds1}I_{qr1} - \phi_{qs1}I_{dr1}\right) \\ C_{em2} = -P\dfrac{M}{L_{r2}}\left(\phi_{dr2}I_{qs2} - \phi_{qr2}I_{ds2}\right) \\ C_{em2} = P\dfrac{M}{L_{s2}}\left(\phi_{ds2}I_{qr2} - \phi_{qs2}I_{dr2}\right) \end{cases} \quad (4.20)$$

Les équations des puissances statoriques actives et réactives des deux génératrices GADA1 et GADA2 dans le plan tournant d-q sont représentées par les formules suivantes:

$$\begin{cases} P_{s1} = -\left(I_{ds1}V_{ds1} + I_{qs1}V_{qs1}\right) \\ Q_{s1} = -\left(I_{ds1}V_{qs1} - I_{qs1}V_{ds1}\right) \\ P_{s2} = -\left(I_{ds2}V_{ds2} + I_{qs2}V_{qs2}\right) \\ Q_{s2} = -\left(I_{ds2}V_{qs2} - I_{qs2}V_{ds2}\right) \end{cases} \quad (4.21)$$

P_{s1}, P_{s2}: sont les puissances actives du stator de GADA1 et GADA2;

Q_{s1}, Q_{s2} : sont les puissances réactives du stator de GADA1 et GADA2.

Les équations mathématiques pour calculer les puissances actives et réactives du côté rotor sont représentées par les formules suivantes:

$$\begin{cases} P_{r1} = \left(I_{qr1}V_{qr1} + I_{dr1}V_{dr1}\right) \\ Q_{r1} = -\left(I_{dr1}V_{qr1} - I_{qr1}V_{dr1}\right) \\ P_{r2} = \left(I_{qr2}V_{qr2} + I_{dr2}V_{dr2}\right) \\ Q_{r1} = -\left(I_{dr2}V_{qr2} - I_{qr2}V_{dr2}\right) \end{cases} \quad (4.22)$$

P_{r1}, P_{r2} : sont les puissance active du rotor de GADA1 et GADA2;

Q_{r1}, Q_{r2}: sont les puissance active du rotor de GADA1 et GADA2.

4.3.6 Commande vectorielle de deux génératrices GADA

4.3.6.1 Principe de la commande vectorielle de la génératrice GADA

Le choix de la référence Park (dq) avec l'orientation du flux statorique ou avec l'orientation du flux rotorique permet de créer un découplage naturel des grandeurs d et q. Ceci permet de considérer la machine asynchrone comme une association mécanique de deux moteurs à courant continu [152, 153, 154]. L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leurs comportements statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée, il s'agit donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux (figure (4.2)), naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans ce travail, nous utiliserons deux méthodes de contrôle vectoriel en puissances statoriques directe et indirecte.

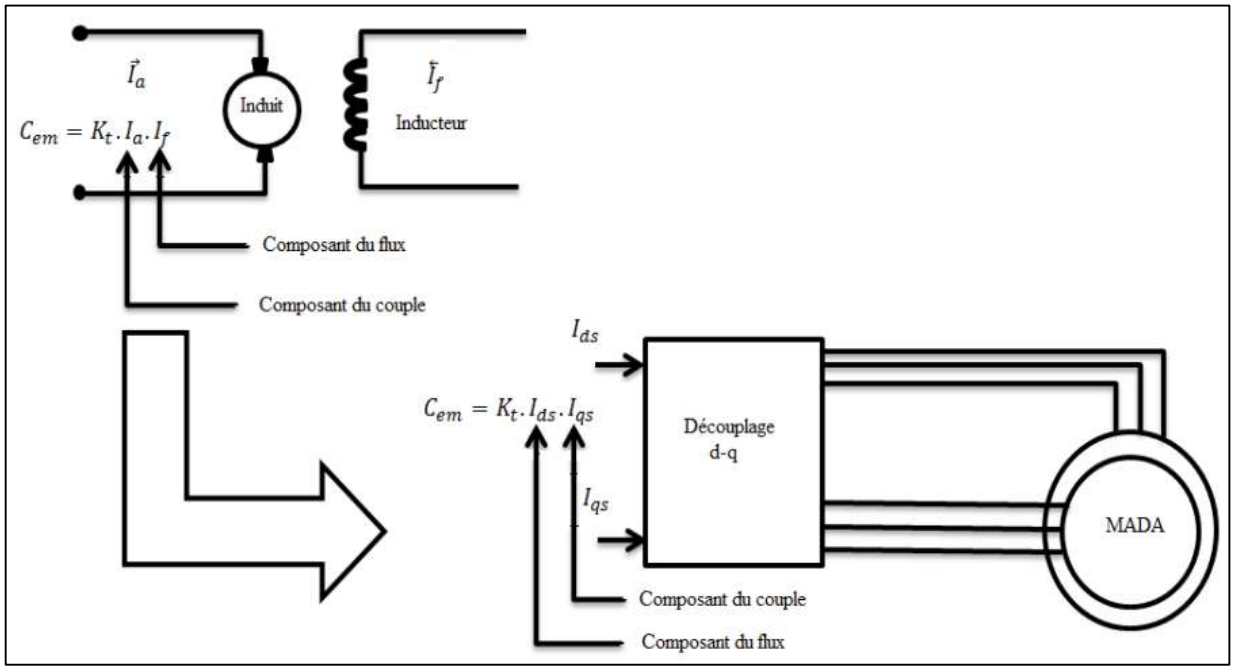


Figure 4. 2. Principe de la commande vectorielle.

4.3.6.2 Orientation du flux

Dans ce travail, nous avons établi les équations de la génératrice GADA dans le repère (dq) lié au champ tournant (figure (4.3)). Ce choix facilite la réalisation du découplage entre le flux et le couple, pour réaliser ce découplage, il faut orienter le repère (dq), c'est-à-dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple soit imposée.

Il existe trois types d'orientation du flux:

• Orientation du flux statorique avec les conditions : $\phi_{qs} = 0$ et $\phi_{ds} = \phi_s$.

• Orientation du flux rotorique avec les conditions : $\phi_{qr} = 0$ et $\phi_{dr} = \phi_r$.

• Orientation du flux d'entrefer avec les conditions : $\phi_{qg} = 0$ et $\phi_{dg} = \phi_g$.

Avec :

ϕ_{qg} : Flux d'entrefer d'axe quadratique;

ϕ_{dg} : Flux d'entrefer d'axe direct;

ϕ_g : Flux d'entrefer nominal.

Dans ce travail, nous utiliserons la commande vectorielle à flux statorique orienté. L'avantage de cette stratégie réside dans le faite que le système est peu sensible à la variation des inductances de la machine. En revanche, elle dépend de la variation de la résistance statorique. A basse tension, cette dernière tend à réduire la précision de l'estimation du flux.

Nous avons choisi deux phases d-q liées au référentiel tournant, et le flux statorique est orienté selon l'axe d [155, 156], l'expression du flux devient:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \tag{4.23}$$

Le référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique est donné dans la figure (4.3).

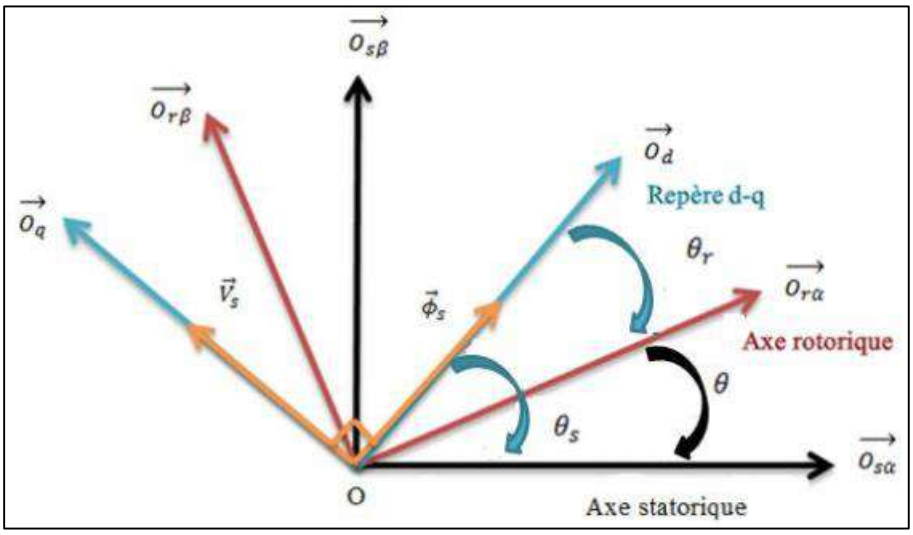


Figure 4. 3. Référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant statorique.

On applique la technique d'orientation du flux statorique sur les modèles de deux génératrices GADA étudiées en orientant le repère de Park pour que le flux ϕs soit aligné en permanence avec l'axe d, sa composante quadratique est donc nulle et la commande est telle que le flux ϕs est maintenu constant. Dans ce cas, les équations de flux sont exprimées comme suit:

$$\begin{cases} 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{dr} = \sigma L_r I_{dr} + \dfrac{M}{L_s}\phi_{ds} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \dfrac{M}{L_s}\phi_s \\ \phi_{qr} = \sigma L_r I_{qr} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (4.24)$$

Le coefficient de dispersion vaut : $\sigma = 1 - \dfrac{M^2}{L_s L_r}$

En supposant que la résistance statorique est négligeable et que le régime est permanent, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} \approx 0 \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \phi_{ds} = V_s \approx \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (4.25)$$

Les tensions rotoriques peuvent être exprimées en fonction des courants rotoriques:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{dI_{dr}}{dt} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \omega_r I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \dfrac{dI_{qr}}{dt} - \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s} \right) \omega_r I_{dr} + \omega_r \dfrac{M}{L_s} \phi_s \end{cases} \quad (4.26)$$

L'adaptation des équations actives et réactives précédentes au point de plan choisi et les hypothèses simplificatrices effectuées donne [106, 145]:

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \dfrac{\phi_s}{L_s} - V_s \dfrac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (4.27)$$

Les équations des couples électromagnétiques des deux génératrices devient alors:

$$\begin{cases} C_{em1} = P\left(\phi_{1ds} I_{1qs} - \phi_{1qs} I_{1ds} \right) = -P\phi_{1ds} \dfrac{M1}{L_{1s}} I_{1qr} \\ C_{em2} = P\left(\phi_{2ds} I_{2qs} - \phi_{2qs} I_{2ds} \right) = -P\phi_{2ds} \dfrac{M2}{L_{2s}} I_{2qr} \end{cases} \quad (4.28)$$

Les équations du système électrique peuvent être représentées dans un schéma fonctionnel à l'aide de Matlab/Simulink. La figure (4.4) montre la modélisation des équations de la génératrice GADA1 en utilisant des fonctions de transfert du premier ordre pour les tensions. La commande vectorielle sera implémentée plus tard, considérant que la valeur de glissement g est négligeable et que l'effet du couplage est faible.

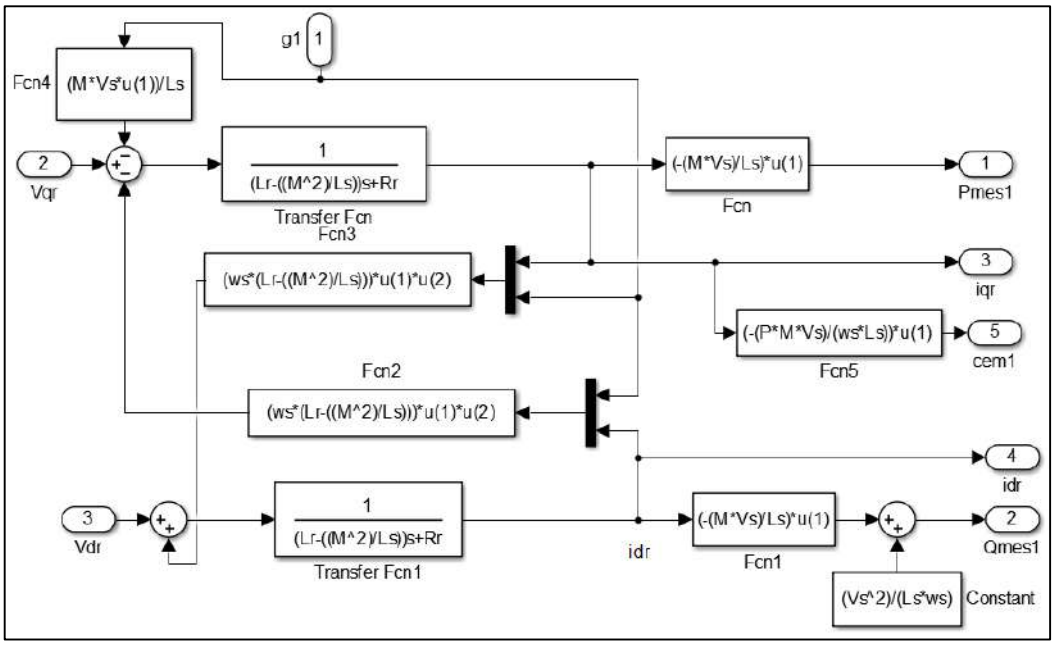


Figure 4. 4. Schéma conventionnel du contrôle vectoriel de la génératrice GADA1.

Il existe deux approches possibles :

• La méthode directe (en anglais : **D**irect **F**ield **O**riented **C**ontrol ou **DFOC**).
• La méthode indirecte (en anglais : **I**ndirect **F**ield **O**riented **C**ontrol ou **IFOC**)

4.3.6.3 Commande vectorielle directe en puissances active et réactive de la génératrice GADA

En contrôle vectoriel direct, l'idée de régulation consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances P_s et Q_s de la génératrice GADA, et cette première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la génératrice [131]. Dans la synthèse des régulateurs proportionnel-intégral (PI), la boucle de contrôle du puissance statorique est donnée par la figure (4.5), et le schéma conventionnel du contrôle vectoriel direct est donné par la figure (4.6).

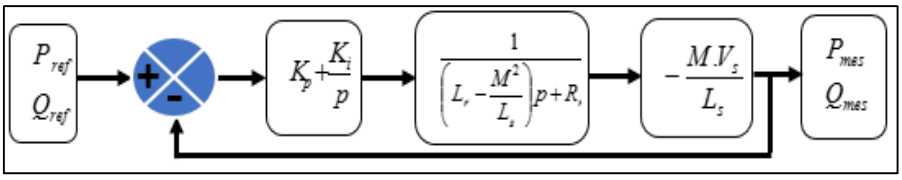


Figure 4. 5. Boucle de contrôle de la puissance statorique

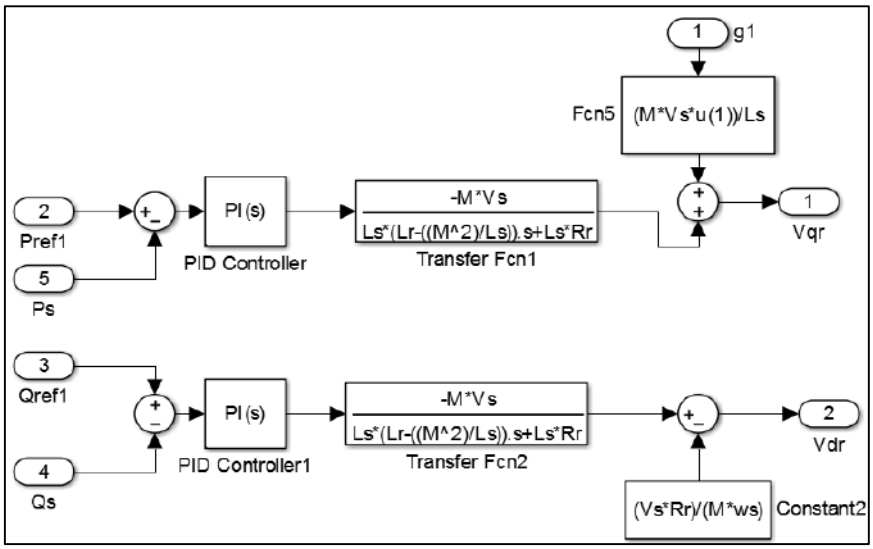


Figure 4. 6. Schéma conventionnel de contrôle direct en puissances active et réactive à l'aide du contrôleur PI

À partir de la fonction de transfert, on peut calculer les deux paramètres de chaque régulateur PI. Les détails du calcul pour chaque régulateur PI sont présentés dans l'annexe2.

4.3.6.4 Commande vectorielle indirecte en puissances active et réactive de la génératrice GADA

Cette méthode de commande prend les termes de couplage croisé et les compense, en effectuant une commande découplée qui comprend deux boucles de courants rotoriques. Nous nous sommes intéressons dans ce travail à ajouter un régulateur PI dans chaque boucle, où les références sont déduites directement des puissances machines imposées. Cette méthode utilisant les correcteurs proportionnels-intégraux consiste en deux boucles de contrôle [157]. La première boucle sert à calculer les courants rotoriques de référence (I_{rq}^{*}, I_{rd}^{*}) et la deuxième boucle sert à déterminer les tensions rotoriques de référence (V_{rq}^{*}, V_{rd}^{*}). Dans la synthèse des régulateurs proportionnel-intégral (PI). La boucle de courant du rotor est donnée par la figure (4.7), et le schéma conventionnel du contrôle indirect est donné par la figure (4.8).

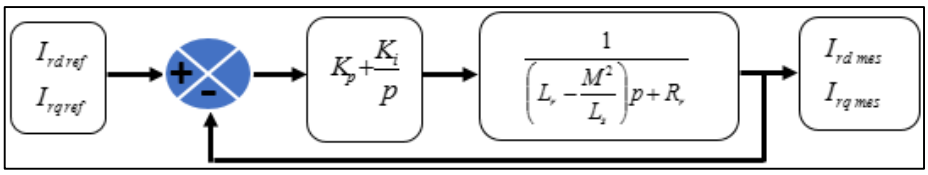


Figure 4. 7. Boucle de contrôle du courant du rotor

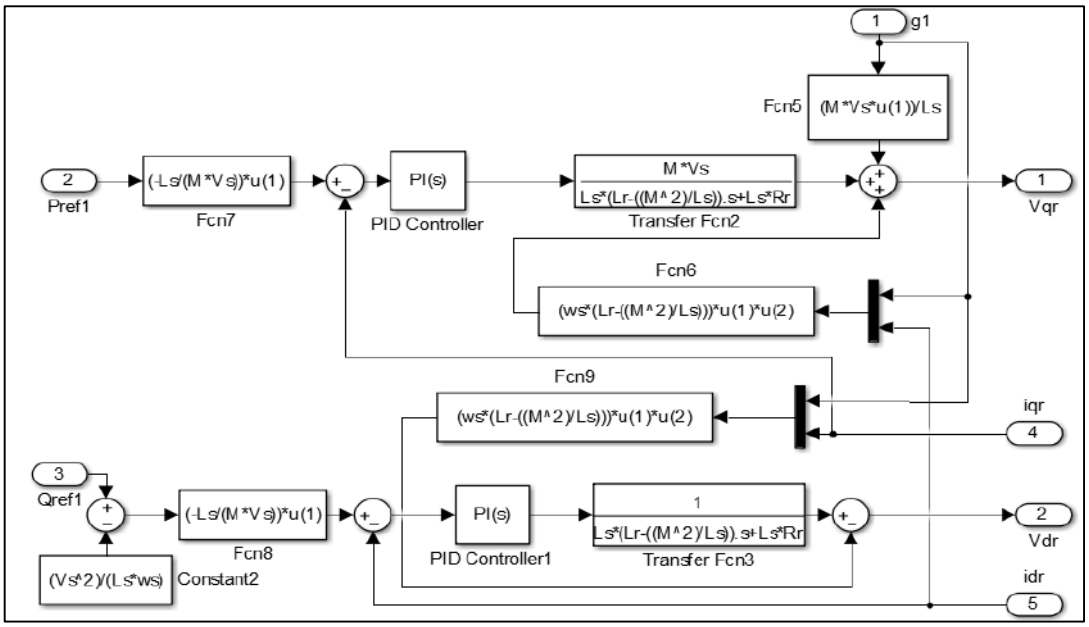


Figure 4. 8. Schéma conventionnel du contrôle vectoriel indirect en puissances active et réactive en boucle ouverte à l'aide du contrôleur PI.

À partir de la fonction de transfert, on peut calculer les deux paramètres de chaque régulateur PI. Les détails du calcul pour chaque régulateur PI sont présentés dans l'annexe2.

4.4 Résultats et discussion

Nous implémentons en détail ce nouveau système sous l'environnement de logiciel Matlab/Simulink (figure (4.9)). L'analyse du modèle proposé et une étude de ses performances seront réalisées en simulant de modèle simplifié. Ensuite, nous ferons une comparaison avec le modèle d'éolienne basé sur une seule génératrice GADA.

Le logiciel MATLAB/Simulink est utilisé pour déterminer l'évolution de divers paramètres tels que les puissances actives et réactives, les couples électromagnétiques, les courants rotoriques,….., etc. La référence de la puissance active fournie par le stator a la même allure que la puissance mécanique de la turbine qui varie en fonction de la variation du vent pour permettre à la turbine de fonctionner dans des conditions optimales. La référence de la puissance réactive sera fixée à 0 Var de manière à garder le facteur de puissance unitaire côté stator. Les paramètres utilisés pour le nouveau système proposé sont répertoriés dans les tableaux (4.1) et (4.2):

Tableau 4. 1. Paramètres de deux GADA

PN=8 MW	Vs=260/690 V	f=50 Hz	J=1000 Kg.m^2
P=2	Rs=0.012 Ω	Rr=0.021 Ω	fv=0.0024Nm/s
M=0.0135 H	Ls=0.0137 H	Lr=0.0136 H	

Tableau 4. 2. Paramètres de la turbine

Diamètre=78m
Gain G=110
Nombre de pales=2

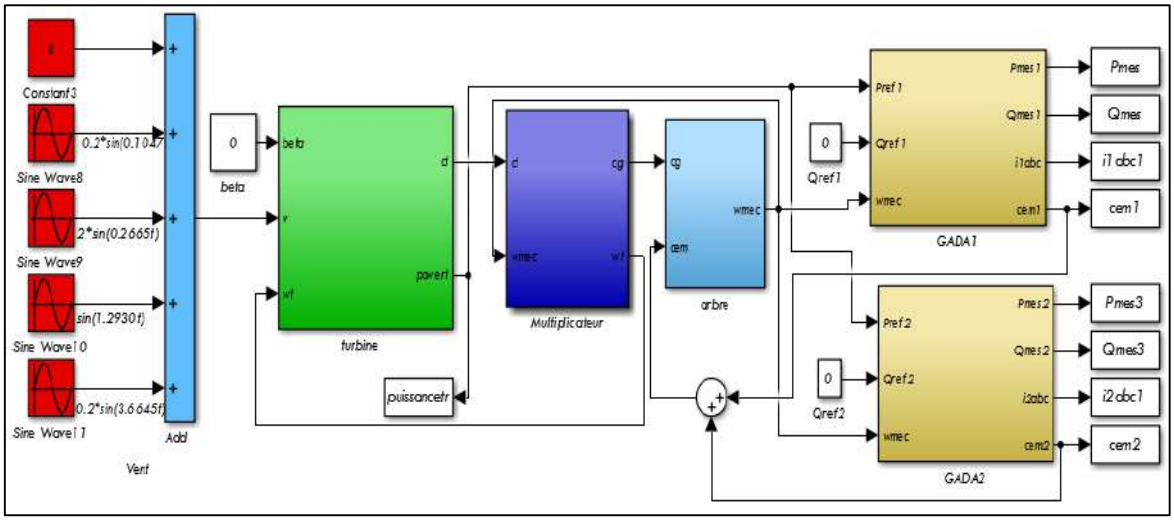


Figure 4. 9. Schéma conventionnel de l'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA.

4.4.1 Résultats de simulation de la partie aérodynamique et mécanique de notre nouveau système éolien basé sur deux GADA

Le schéma conventionnel illustré par la figure (4.10) représente le modèle de la chaîne complète de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique pour ce nouveau système éolien (partie aérodynamique et mécanique), obtenu en modélisant et regroupant les équations mathématiques présentées ci-dessus sous MATLAB/SIMULINK:

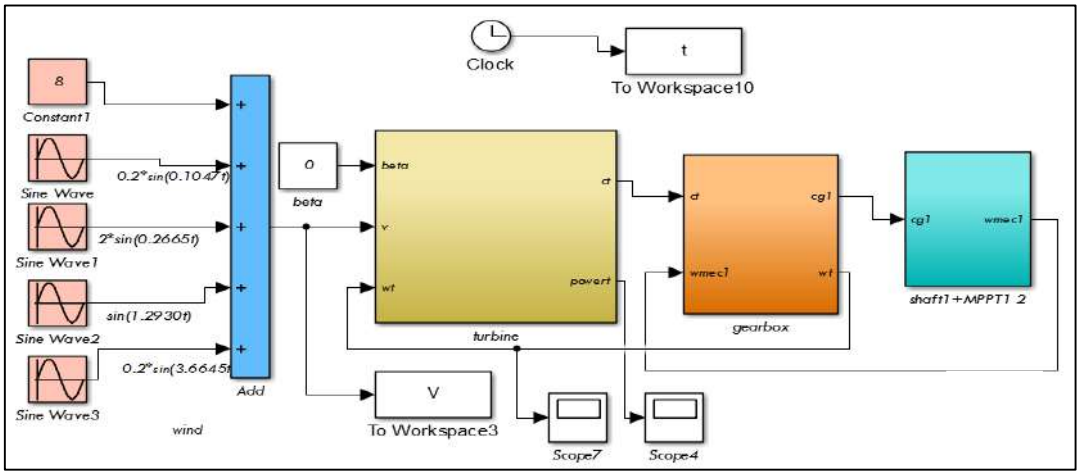


Figure 4. 10. Schéma conventionnel de la partie aérodynamique et mécanique de l'éolienne proposée.

Ces simulations ont été effectué en utilisant le profil du vent utilisé dans le chapitre précédent. Qui est un profil de vent aléatoire et varie entre 5 m/s et 11 m/s, comme le montre la figure (4.11).

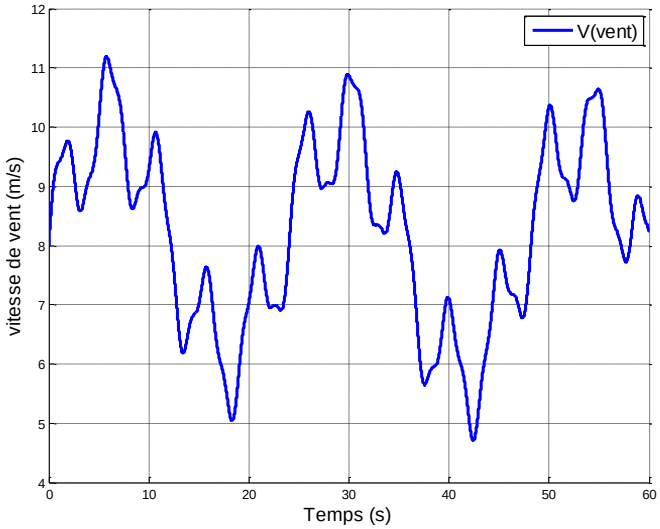


Figure 4. 11. Profil de vitesse du vent.

Les résultats de la simulation des performances ont été étudiés et sont présentés dans les figures (4.12) à figure (4.43). La figure (4.12) présente l'évolution du coefficient λ en fonction du temps, pour une vitesse de vent variable. Il a été observé que l'allure de la courbe prend toujours une allure croissante pendant le temps de démarrage puis oscille autour de la valeur (λ =8), ce qui montre bien l'influence du profil du vent sur le coefficient λ de la turbine.

Les figures (4.13), (4.14) et (4.15) montrent respectivement l'évolution du coefficient de puissance Cp, du couple mécanique et de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse de vent variable. On peut voir que ces paramètres augmentent toujours au premier instant, puis diminuent et commencent à osciller par la suite. Cela montre clairement l'influence du profil du vent sur les performances de l'éolienne. La vitesse spécifique et le coefficient de puissance varient proportionnellement à la vitesse du vent, ce qui montre la fiabilité du notre nouveau système éolien proposé.

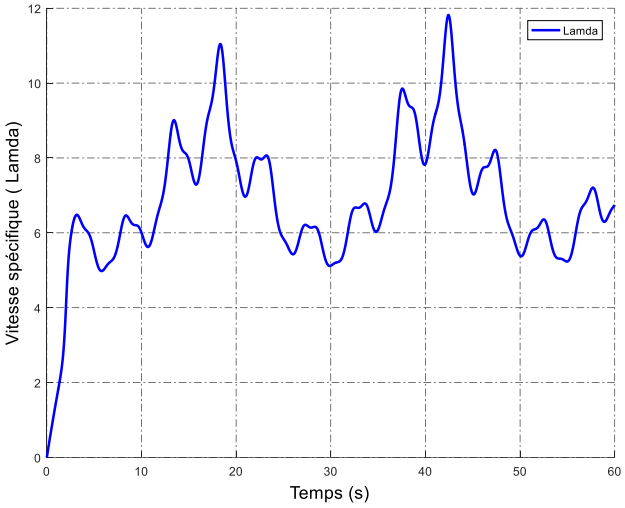


Figure 4. 12. Vitesse spécifique.

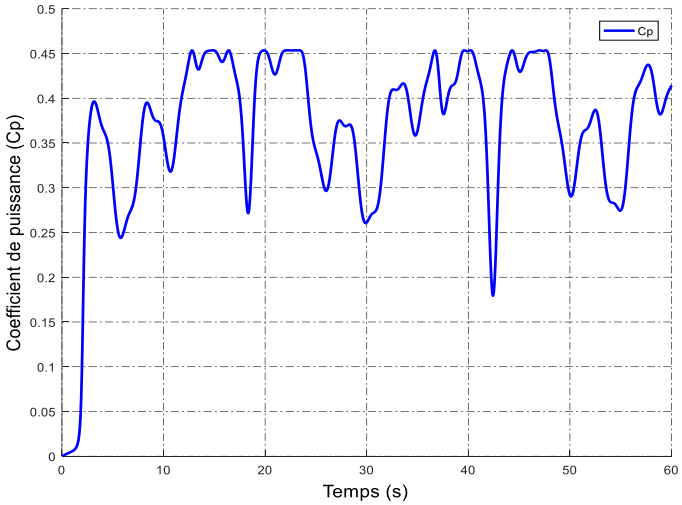


Figure 4. 13. Coefficient de puissance Cp.

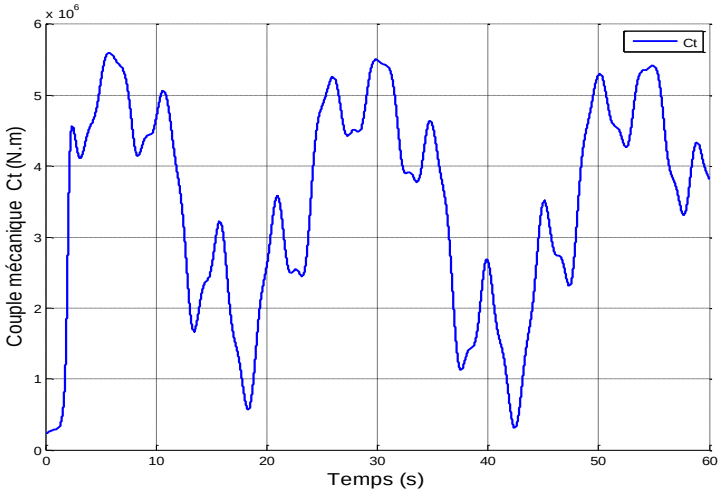


Figure 4. 14. Couple mécanique de l'éolienne Ct.

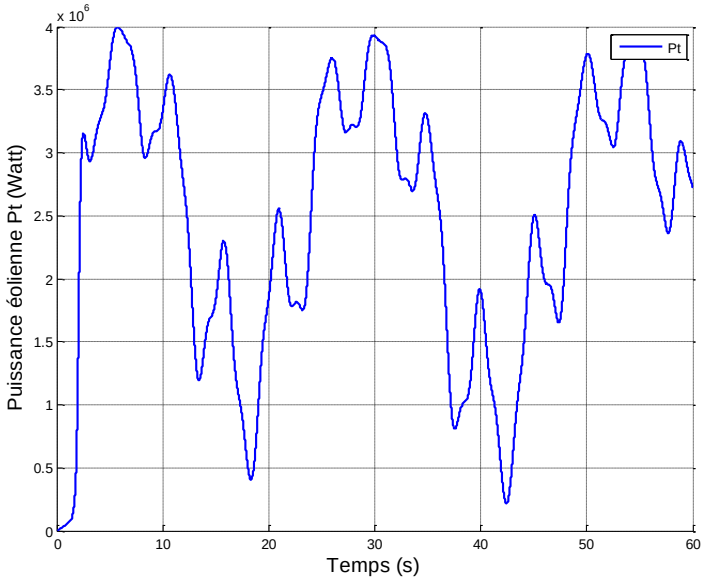


Figure 4. 15. Puissance éolienne Pt.

4.4.2 Résultats de simulation de notre nouvelle éolienne basée sur deux génératrices GADA

Cette partie du travail se concentre sur les deux méthodes de contrôle vectoriel direct (DFOC) et indirect (IFOC) pour les deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA de notre nouveau système éolien proposé pour améliorer les performances de notre système éolien proposé, sans oublier que les commandes étaient traitées avec une variation des paramètres des deux génératrices. Nous étudierons étudier les performances (suivi de consigne et robustesse). Pour la commande vectorielle nous avons utilisé le schéma de la commande indirect en boucle ouverte avec deux régulateurs PI des courants rotoriques Les simulations sont effectuées sous l'environnement de logiciel MATLAB /SIMULINK. L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus à partir de la simulation sont présentées, ainsi qu'une comparaison avec un travail de littérature basé sur un type différent de systèmes de contrôle du vent.

La commande directe est présentée sur la figure (4.16), et elle contient une seule boucle de commande pour chaque axe avec un correcteur PI. C'est-à-dire que les courants de rotation ne peuvent pas être contrôlés.

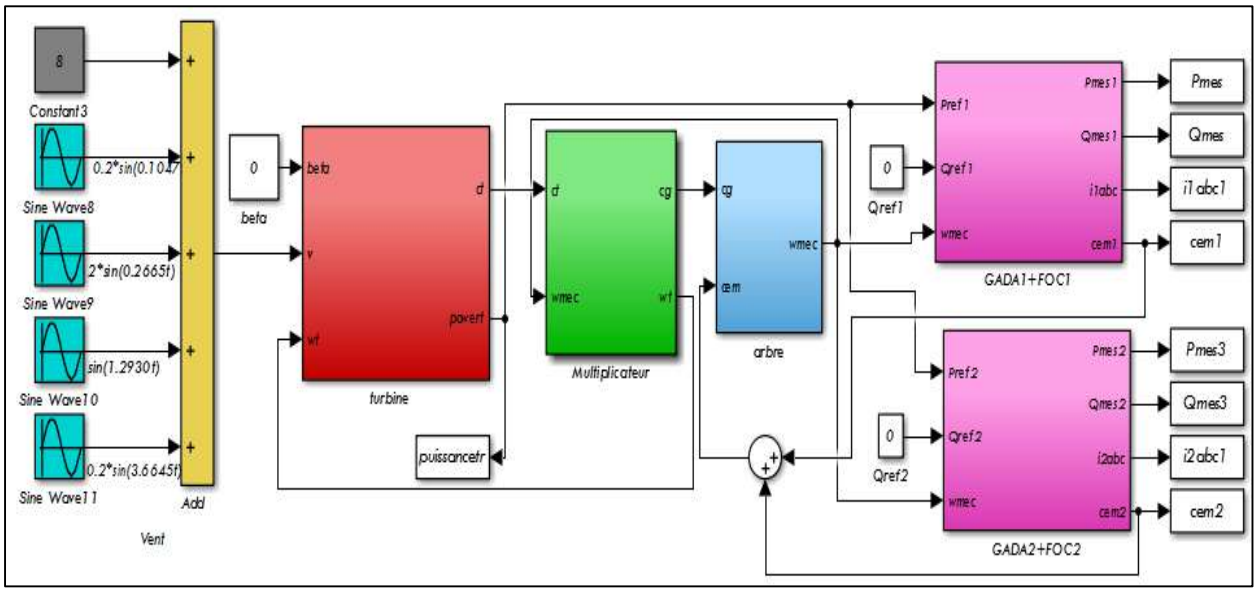


Figure 4. 16. Schéma conventionnel de l'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA à commande directe.

La commande indirecte est présentée sur la figure (4.17) et contient deux boucles de commande pour chaque axe, une boucle interne pour le contrôle des courants rotoriques et une boucle externe pour le contrôle des puissances.

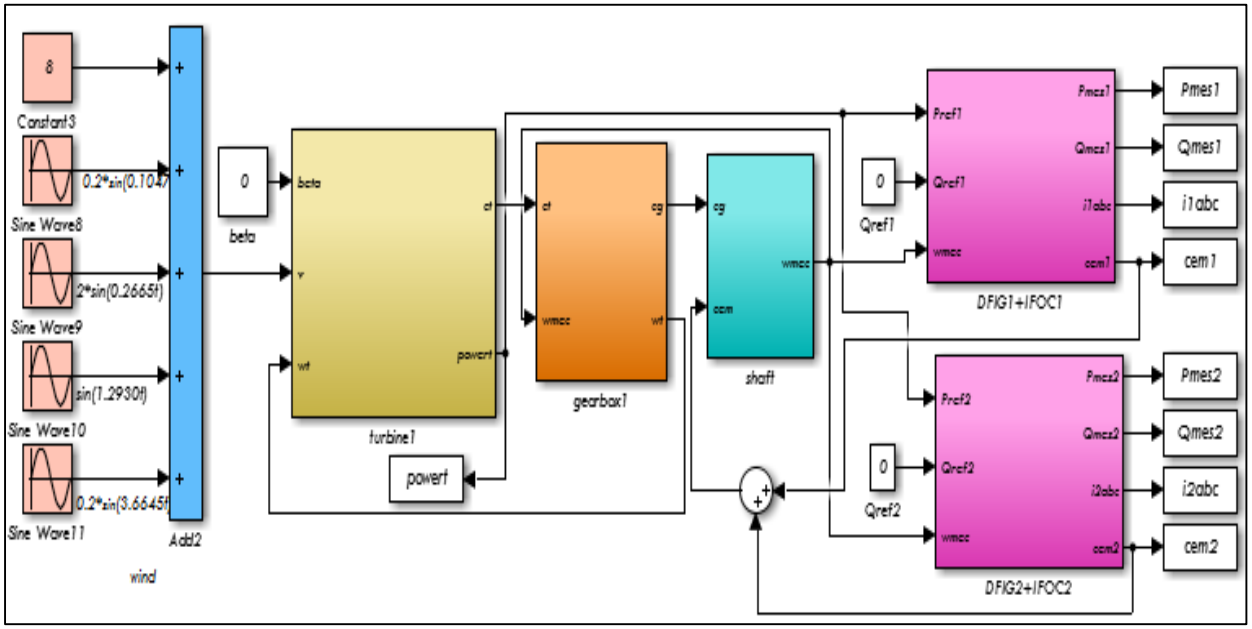


Figure 4. 17. Schéma conventionnel de l'éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA à commande indirecte.

4.4.2.1 Test de suivi de consigne

Ce test nous a permis de vérifier le découplage des puissances générées par les deux génératrices GADA. Les figures (4.18) à (4.29) montrent les résultats de simulation de la commande directe appliquée à deux génératrices GADA pour ce système éolien basé sur deux génératrices GADA.

Les figures (4.18), (4.19) et (4.20) montrent respectivement l'allure du couple électromagnétique de GADA1, de GADA2 et de modèle proposé. Pour les courbes de couple électromagnétique, les courbes atteignent leurs valeurs maximales puis commencent à osciller autour de leurs valeurs nominales. Les couples électromagnétiques de deux générateurs sont modifiés en fonction de la puissance de turbine qui dépend de la vitesse du vent. Le couple électromagnétique étant proportionnel, ayant la même allure que le vent.

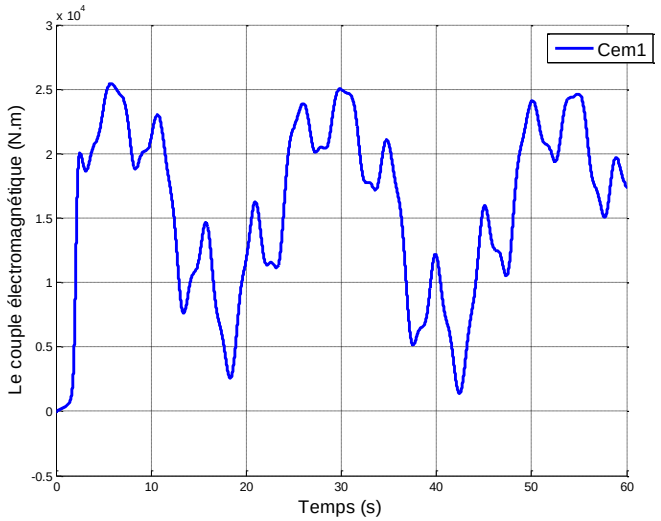


Figure 4. 18. Couple électromagnétique de la génératrice GADA1.

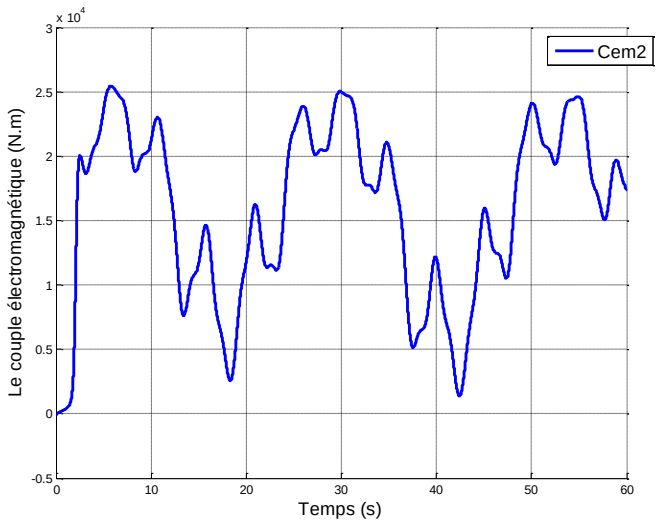


Figure 4. 19. Couple électromagnétique de la génératrice GADA2.

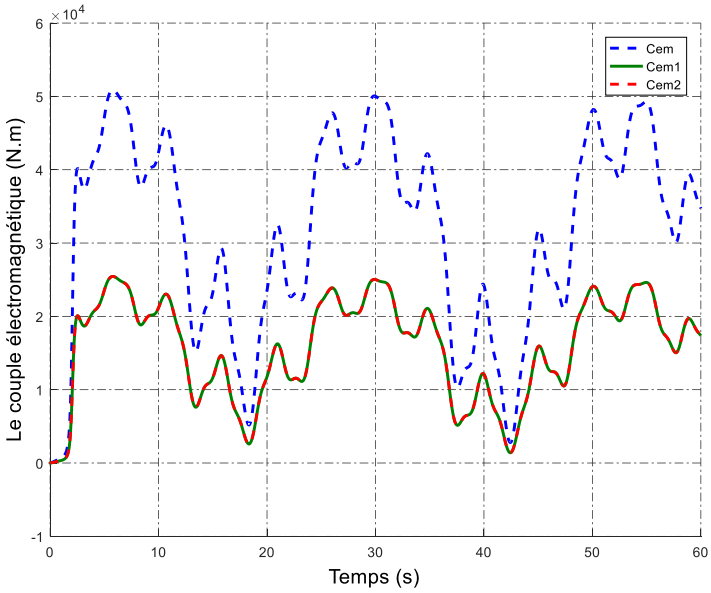


Figure 4. 20. Couple électromagnétique du modèle proposé, GADA1 et GADA2.

Les figures (4.21), (4.22) et (4.23) montrent les allures de la puissance active fournie par GADA1, GADA2 et le modèle proposé. On voit que ces puissances suivent leurs références. Cela s'explique par le contrôle vectoriel direct du courant du rotor. Par ailleurs, il a été constaté que la puissance active totale du modèle proposé (P_{mes}) est le double de la puissance active de chacune des deux génératrices GADA (P_{mes1} et P_{mes2}). Les puissances statorique suivent correctement leurs références générées par la turbine malgré les variations de la vitesse du vent à une fréquence de 50 Hz.

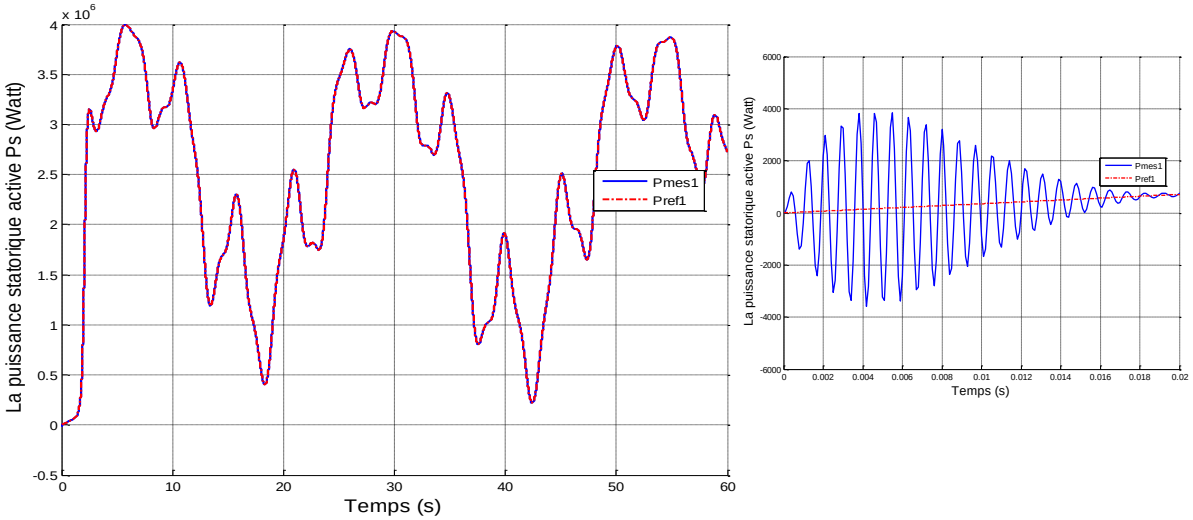


Figure 4. 21. Puissance statorique active de la génératrice GADA1.

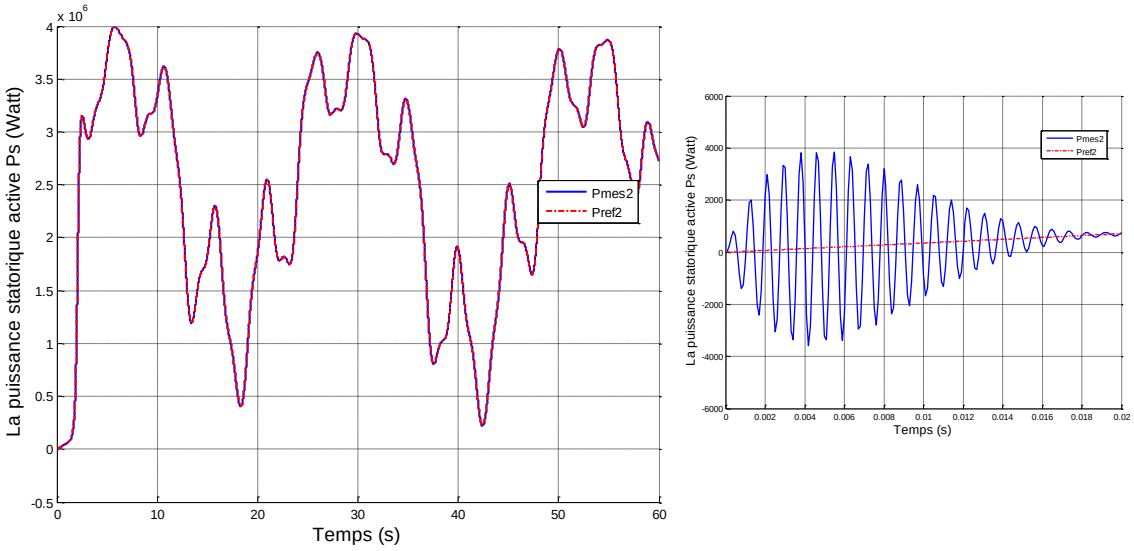


Figure 4. 22. Puissance statorique active de la génératrice GADA2.

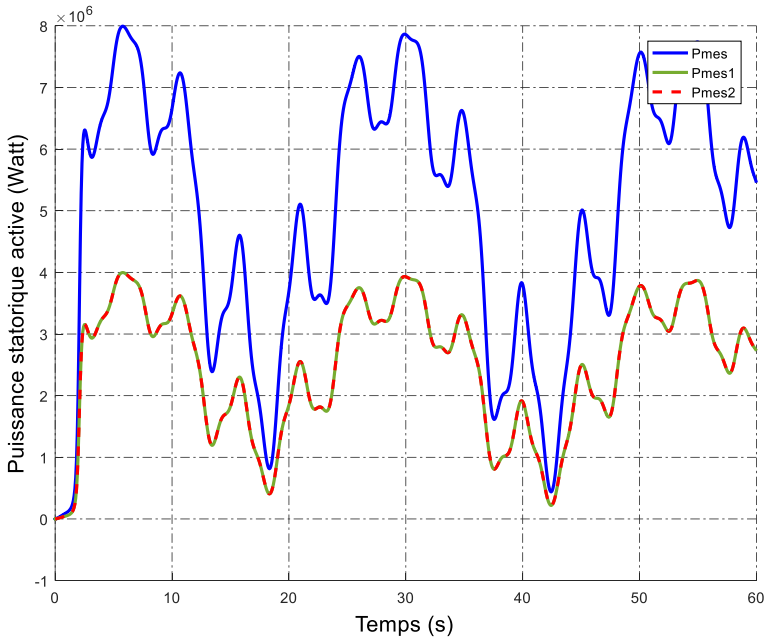


Figure 4. 23. Puissances statoriques actives du modèle proposé, GADA1 et GADA2.

Les figures (4.24), (4.25) et (4.26) montrent l'allure de la puissance réactive fournie par GADA1, GADA2 et le modèle proposé. On voit que les puissances réactives fournies par GADA1 et GADA2 suivent leurs références, et cela est dû au contrôle vectoriel direct du courant rotorique. La référence des puissances réactives (figures (4.24), (4.25) et (4.26)) est fixée à zéro pour avoir un facteur de puissance unitaire côté stator et améliorer la qualité de l'énergie électrique produite.

D'après les résultats obtenus, on peut remarquer que les consignes de puissance sont bien suivies leurs références pour les deux génératrices, mais avec une augmentation du temps de réponse, ce qui rend le système éolien robuste.

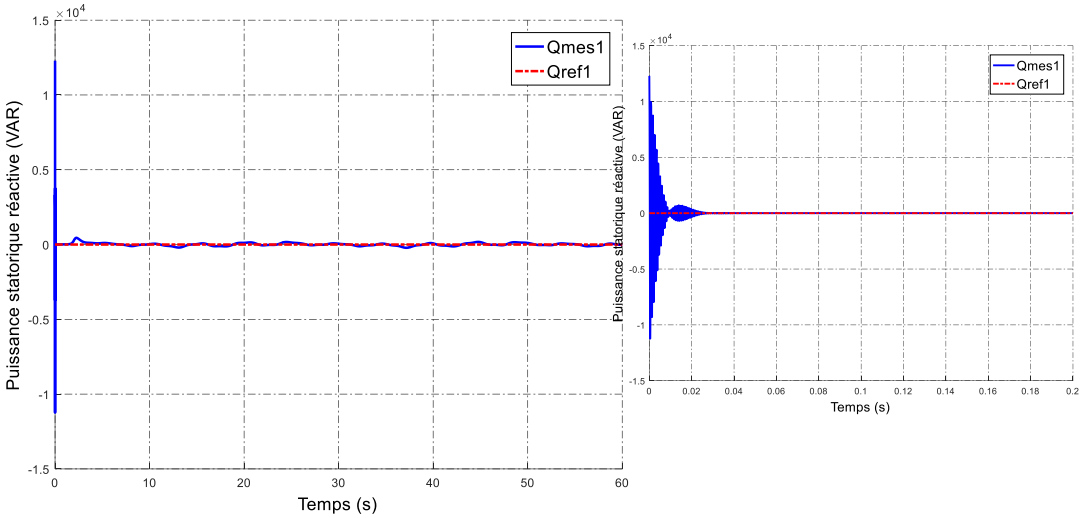


Figure 4. 24. Puissance réactive du stator de la génératrice GADA1.

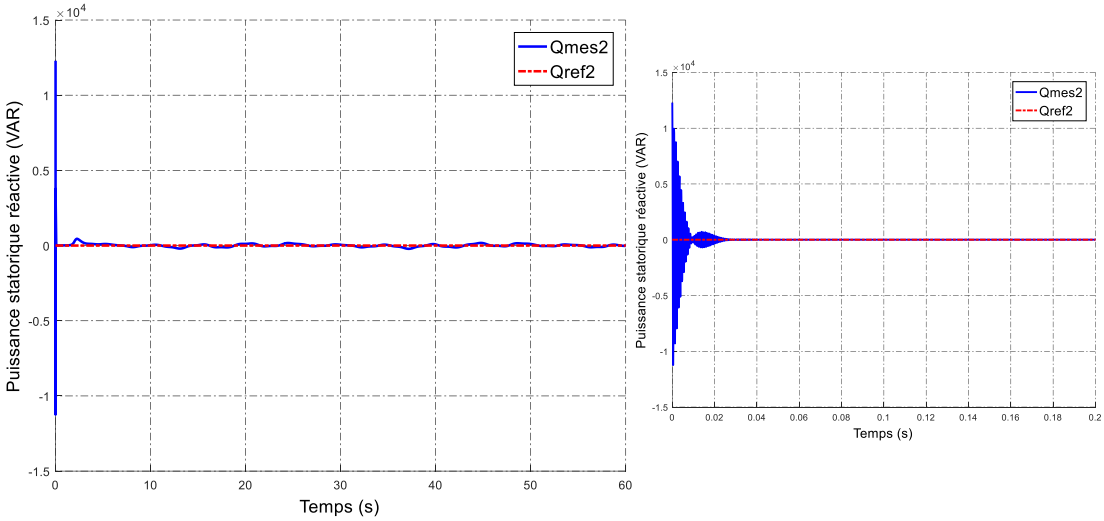


Figure 4. 25. Puissance réactive du stator de la génératrice GADA2.

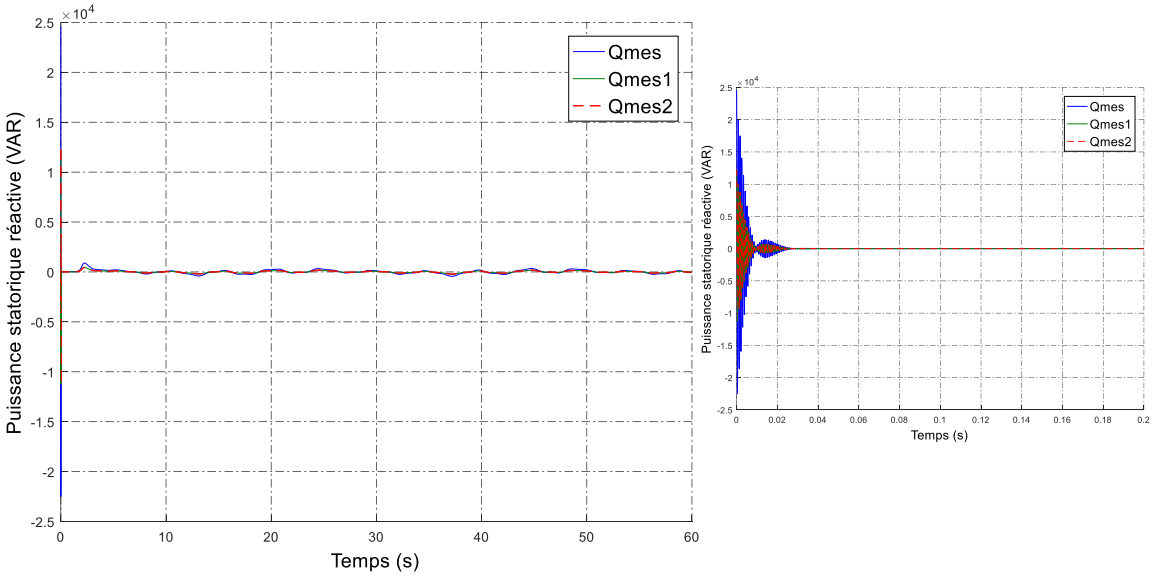


Figure 4. 26. Puissances réactives statoriques du modèle proposé, GADA1 et GADA2.

Les figures (4.27), (4.28) et (4.29) montrent que les courants rotoriques générés par GADA1, GADA2 et le modèle proposé pour les trois phases sont également sinusoïdaux avec (f=50Hz). Il a été noté que les courants rotoriques totaux du modèle proposé sont le double des courants rotoriques de chacune des deux génératrices GADA. Où l'on peut voir que les courants rotoriques sont sinusoïdaux avec les oscillations et on remarque aussi que l'amplitude des courants augmente avec l'augmentation de la puissance active. Les courants rotoriques varient suivant la variation de la vitesse du vent.

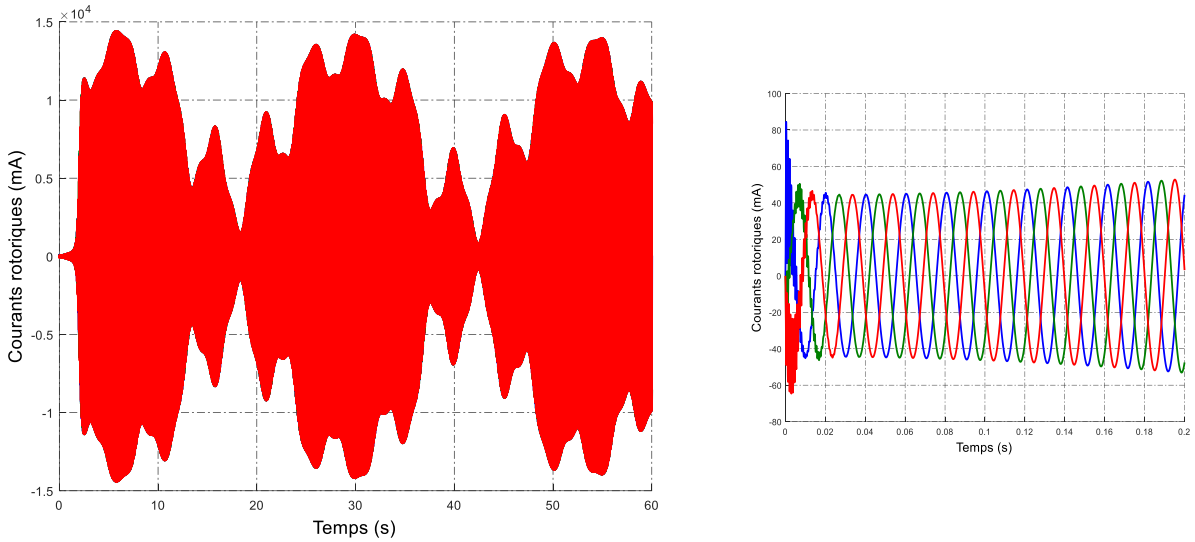


Figure 4. 27. Courants rotoriques de la génératrice GADA1.

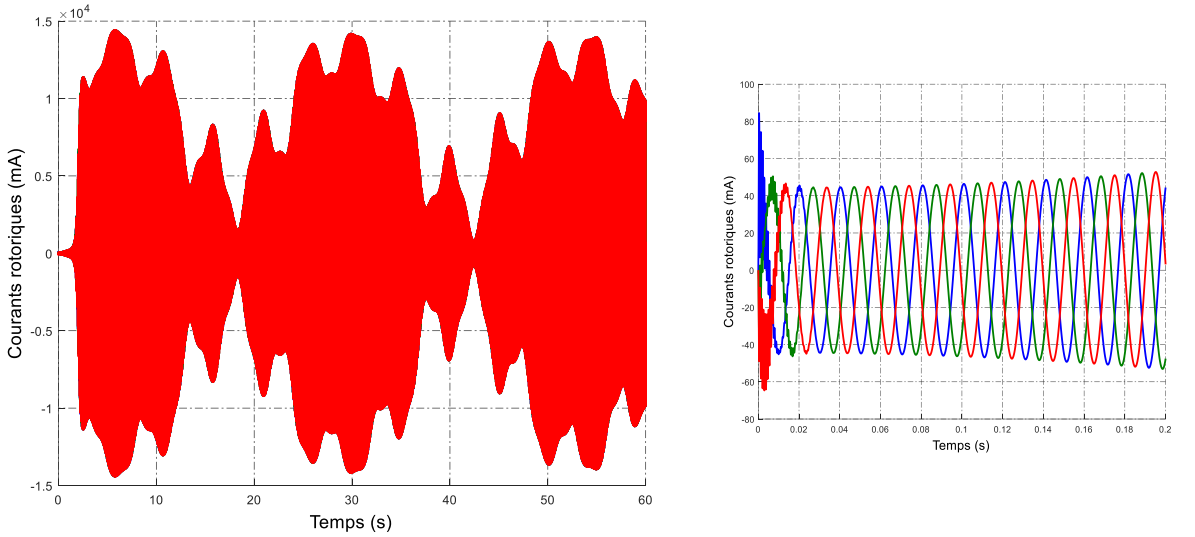


Figure 4. 28. Courants rotoriques de la génératrice GADA2.

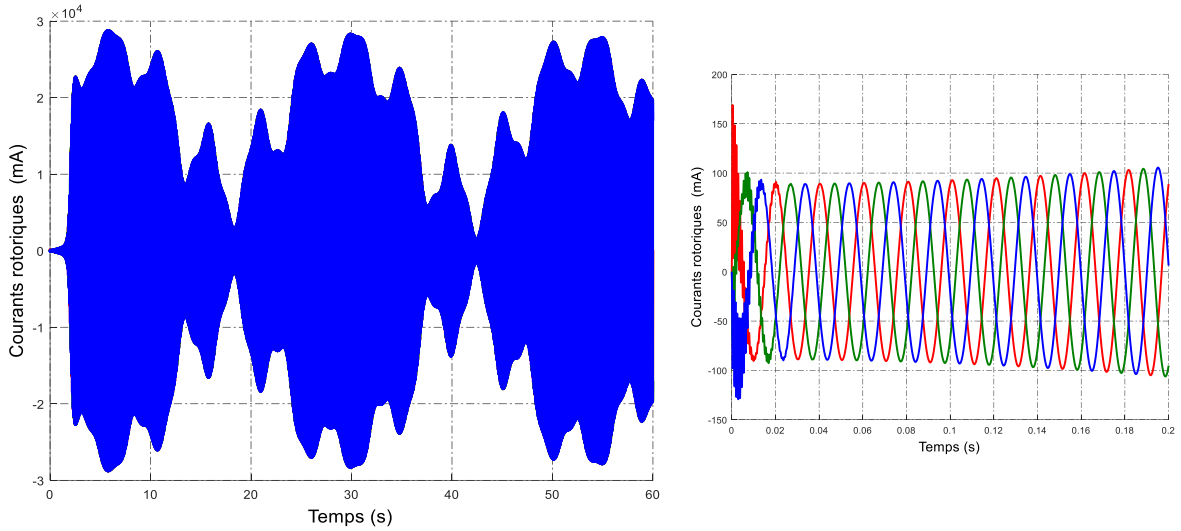


Figure 4. 29. Courants rotoriques du modèle propose.

On peut également noter que le couple électromagnétique est directement dépendant de la puissance active. Ceci est traduit par sa forme parfaitement semblable à celle de la puissance active. Dans ce cas, nous pouvons conclure que la puissance active est une conséquence du couple électromagnétique; alors que la puissance réactive est une conséquence de l'excitation du circuit rotorique.

Les figures (4.30) à (4.41) illustrent les résultats de simulation pour la commande indirecte appliquée à deux génératrices GADA pour ce système éolien basé sur deux génératrices GADA.

Les figures (4.30), (4.31) et (4.32) montrent l'allure du couple électromagnétique de GADA1, de GADA2 et de modèle proposé. Pour les allures de couple électromagnétique, les courbes atteignent leurs valeurs maximales puis commencent à osciller autour de leurs valeurs nominales. Les couples électromagnétiques de deux génératrices suites les mêmes variations du couple de la turbine qui dépend de la vitesse du vent.

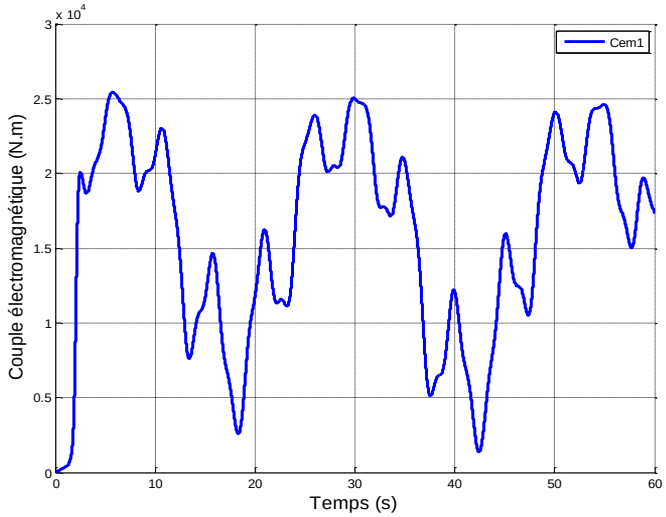


Figure 4. 30. Couple électromagnétique de la génératrice GADA1.

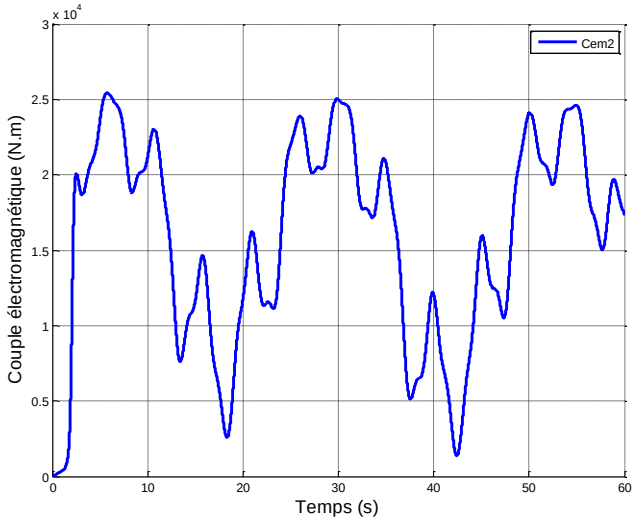


Figure 4. 31. Couple électromagnétique de la génératrice GADA2.

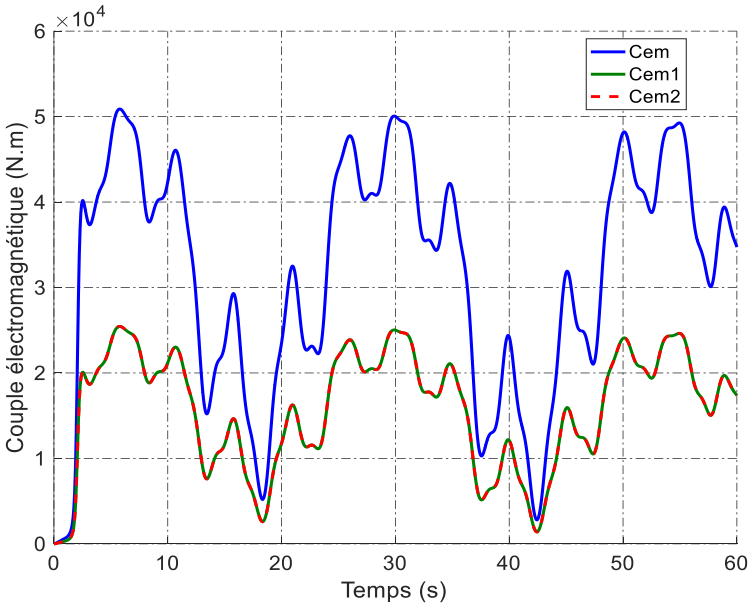


Figure 4. 32. Couple électromagnétique du modèle proposé, GADA1 et GADA2.

Les figures (4.33), (4.34) et (4.35) montrent l'allure de la puissance active fournie par GADA1, GADA2 et le modèle proposé. Les résultats ont montré que la variation des puissances actives sont adaptées à la variation de la puissance de la turbine, et que cette dernière est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Cela montre clairement l'influence de la variation de la vitesse du vent sur la puissance active produite. On peut constater aussi sur les résultats de simulation une bonne suive de consigne pour les puissances active statorique. La raison est due grâce à la commande vectorielle indirecte (IFOC) du courant du rotor, ce qui signifié un bon réglage des puissances actives. Par ailleurs, il a été constaté que la puissance active totale du modèle proposé (P_{mes}) est deux fois supérieure à la puissance active de chacune des deux GADA (P_{mes1} et P_{mes2}). Les référence des puissances actives permet de maintenir parfaitement le coefficient de puissance de l'éolienne optimal quelle que soit la vitesse du vent comme le montrent les figures (4.33), (4.34) et (4.35).

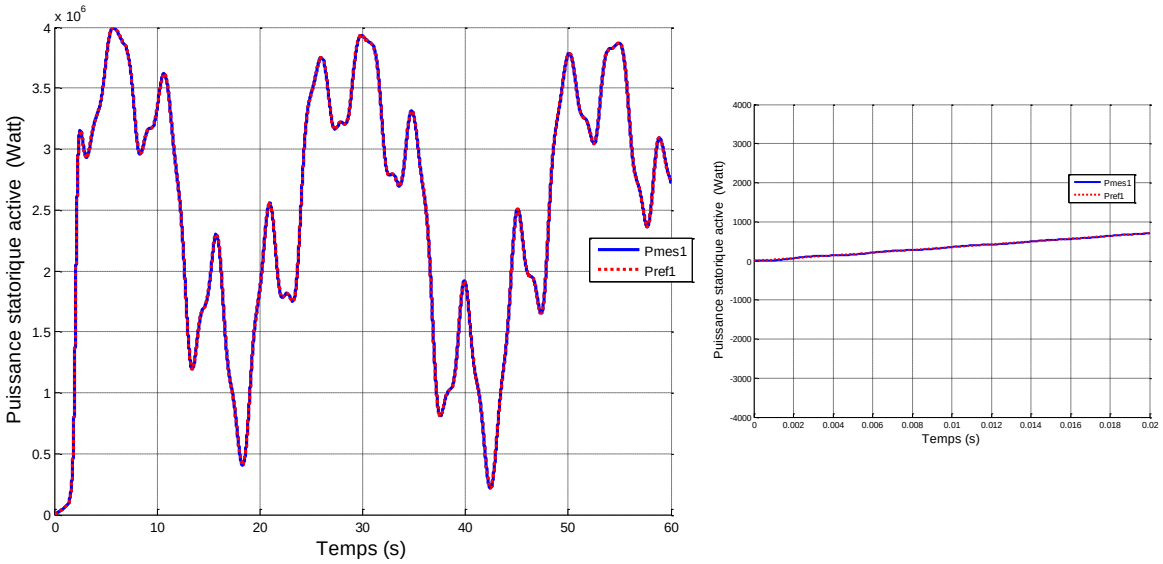


Figure 4. 33. Puissance statorique active de la génératrice GADA1.

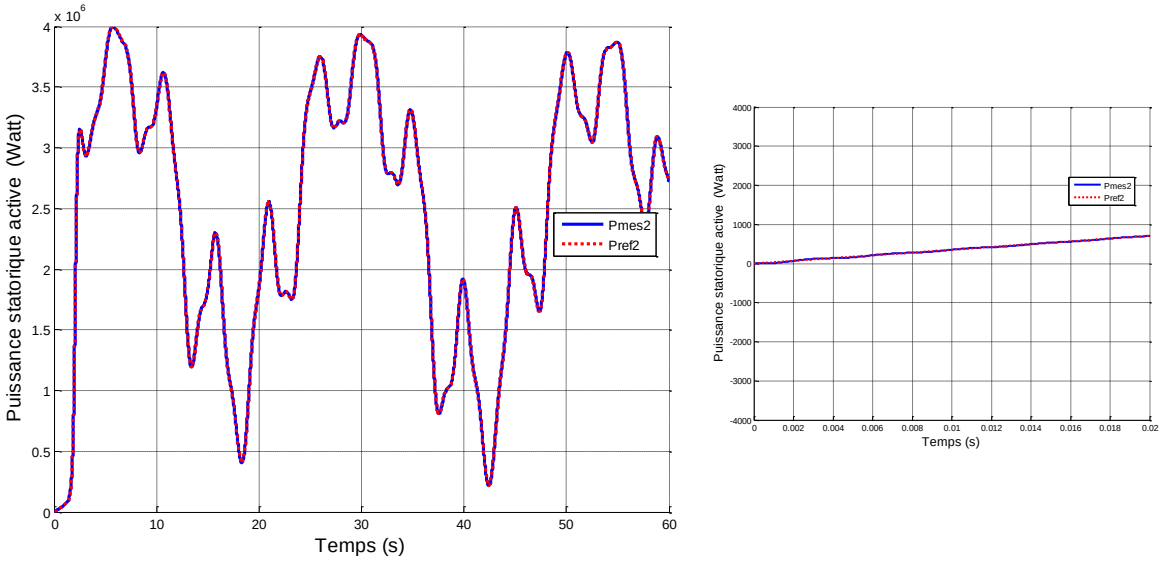


Figure 4. 34. Puissance statorique active de la génératrice GADA2.

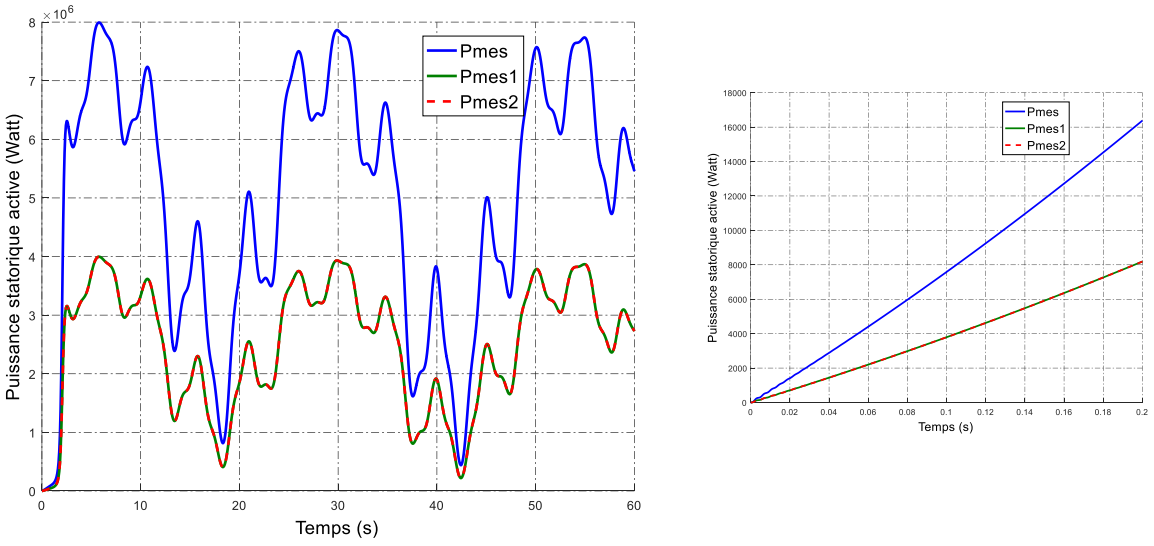


Figure 4. 35. Puissances statoriques actives du modèle proposé, GADA1 et GADA2.

Les figures (4.36), (4.37) et (4.38) montrent l'allure de la puissance réactive fournie par GADA1, GADA2 et le modèle proposé. On voit que les puissances réactives fournies par GADA1 et GADA2 suivent leurs références, et cela est dû au contrôle vectoriel indirect du courant rotorique. La référence des puissances réactives (figures (4.36), (4.37) et (4.38)) est fixée à zéro pour avoir un facteur de puissance unitaire côté stator et optimiser la qualité de l'énergie électrique produite. La puissance active et réactive suit bien leurs références, ce qui rend le système plus robuste.

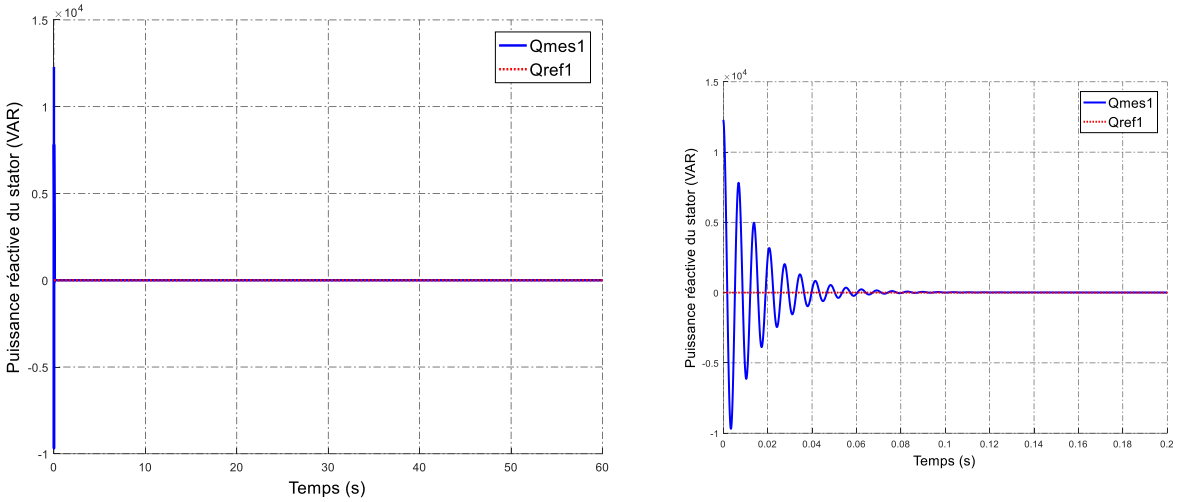


Figure 4. 36. Puissance réactive du stator de GADA1.

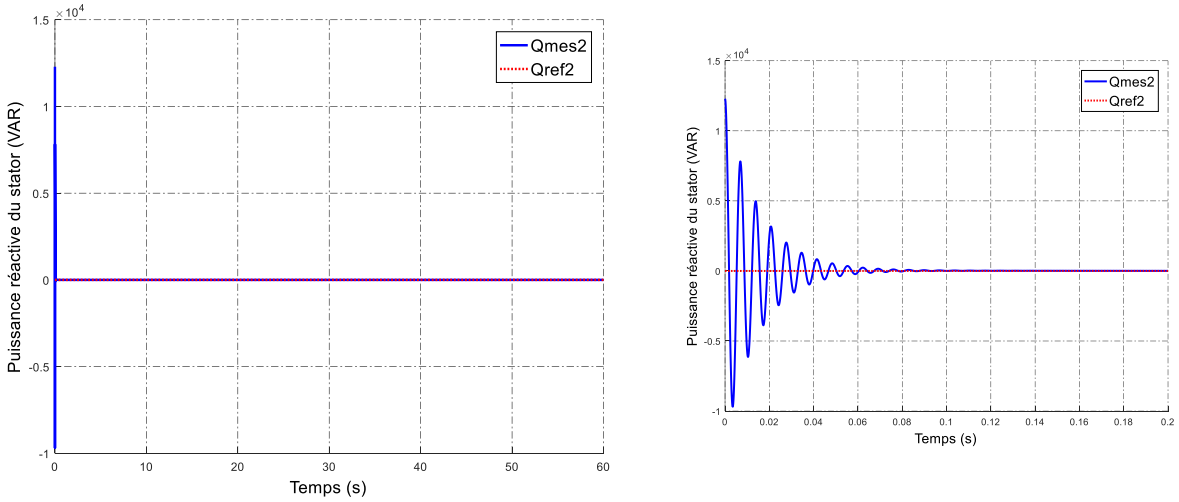


Figure 4. 37. Puissance réactive du stator de GADA2.

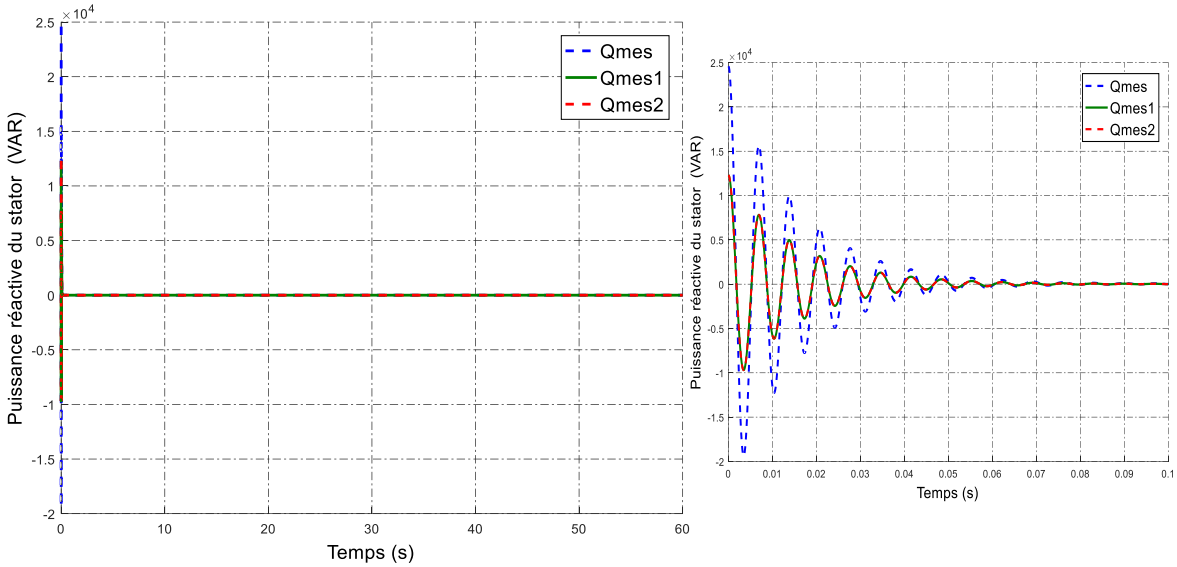


Figure 4. 38. Puissances statoriques réactives du modèle proposé, GADA1 et GADA2.

Les figures (4.39), (4.40) et (4.41) montrent que les courants rotoriques générés par GADA1, GADA2 et le modèle proposé pour les trois phases sont des formes sinusoïdales avec f_s=50Hz. On remarque que l'amplitude du courant augmente avec l'augmentation de la puissance active, tandis que le courant du rotor varie suivant la variation du vent aussi car il s'agit d'une forme de puissance. Il a été noté aussi que les courants rotoriques totaux du modèle proposé sont deux fois supérieurs au courant rotorique de chacun des deux GADA. Les réponses de courant rotorique sont plus régulières dans la commande indirecte, et ça le rôle de boucle de régulation de courant rotorique.

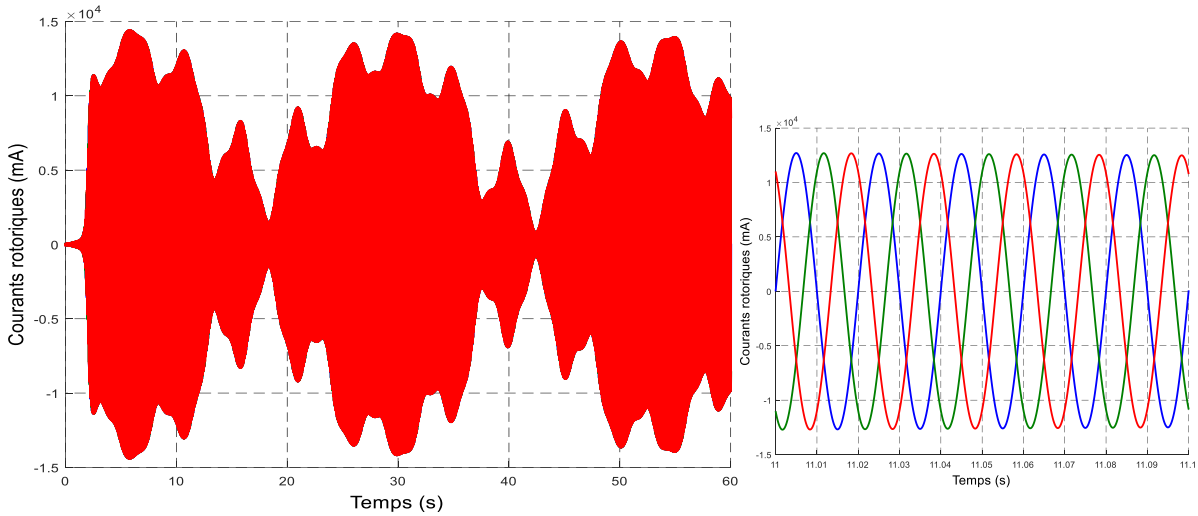


Figure 4. 39. Courants rotoriques de la génératrice GADA1.

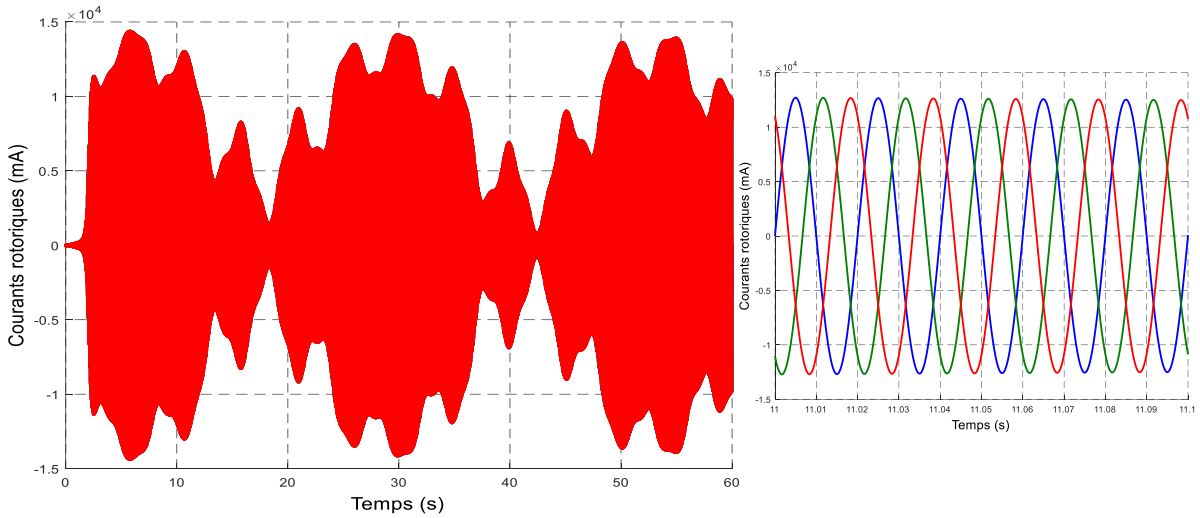


Figure 4. 40. Courants rotoriques de la génératrice GADA2.

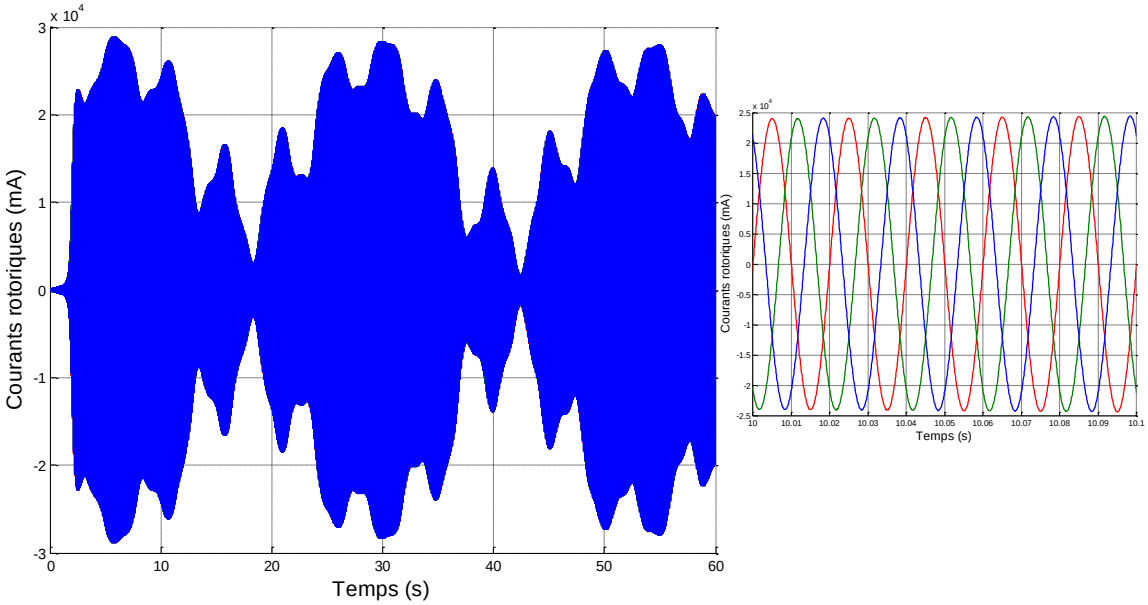


Figure 4. 41. Courants rotoriques du modèle propose.

Nous constatons aussi que le temps de réponse est très rapide par rapport au contrôle direct vu précédemment avec une erreur statique qui tend vers zéro.

- **Comparaison des performances**

Une comparaison des performances de réglage des puissances pour les deux méthodes de commande des deux génératrices GADA de notre système éolien proposé directe et indirecte est présentée dans la figure (4.42) :

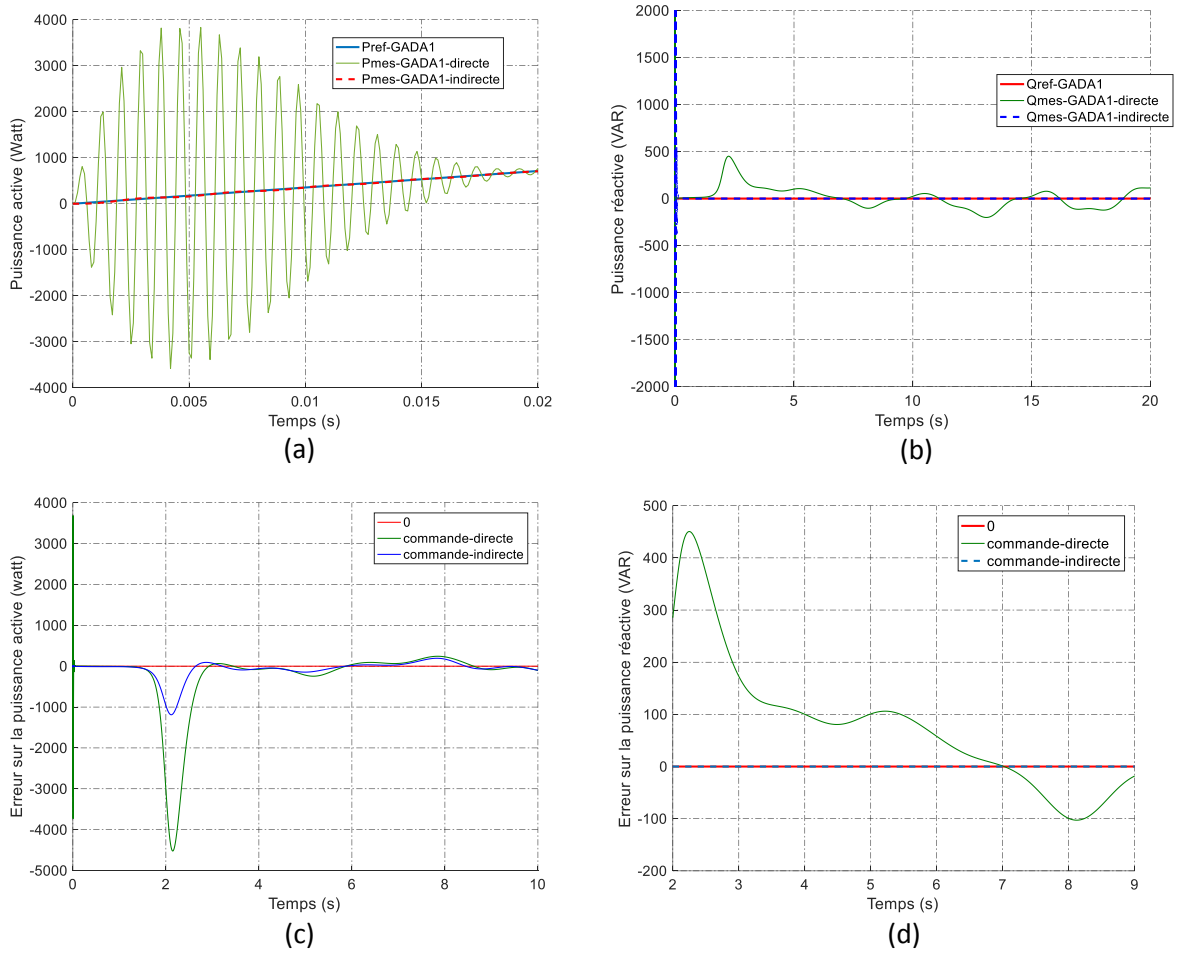


Figure 4. 42. Comparaison des performances : commande vectorielle directe et indirecte.

D'après les résultats de la figure (4.42), on peut dire que la méthode indirecte a donnée des bonnes performances dynamiques et statiques pour la puissance active et réactive. Nous observons une dynamique qui réagit rapidement sans dépassement par rapport à la commande directe, que soit pour la puissance active (figure 4.42.a) ou pour la puissance réactive (figure 4.42.b). En régime permanant, l'erreur statique est minime dans le cas de la méthode indirecte comparativement avec la méthode directe pour la puissance active (figure 4.42.c) et réactive (figure 4.42.d).

Ces résultats montrent que la méthode indirecte est un outil efficace pour réaliser la commande en puissance de la génératrice asynchrone à double alimentation GADA. Évidemment, le fait qu'il y ait une commande indirecte avec deux boucles en cascades permet justement d'augmenter légèrement les performances du système car la perturbation subie par la machine est automatiquement corrigée par le régulateur supplémentaire de la boucle intérieure.

4.4.2.2 Test de robustesse

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres.

Le test de robustesse consiste à faire varier les paramètres de la génératrice GADA utilisée dans notre système éolien proposé basé sur deux génératrices GADA. En effet, les calculs de correcteurs basés sur des fonctions de transfert dont les paramètres sont supposés fixes. L'identification de ces paramètres est soumise à des imprécisions dues à la méthode utilisée et aux appareils de mesure. La robustesse de la commande suite au changement des paramètres des deux génératrices GADA est testée avec deux tests de variations paramétriques : des résistances rotoriques Rr (cas d'échauffement) de +100% et des inductances mutuelles M (cas de saturation) de -10% pour les deux génératrices.

Les figures (4.43) et (4.44) représentent les résultats obtenus à partir de la simulation de notre modèle éolien proposé par deux méthodes de commande vectorielle de deux génératrices GADA respectivement directe et indirecte et montrent le comportement de chaque commande lorsque la résistance rotorique Rr est augmentée de 100% de sa valeur nominale et lorsque l'inductance mutuelle M est diminuée de 10% de sa valeur nominale.

D'après les résultats de la figure (4.43), on peut observer qu'une augmentation de la résistance rotorique Rr de +100% de sa valeur nominale, ce qui provoque une augmentation du temps de réponse de la puissance active (figure (4.43.a)) et la puissance réactive (figure (4.43.b)). Tandis qu'une diminution de l'inductance mutuelle M de -10% de sa valeur nominale, affecte les performances dynamiques et statiques de la commande directe. Cette sensibilité à la variation de l'inductance mutuelle entraîne une augmentation du dépassement, du temps de réponse et de l'erreur statique au niveau de la puissance active (figure (4.43.c)) et de la puissance réactive (figure (4.43.d)). La variation paramétrique excessive effectuée sur notre éolienne proposée basée sur deux génératrices GADA a eu des effets évidents sur les courbes des puissances active et réactive de la commande directe.

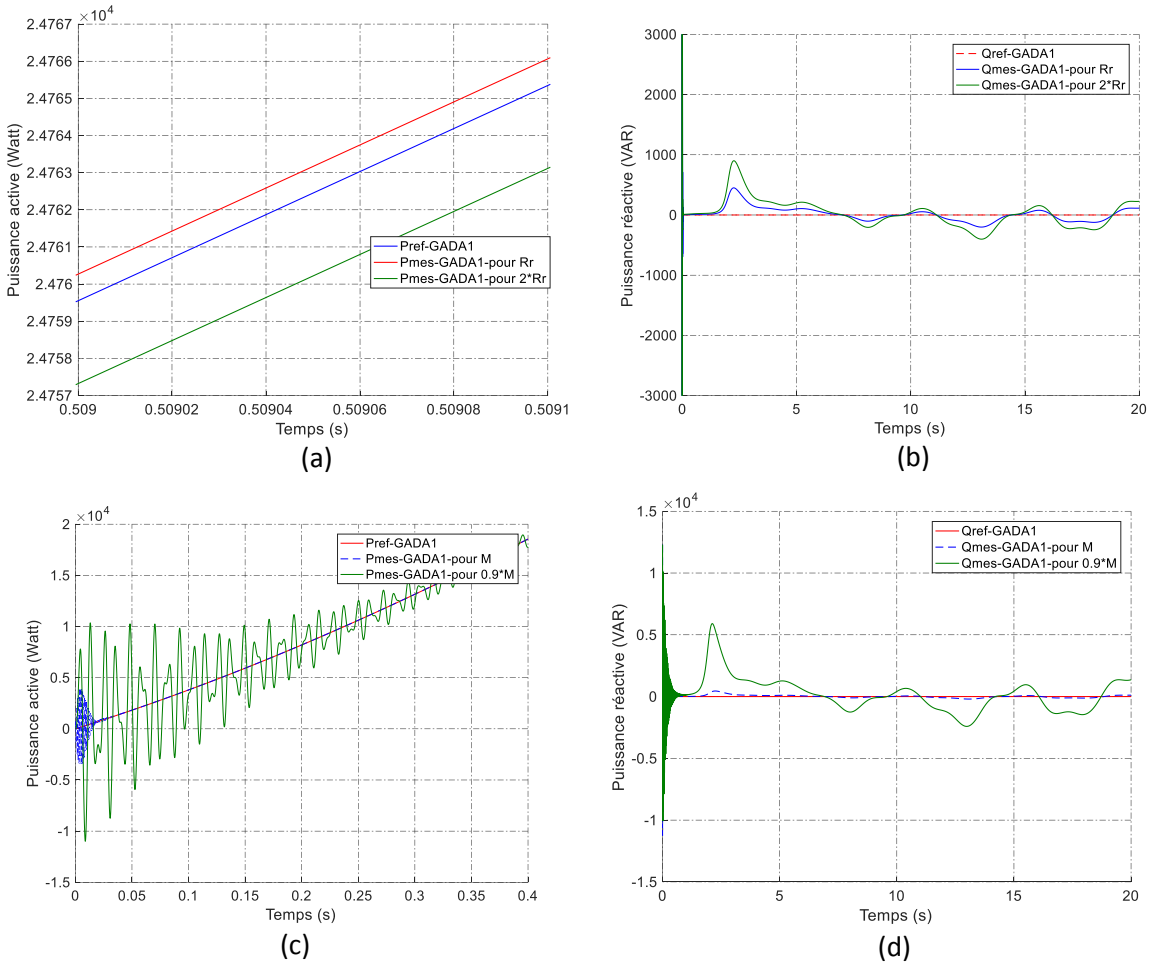


Figure 4. 43. Commande vectorielle directe vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA.

Les résultats présentés par la figure (4.44) montrent l'insensibilité de la commande vectorielle indirecte dans le cas de l'augmentation de la résistance rotorique Rr de +100% de sa valeur nominale soit pour la puissance active (figure (4.44.a)) et la puissance réactive (figure (4.44.b)). Cette variation de la résistance rotorique n'a quasiment aucune influence sur la commande car les deux boucles de régulations permettent de rattraper les erreurs dues aux termes de compensation qui ne sont plus liées à la bonne valeur de la résistance. Par contre, l'effet de la diminution de l'inductance mutuelle M de -10% de sa valeur nominale n'est pas négligeable (figures (4.44.c) et (4.44.d)), c'est-à-dire la commande indirecte perde partiellement l'efficacité de réglage mais le découplage reste maintenu.

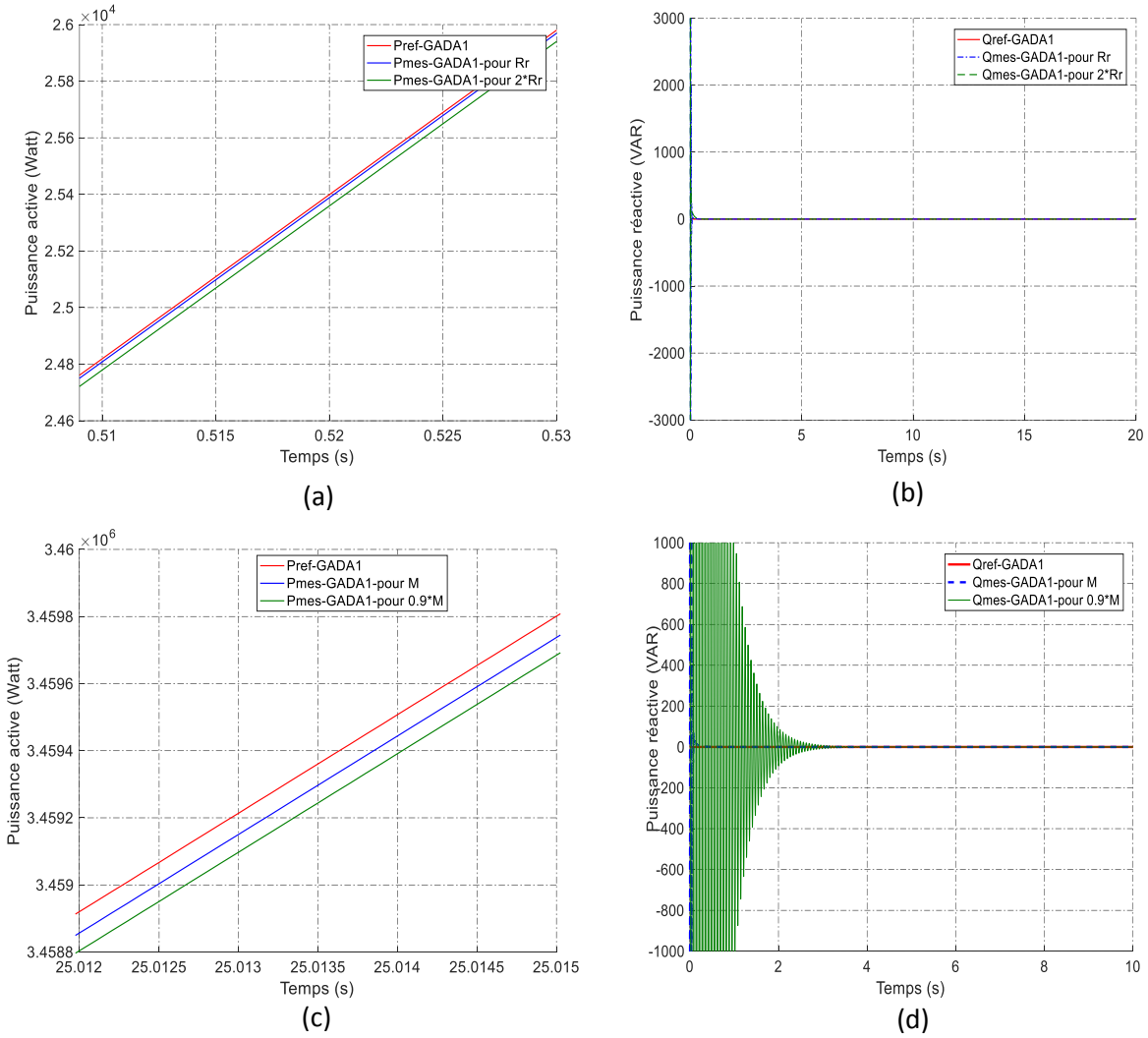


Figure 4. 44. Commande vectorielle indirecte vis-à-vis aux variations paramétriques de la génératrice GADA.

Bekakra et al. [158] ont présenté une commande linéaire basée sur la technique des modes glissants, en particulier pour la machine synchrone à aimants permanents. Cette technique de commande a un inconvénient majeur, la modélisation du générateur n'est effectuée qu'en mode linéaire, ce qui n'a pas de réel, et les résultats obtenus sont loin de la réalité. Les performances des systèmes (vitesse et puissance de la turbine) présentés dans [158] ne sont pas constantes et ne suivent pas la référence de vitesse du vent. Cependant, les résultats obtenus présentent les différentes performances de notre nouveau système éolien proposé basé sur deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA, qui montrent la robustesse, le bon suivi des références et la fiabilité du contrôle proposé et permettent un meilleur contrôle de la puissance pour l'injecter dans le réseau.

4.4.3 Comparaison entre les deux modèles étudiés

Pour valider notre système éolien proposé, nous effectuons une comparaison entre les résultats obtenus par la simulation d'un système éolien basé sur une seule génératrice asynchrone à double alimentation GADA avec ceux trouvés dans la simulation de notre système éolien proposé basé sur deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA. Les figures (4.45) et (4.46) montrent respectivement l'évolution des puissances éoliennes et des puissances statoriques actives de deux systèmes étudiés.

Nous pouvons voir que la tendance de ces deux courbes simulées a une forme similaire. Les résultats obtenus montrent clairement que la puissance engendrée pour le système éolien proposé basé sur deux génératrices GADA est inférieure à celle obtenue par le système éolien basé sur une seule génératrice GADA. Cela est dû au couple électromagnétique élevé produit par les deux génératrices GADA (figure 4.45). Cependant, dans la figure (4.46), nous remarquons qu'il existe aussi des écarts significatifs entre les valeurs de puissance statorique active pour les deux modèles simulés, où la puissance statorique active de l'éolienne à base de deux génératrices GADA est supérieure de 1.1MW à celle de système éolien à base d'une seule génératrice GADA, dont le pic maximum de la deuxième pulsation de la courbe de puissance statorique active du WT-deux-GADA était de 7.86 MW, alors qu'il atteignait de 6.85 MW pour le WT-seul-GADA comme le montre dans la figure (4.46). L'étude comparative entre les deux modèles montre que le système éolien basé sur deux génératrices GADA engendre une puissance d'un facteur d'environ 14.3% supérieur à celle d'une éolienne basée sur une seule génératrice GADA (figure 4.46).

De ces observations, on peut dire que les résultats obtenus dans le système éolien à base de deux génératrices GADA sont très satisfaisants et offrent donc de meilleures performances.

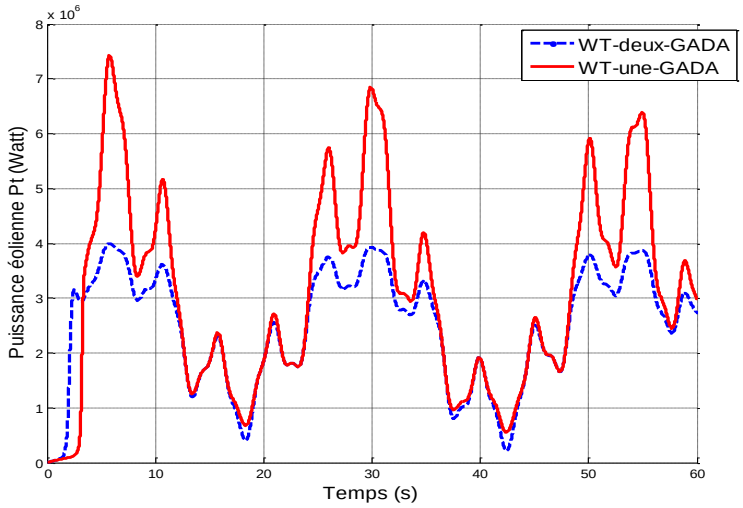


Figure 4. 45. Puissances éoliennes de WT-une-GADA et WT-deux-GADA.

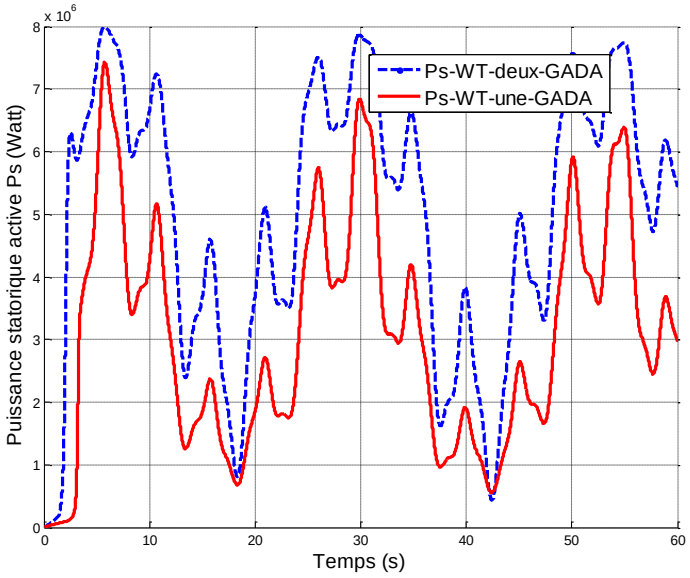


Figure 4. 46. Puissances statoriques actives des WT-une-GADA et WT-deux-GADA.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté la modélisation, la simulation et l'analyse d'une éolienne fonctionnant à vitesse variable basée sur deux génératrices asynchrones à double alimentation GADA montées en cascade. La chaine de conversion éolienne qui débute du vent jusqu'au transfert de l'énergie à été implémentée et simulée sous l'environnement du logiciel Matlab/Simulink. En premier lieu on a présenté le modèle mathématique mathématique des éléments de notre chaine de conversion éolienne. Ces éléments sont : le vent, la turbine, l'arbre mécanique, le multiplicateur et les deux génératrices GADA en tenant compte des hypothèses simplificatrices.

Le contrôle vectoriel qui permet de découpler le modèle de la génératrice GADA a été étudié et réalisé afin de contrôler l'échange des puissances actives et réactives. Deux méthodes ont été établies : la commande directe et la commande indirecte. Nous avons réalisé une synthèse du contrôleur classique PI et comparé ses performances en suivi de référence et devant les variations paramétriques de la génératrice GADA.

Les résultats obtenus montrent que le contrôleur classique PI offre une efficacité plus élevé dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle vectoriel direct, on a conclu que le régime transitoire du système était moins approprié que dans le cas de la commande indirecte. L'élaboration des stratégies de commandes montrent la stabilité du système, les robustesses vis-à-vis des variations paramétriques, les incertitudes et les perturbations.

Bien que la commande directe nous ait donné des résultats satisfaisants avec une simplicité de mise en oeuvre, la commande indirecte en boucle ouverte sur la puissance permettait d'obtenir un système plus performant et plus robuste malgré leur complexité. La présence d'une boucle de courant dans la commande indirecte lui offre un avantage, par rapport à la commande directe, permettant la limitation des courants rotoriques pour protéger la machine et aussi la possibilité de superposer des références de courants harmoniques pour une éventuelle application de la génératrice GADA .

A la fin de ce chapitre, nous avons comparé les résultats de simulation obtenus de notre modèle proposé basé sur deux génératrices GADA avec le système éolien basé sur une seule génératrice GADA. Ces résultats de simulation obtenus montrent clairement que le modèle éolien à deux génératrices GADA produit une puissance plus élevé et qui peut atteindre à 14.3 % par rapport à une éolienne basée sur une seule génératrice GADA, en particulier pour les grands systèmes éoliens.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours de ce travail, nous avons présenté une étude approfondie d'un nouveau système éolien à base de deux génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) montées en cascade. Le système proposé a été implémenté en détail et simulé à l'aide de Matlab/Simulink.

Un contrôle vectoriel en puissances active et réactive statoriques qui permet de découpler le modèle de génératrice GADA a été adopté et réalisé afin de contrôler l'échange des puissances actives et réactives du stator et les couples électromagnétiques entre la génératrice et le réseau. Deux méthodes ont été établies : la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte.

Nous avons implanté une synthèse du contrôleur classique PI et comparé ses performances en suivi de référence et avec les variations paramétriques de la génératrice GADA. Le contrôleur classique PI s'est montré plus efficace dans le cas du contrôle indirect. Pour le contrôle vectoriel direct, le modèle utilisé sert à calculer les paramètres du contrôleur PI.

Les résultats trouvés montrent que, la commande vectorielle directe offre une meilleur dynamique puisqu'elle contient une seule boucle, mais la commande vectorielle indirecte règle mieux les puissances et montre une grande précision de suivi de consigne entre les variables mesurées et les variables de consignes. La stratégie indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant (prise en compte les termes du couplage). L'élaboration des stratégies de commandes montrent la stabilité du système, les robustesses vis-à-vis des variations paramétriques, les incertitudes et les perturbations.

La conclusion générale peut être résumée comme suit:

- Bien que la commande directe nous ait donné des résultats satisfaisants avec une simplicité de mise en oeuvre, la commande indirecte en boucle ouverte sur la puissance permettait d'obtenir un système plus performant et plus robuste malgré sa complexité.
- La présence d'une boucle de courant dans la commande indirecte offre un avantage par rapport à la commande directe, permettant la limitation des courants rotoriques pour protéger la machine et aussi la possibilité de superposer des références de courants harmoniques pour une éventuelle application de la génératrice GADA .

- Le modèle éolien à deux génératrices GADA produit une puissance plus élevée et qui peut atteindre 14.3% par rapport à l'éolienne basée sur une seule génératrice GADA, en particulier pour les grands systèmes éoliens.
- La commande vectorielle indirecte offre divers avantages tels que la linéarisation et la robustesse du système éolien.
- Les résultats obtenus ont été satisfaisants pour garantir les performances du modèle proposé basé sur deux génératrices GADA.
- Ce modèle proposé garantit la continuité de la production d'électricité car si une génératrice tombe en panne, la deuxième génératrice continuera à fonctionner jusqu'à ce que la panne soit réparée.
- L'énergie maximale produite par le modèle d'éolienne à deux génératrices GADA est deux fois plus élevée que celle produite par l'éolienne à une seule génératrice GADA.

Les résultats ont montré que le modèle à deux génératrices GADA est l'une des meilleures solutions alternatives afin de générer plus d'énergie d'un point de vue économique, énergétique et de protection de l'environnement.

Ce travail pourra être amélioré et avoir des perspectives suivantes:

- L’utilisation des systèmes de protection des génératrices et de la prévention du problème de commutation basse tension (LVRT).
- Développement des systèmes de protection et des systèmes de contrôle, tel que l’intelligence artificielle, le réseau neuronal et le régulateur floue pour détecter les pannes des génératrices.
- L’utilisation d’autres commandes robustes vis-à-vis aux variations paramétriques.
- Etudier d’autres types de stratégies et d’autres méthodes en zones 1, 3 et 4 du fonctionnement de l’éolienne.
- Etudier et synthétiser la commande de la génératrice GADA en utilisant le régulateur LQG (Linéaire Quadratique Gaussien) et faire la comparaison avec les deux régulateurs étudiés.
- La nécessité de suivre cette étude thèorique de cette nouvelle technologie à base de deux génératrices GADA par une étude économique.
- Validation des résultats par des études expérimentales.

BIBLIOGRAPHIES

BIBLIOGRAPHIES

[1] H.-W. Wu, R.-H. Wang, D.-J. Ou, Y.-C. Chen, and T. Chen, “Reduction of smoke and nitrogen oxides of a partial HCCI engine using premixed gasoline and ethanol with air,” Appl. Energy, vol. 88, no. 11, pp. 3882–3890, 2011.

[2] R. K. Pachauri and A. Reisinger, “ Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat ”, GIEC, Genève, Suisse, 103 pages, 2007.

[3] K. Protocol, “United nations framework convention on climate change (UNFCCC),” Kyoto, Japan, 1998.

[4] M. M. Mansouri, M. Nayeripour, and M. Negnevitsky, “Internal electrical protection of wind turbine with doubly fed induction generator,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 55, pp. 840–855, 2016.

[5] M. S. Nazir and A. N Abdalla, “The robustness assessment of doubly fed induction generator-wind turbine during short circuit,” Energy Environ., vol. 31, no. 4, pp. 570–582, 2020.

[6] K. Noussi, A. Abouloifa, H. Katir, I. Lachkar, and F. Giri, “Nonlinear control of grid-connected wind energy conversion system without mechanical variables measurements,” Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 12, no. 2, p. 1139, 2021.

[7] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, “Power Conversion and Control of Wind Energy Systems John Wiley & Sons,” Inc Can., doi.org/10.1002/9781118029008, 2011.

[8] G. J. Herbert, S. Iniyan, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian, “A review of wind energy technologies,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 11, no. 6, pp. 1117–1145, 2007.

[9] Z. Chen and F. Blaabjerg, “Wind energy: the world’s fastest growing energy source,” IEEE Power Electron. Soc. Newsl., vol. 18, no. 3, pp. 15–19, 2006.

[10] B. C. Babu and K. B. Mohanty, “Doubly-fed induction generator for variable speed wind energy conversion systems-modeling & simulation,” Int. J. Comput. Electr. Eng., vol. 2, no. 1, p. 141, 2010.

[11] V. Meenakshi and S. Paramasivam, “Control strategy used in DFIG and PMSG based wind turbines an overview,” Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 8, no. 3, p. 1160, 2017.

[12] B. L. Gilbert, R. A. Oman, and K. M. Foreman, “Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines,” J. Energy, vol. 2, no. 6, pp. 368–374, 1978.

[13] Y. Ohya and T. Karasudani, “A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology,” Energies, vol. 3, no. 4, pp. 634–649, 2010.

[14] M. A. S. Ali, “Utilizing active rotor-current references for smooth grid connection of a DFIG-based wind-power system,” Adv Electr Comput Eng, vol. 20, pp. 91–98, 2020.

[15] M. El Azzaoui, H. Mahmoudi, and K. Boudaraia, “Backstepping control of wind and photovoltaic hybrid renewable energy system,” Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 7, no. 3, p. 677, 2016.

[16] S. Mensou, A. Essadki, T. Nasser, and B. B. Idrissi, “An efficient nonlinear backstepping controller approach of a wind energy conversion system based on a DFIG,” Int. J. Renew. Energy Res. IJRER, vol. 7, no. 4, pp. 1520–1528, 2017.

[17] A. Slimani, S. Azzouzi, and A. E. Harrouz, “Application des Energies Renouvelables (solaire) pour renforcer le débit d’eau de foggara dans la région d’Adrar,”, Mémoire de Master, Université Ahmed Draia-Adrar, Algérie, 2018.

[18] D. Bellala, “Contribution à l’Optimisation des Systèmes de Conversion d’Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques,”, Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2009.

[19] A. Merour and A. Boudour, “Commande d’une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique,”, Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2021.

[20] A. Choumane and O.Boukhari, “L’énergie éolienne en Algérie : potentiel et réalisations,”, Colloque international des stratégies des énergies renouvelables et son rôle dans la réalisation du développement durable, Université Lounici Ali 2, Blida, Algérie, 2018.

[21] J.M. Martin, “Perspectives énergétiques mondiales,” Tech. Ing. Génie Énergétique, vol. 3, no. B8515, p. B8515. 1-B8515. 10, 1996.

[22] A. Gaillard, “Système éolien basé sur une MADA: contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service,” Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, France, 2010.

[23] “REN21, ‘Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables’, Renewable Energy Policy Network for the 21st century, 2016.”

[24] D. Le Gourières and D. Legourieres, Énergie éolienne: Théorie, conception et calcul pratique des installations, Livre, Edition Eyrolles, 1980.

[25] M. Muralikrishna and V. Lakshminarayana, “Hybrid (solar and wind) energy systems for rural electrification,” ARPN J. Eng. Appl. Sci., vol. 3, no. 5, pp. 50–58, 2008.

[26] H. Camblong, “Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable,”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Bordeaux- ENSAM, Paris, France, 2003.

[27] A. Tamaarat, “Modélisation et commande d’un système de conversion d’énergie éolienne à base d’une MADA,”, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2015.

[28] B. Toual, “Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d’Energie Electrique,” Thèse de Doctorat, Université de Batna2, Batna, Algérie, 2019.

[29] F. Z. BELAIMECHE, “Contribution à la commande d’une machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédié à l’énergie renouvelable.,”, Thèse de Doctorat LMD, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, Algérie, 2018.

[30] G. Aggoun, “Etude qualitative de l’association convertisseur machine pour l’entrainement électrique d’un système de génération éolienne,”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2011.

[31] F. Messai, “Contribution à l’Etude d’une Génératrice à Réluctance Variable,”, Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2009.

[32] A. Mirecki, “Étude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2005.

[33] M. Stiebler, Wind energy systems for electric power generation. Livre, Springer Science & Business Media, 2008.

[34] M. Mayouf, “Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d’un aérogénérateur synchrone a aimants permanents,” Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2014.

[35] R. Cheikh, “Etude et Commande d’une Eolienne à base d’une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation,”, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2018.

[36] B. Meghni, “ Contribution à l’amélioration des performances d’une chaine énergétique éolienne,”, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2015.

[37] A. Ben Amar, “Etude de la commande d’un système éolien base sur une GADA,” Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2016.

[38] O. Aouchenni, “Amélioration de l’intégration de la production éolienne dans les réseaux électriques,”, Thèse de Doctorat LMD, Université Abderrahmane Mira, Béjaia, Algérie, 2017.

[39] G. L. Johnson, “Chapter 4: Wind Turbine Power,” Energy Torque Wind Energy Syst., pp. 1–54, 2001.

[40] N. Laverdure, “Sur l’intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires,”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, France, 2005.

[41] H. Semmache, A. Bounoua, R. Bausière, and N. Benramdane, “Développement des performances des systèmes énergétiques dans la production d’énergie éolienne,” Rev.Energ.Ren : Valorisation (1999) 261-266, 1999.

[42] K. Mouilah, “Commande d’une éolienne à machine asynchrone à double alimentation,”, Thèse de doctorat, Université Djilali liabes, Sidi-Belabbès, Algérie, 2015.

[43] M. Mayouf, “Contribution à la modélisation de l’aérogénérateur synchrone a aimants permanents,”, Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2008.

[44] A. Abdelli, “Optimisation multicritère d’une chaîne éolienne passive,”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, France, 2007.

[45] T. Ghennam, “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation,”, Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Polytechnique d’Alger, Algérie, 2011.

[46] E. Hau, “Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics”, Livre, ISBN 10: 3662495775 ISBN 13: 9783662495773, 783 pages, Springer Science & Business Media, 2013.

[47] A. Touahri, “Application de la DTC a un aérogénérateur asynchrone double alimente,”, Mémoire de Magister, Université de Batna2, Batna, Algérie, 2016.

[48] P. Berlu, “Calcul des efforts subis par les éoliennes de moyenne et forte puissance,”, Thèse de Doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille 1, France, 1999.

[49] M. Loucif, “Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d’une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur,”, Thèse de Doctorat, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.

[50] R. Rouabhi, “Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée,”, Thèse de Doctorat, Université de Batna2, Batna, Algérie, 2016.

[51] Y.Ould. Makhlouf and S. Zelouf, “Evaluation et caractérisation du potentiel éolien de la région de M’SILA,”, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M’SILA, Algérie, 2020.

[52] A. Belguidoum, “Les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d’énergie dans les zones arides,”, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2013.

[53] J. Ringard, “Estimation des précipitations sur le plateau des Guyanes par l’apport de la télédétection satellite,” Thèse de Doctorat, Université de Guyane, Guyane, France, 2017.

[54] H. Belghitri, “modélisation, simulation et optimisation d’un système hybride éolien-photovoltaïque,” Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 2010.

[55] R. Redjem, “Etude d’une chaine de conversion d’énergie éolienne,”, Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, Constantine, Algérie ,2009.

[56] N. K. Merzouk, “Evaluation du gisement énergétique éolien-Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie,” Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 2006.

[57] J. G. Keller, “Simulation of Wind With a Variable’K’ Parameter,” Wind Eng., pp. 307–312, 1992.

[58] E. G. Pavia and J. J. O’Brien, “Weibull statistics of wind speed over the ocean,” J. Appl. Meteorol. Climatol., vol. 25, no. 10, pp. 1324–1332, 1986.

[59] J. P. Hennessey Jr, “A comparison of the Weibull and Rayleigh distributions for estimating wind power potential,” Wind Eng., pp. 156–164, 1978.

[60] A. S. Monin and A. M. Obukhov, “Dimensionless characteristics of turbulence in the surface layer,” Akad Nauk SSSR Geofiz Inst Tr, vol. 24, pp. 163–187, 1954.

[61] J. D. Pneumatikos, “An experimental test of the empirical formulae commonly used to represent wind speed profiles near the ground,” Renew. Energy, vol. 1, no. 5–6, pp. 623–628, 1991.

[62] J. S. Irwin, “A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability,” Atmospheric Environ. 1967, vol. 13, no. 1, pp. 191–194, 1979.

[63] C. G. Justus and A. Mikhail, “Height variation of wind speed and wind distributions statistics,” Geophys. Res. Lett., vol. 3, no. 5, pp. 261–264, 1976.

[64] J. R. Babu and S. V. Jithesh, “Breakdown risks in wind energy turbines,” Pravartak J. Insur. Risk Manag. Natl. Insur. Acad. Pun, vol. 3, no. 3, 2008.

[65] L. Fadda Mohamed, “Contribution à la modélisation et au diagnostic intelligent des systèmes de production d’énergie électrique à base d’énergies renouvelables,”, Thèse de Doctorat, Université 8 mai 1945, Guelma, Algérie, 2017.

[66] L. Rademakers, A. J. Seebregts, B. A. Van den Horn, J. N. T. Jehee, and B. M. Blok, “Methodology for probabilistic safety assessment of wind turbines,” PSA Wind Turbine, ECN-C--93-010, 1993.

[67] M. Sahnoun, D. Baudry, A. Louis, and B. Mazari, “Modélisation d’un plan de maintenance basé sur les systemes multi-agents pour les éoliennes offshore,” MOSIM’14 - 5 au 7 novembre 2014 - Nancy – France, 2014.

[68] S. El Aimani, “Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension,”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, France, 2004.

[69] J. Y. Chen, C. Nayar, and L. Xu, “Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly-coupled wind turbine applications,” in Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No. 98CH36242), 1998, vol. 1, pp. 387–394.

[70] J. W. Smith, J. A. Taylor, D. L. Brooks, and R. C. Dugan, “Interconnection studies for wind generation,” in Rural Electric Power Conference, 2004, 2004, pp. C3-1.

[71] R. Ramakumar, “Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas,” in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., 2004, pp. 2103–2105.

[72] A. Telli, “Etude et commande d’une éolienne a vitesse variable intégrée au réseau MT,”, Mémoire de Magister, Université des Sciences et de La Technologie d’Oran- Mohamed Boudiaf-usto, Oran, Algérie, 2012.

[73] F. Akel, “Etude et réalisation d’un émulateur de turbine éolienne,” Mémoire de Magister, Ecole Nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[74] A. Tebbal, M. Sekhri, and D. E. Lahlili, “Commande Prédictive d’un Système éolien à base d’une Machine Synchrone à Aimant Permanent,”, Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, Algérie, 2019.

[75] Y. Lang, B. Wu, and N. Zargari, “Wind power technology–state of the art,” IEEE Can. Rev., no. 56, pp. 10–17, 2007.

[76] N. Hamdi, “Amélioration des performances des aérogénérateurs,”, Mémoire de Magister, Université de Constantine1, Constantine, Algérie, 2013.

[77] Y. Djeriri, “Commande directe du couple et des puissances d’une MADA associée à un système éolien par les techniques de l’intelligence artificielle,”, Thèse de Doctorat, Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2015.

[78] D. Guérette, “Asservissement d’une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d’un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration,”, Thèse de maître en sciences appliquées Université du Québec à Rimouski, Canada, Amérique du Nord, 2010.

[79] V. Akhmatov, “Induction Generators for Wind Power.,” Brentwood. CA: Multi-Science, 2005.

[80] A. Teninge, “Participation aux services système de parcs éoliens mixtes: application en milieu insulaire,”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, France, 2009.

[81] 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, Université de Bretagne occidentale-Brest, France, 2010.

[82] O. Langlois, “’Raccordement d’éoliennes de petite puissance intégrées au bâtiment’’,” Contrat Avec EDF RD, DEA Génie Electrique, Institut National Polytechnique De Toulouse-INPT, France, 2002.

[83] S. Kelouwani and K. Agbossou, “Nonlinear model identification of wind turbine with a neural network,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 3, pp. 607–612, 2004.

[84] F. Blaabjerg and Z. Chen, “Power Electronics for Modern Wind Turbines., ser,” Synth. Lect. Power Electron. Morgan Claypool Publ., 2006.

[85] H. Nikkhajoei and R. Iravani, “Dynamic model and control of AC–DC–AC voltage-sourced converter system for distributed resources,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 22, no. 2, pp. 1169–1178, 2007.

[86] A. Yazdani and R. Iravani, “A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 21, no. 3, pp. 1620–1629, 2006.

[87] N. Mekkaoui, “Contribution à la Modélisation et à la Commande d’une Mini-centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée,”, Mémoire de Magister, Université de Batna 2, Batna, Algérie, 2004.

[88] V. Q. B. Ngo, “Algorithmes de conception de lois de commande prédictives pour les systèmes de production d’énergie,”, Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), France, 2017.

[89] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators,” Renew. Energy, vol. 32, no. 14, pp. 2369–2385, 2007.

[90] M. Singh, “Adaptive network-based fuzzy inference systems for sensorless control of PMSG based wind turbine with power quality improvement features,”, Thèse de Doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, Canada, nord-Américaine, 2010.

[91] J. A. Sanchez, C. Veganzones, S. Martinez, F. Blazquez, N. Herrero, and J. R. Wilhelmi, “Dynamic model of wind energy conversion systems with variable speed synchronous generator and full-size power converter for large-scale power system stability studies,” Renew. Energy, vol. 33, no. 6, pp. 1186–1198, 2008.

[92] M. S. Merzoug, H. Benalla, and L. Louze, “Nonlinear control of permanent magnet synchronous generators (PMSG) using feedback linearization,” J. Renew. Energ., vol. 14, no. 2, pp. 357–367–357–367, 2011.

[93] S. Benhalima, “Modélisation et contrôle des systèmes éoliens-solaire intégrés au réseau VSC-HVDC,”, Thèse de Doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, Canada, nord-Américaine, 2019.

[94] I. Abderrahim, “Amélioration de la qualité d’énergie d’un système de conversion d’energie éolienne à base de machine asynchrone à double alimentation et connecte au réseau electrique,”, Mémoire de maîtrise électronique, École de technologie supérieure, Université du Québec, Canada, nord-Américaine, 2015.

[95] Y. Bekakra, “Contribution à l’étude et à la Commande Robuste d’un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation,”, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2014.

[96] B. Robyns et al., “Impact de l’éolien sur le réseau de transport et la qualité de l’énergie,” J3eA, vol. 5, p. 003, 2006.

[97] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, and H. Ben Ahmed, “Aérogénérateurs électriques,” Tech. Ing. Génie Électr., vol. 7, no. D3960, 2004.

[98] J. L. Fraisse, “The HVAC and LV connection of the decentralized production; Le raccordement de la production decentralisee en HTA et BT,” Rev. Electr. Electron., 2002.

[99] B. L. Gilbert and K. M. Foreman, “Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine,” J. Energy Resour. Technol. 105 46–53, 1983.

[100] O. Igra, “Research and development for shrouded wind turbines,” Energy Convers. Manag., vol. 21, no. 1, pp. 13–48, 1981.

[101] F. Bet and H. Grassmann, “Upgrading conventional wind turbines,” Renew. Energy, vol. 28, no. 1, pp. 71–78, 2003.

[102] M. Benmeziane, S. Zebirate, A. Chaker, and Z. Boudjema, “Fuzzy sliding mode control of doubly-fed induction generator driven by wind turbine,” Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 10, no. 3, p. 1592, 2019.

[103] K. Belgacem, A. Mezouar, and N. Essounbouli, “Design and analysis of adaptive sliding mode with exponential reaching law control for double-fed induction generator based wind turbine,” Int. J. Power Electron. Drive Syst., vol. 9, no. 4, p. 1534, 2018.

[104] B. Bossoufi, M. Karim, S. Ionita, A. Lagrioui, and H. Mahmoudi, “Indirect sliding mode control of a permanent magnet synchronous machine: FPGA-based implementation with Matlab & Simulink simulation.,” J. Theor. Appl. Inf. Technol., vol. 29, no. 1, 2011.

[105] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, and R. Yacamini, “Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, no. 1, pp. 257–264, 2006.

[106] F. Mei and B. C. Pal, “Modelling and small-signal analysis of a grid connected doubly-fed induction generator,” in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, 2005, pp. 2101–2108.

[107] M. Loucif, A. Boumediene, and A. Mechernene, “Nonlinear Sliding Mode Power Control of DFIG under Wind Speed Variation and Grid Connexion.,” Electroteh. Electron. Autom., vol. 63, no. 3, 2015.

[108] A. Bektache and B. Boukhezzar, “Nonlinear predictive control of a DFIG-based wind turbine for power capture optimization,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 101, pp. 92–102, 2018.

[109] S.-H. G. Teng and S.-Y. M. Ho, “Failure mode and effects analysis: an integrated approach for product design and process control,” Int. J. Qual. Reliab. Manag., Vol. 13 No. 5, pp. 8-26, 1996.

[110] S. Ozturk, V. Fthenakis, and S. Faulstich, “Failure modes, effects and criticality analysis for wind turbines considering climatic regions and comparing geared and direct drive wind turbines,” Energies, vol. 11, no. 9, p. 2317, 2018.

[111] J. M. P. Pérez, F. P. G. Márquez, A. Tobias, and M. Papaelias, “Wind turbine reliability analysis,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 23, pp. 463–472, 2013.

[112] M. Reder, N. Y. Yürüşen, and J. J. Melero, “Data-driven learning framework for associating weather conditions and wind turbine failures,” Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 169, pp. 554–569, 2018.

[113] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne,”, Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.

[114] T. Ghennam, K. Aliouane, F. Akel, B. Francois, and E. M. Berkouk, “Advanced control system of DFIG based wind generators for reactive power production and integration in a wind farm dispatching,” Energy Convers. Manag., vol. 105, pp. 240–250, 2015.

[115] V. Rogez, “Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l’intégration d’une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire,” Thèse de Doctorat, Université D’Artois Béthune, France, 2004.

[116] L. Yanjie and W. Jun, “A large time scale wind velocity simulation method,” in 2010 International Conference On Computer Design and Applications, 2010, vol. 4, pp. V4-282-V4-286.

[117] B. Multon et al., “Etat de l’art des aérogénérateurs,”, Ed. NOVELECT-ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, 2002.

[118] B. Bossoufi, M. Karim, A. Lagrioui, M. Taoussi, and M. L. ElHafyani, “Backstepping control of DFIG generators for wide-range variable-speed wind turbines,” Int. J. Autom. Control, vol. 8, no. 2, pp. 122–140, 2014.

[119] S. Mensou, A. Essadki, I. Minka, T. Nasser, and B. B. Idrissi, “Backstepping controller for a variable wind speed energy conversion system based on a DFIG,” in 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2017, pp. 1–6.

[120] T. Saci, “Etude du stockage inertiel d’énergie dans une chaine de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation,”, Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira, Béjaia, Algérie, 2008.

[121] B. Beltran, T. Ahmed-Ali, and M. E. H. Benbouzid, “Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 2, pp. 551–558, 2008.

[122] A. Zaimi, “Optimisation de la commande d’une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents,” Mémoire d’ingéniera, Conservatoire national des arts et métiers centre de Maroc-CNAM, Maroc, 2014.

[123] P. M. Anderson and A. Bose, “Stability simulation of wind turbine systems,” IEEE Trans. Power Appar. Syst., no. 12, pp. 3791–3795, 1983.

[124] A. Benretem, F. Massouh, and A. Chebel, “Modeling and simulation of wind data for a prediction of the electrical energy from wind farms: case of a site in the region of Annaba,” Appl. J. Environ. Eng. Sci., vol. 3, no. 2, pp. 3-2 (2017) 159-168, 2017.

[125] H. A. Aroussi, E. Ziani, and B. Bossoufi, “Speed control of the doubly fed induction generator applied to a wind system,” J. Theor. Appl. Inf. Technol., vol. 83, no. 3, p. 426, 2016.

[126] A. Boualouch, A. Essadki, T. Nasser, A. Boukhriss, and A. Frigui, “Power control of dfig in wecs using backstipping and sliding mode controller,” Int. J. Electr. Comput. Eng., vol. 9, no. 6, pp. 612–618, 2015.

[127] B. Bossoufi, M. Karim, A. Lagrioui, M. Taoussi, and A. Derouich, “Observer backstepping control of DFIG-Generators for wind turbines variable-speed: FPGA-based implementation,” Renew. Energy, vol. 81, pp. 903–917, 2015.

[128] A. Moualdia, “Stratégies de commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d’énergie éolienne,”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2014.

[129] F. Z. Belaimeche, A. Bentaallah, S. Massoum, and P. Wira, “A comparative study between a simplified fuzzy PI and classic PI input-output linearizing controller for the wind-turbine doubly fed induction generator,” ELEKTRO Teh. Vestn., vol. 85, no. 4, pp. 142–148, 2018.

[130] Z. Boudjema, A. Meroufel, Y. Djerriri, and E. Bounadja, “Fuzzy sliding mode control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion,” Carpathian J. Electron. Comput. Eng., vol. 6, no. 2, p. 7, 2013.

[131] A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, France, 2006.

[132] P. E. Vidal, “Commande non-linéaire d’une machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.

[133] D. Thukaram, “Accurate modeling of doubly fed induction generator based wind farms in load flow analysis,” Electr. Power Syst. Res., vol. 155, pp. 363–371, 2018.

[134] M. R. Douiri, A. Essadki, and M. Cherkaoui, “Neural networks for stable control of nonlinear DFIG in wind power systems,” Procedia Comput. Sci., vol. 127, pp. 454–463, 2018.

[135] D. Abdelhakim, “Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM),” Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2010.

[136] Y. Djeriri, “Commande Vectorielle d’une MADA intégrée à un Système Eolien’,” Mémoire de Magister, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbes, Algérie, 2009.

[137] M. A. Hassad, “Influence de la commande d’une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques,” Mémoire de Magister, université Sétif, Algérie, 2016.

[138] D. Fawzi, “Commande d’un système éolien basé sur une GADA Par différentes techniques,”, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M’sila, Algérie, 2019.

[139] A. Chemidi, “Analyse, modélisation et commande avancée d’une éolienne utilisée dans une ferme,”, Thèse de doctorat LMD, université de Tlemcen, Algérie, 2015.

[140] I. Cadirci and M. Ermiș, “Double-output induction generator operating at subsynchronous and supersynchronous speeds: steady-state performance optimisation and wind-energy recovery,” in IEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1992, vol. 139, pp. 429–442.

[141] S. Chekroun, M. Zerikat, and A. Mechernene, “Commande DFOC sans capteur mécanique d’un moteur asynchrone basée sur l’approche MRAS avec estimation simultanée de la résistance

statorique et de la vitesse,", First International Conference on Power Electronics and Electrical Drives, Oran-Algeria, October, Algérie, 2010.

[142] R. Babouri, Y. Bakouche, and Y. Bousekkine, "Etude des performances d'une MADA alimentée par deux onduleurs à trois niveaux.,", Mémoire de Master, Université Abderahmene Mira. Bejaia, Algérie, 2018.

[143] K. Djilali, "Modélisation, Simulation et Commande d'un Système Éolien a Machine Asynchrone à Double Alimentation," Thèse de doctorat, Université des Sciences et de La Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf- usto, Oran, Algérie, 2013.

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

[145] A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum, and A. Hammoumi, "Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien," J. Renew. Energ., vol. 13, no. 4, pp. 669–682–669–682, 2010.

[146] F. Z. Tria, "Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques,", mémoire de magister, Université de Eloued, Algérie, 2013.

[147] S. Metatla, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA,", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[148] A. Dendouga, "Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM),", Thèse de doctorat, Université El Hadj Lakhder, Batna, Algérie, 2010.

[149] A. Miller, E. Muljadi, and D. S. Zinger, "A variable speed wind turbine power control," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 12, no. 2, pp. 181–186, 1997.

[150] R. Spée, S. Bhowmik, and J. H. Enslin, "Novel control strategies for variable-speed doubly fed wind power generation systems," Renew. Energy, vol. 6, no. 8, pp. 907–915, 1995.

[151] L. Xu and W. Cheng, "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 3, pp. 636–642, 1995.

[152] J. Liang, Y. Qiu, M. Zhao, S. Kang, and H. Lu, "The modeling and numerical simulations of wind turbine generation system with free vortex method and simulink," Energy Convers. Manag., vol. 103, pp. 762–777, 2015.

[153] S. M. Cruz and A. M. Cardoso, "Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 37, no. 5, pp. 1227–1233, 2001.

[154] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson, and R. A. Lakin, "Stator-flux-oriented control of a doubly-fed induction machine: with and without position encoder," IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 147, no. 4, pp. 241–250, 2000.

[155] Y. Djeriri and Z. Boudjema, "Commande robuste par la logique floue et les réseaux de neurones artificiels de la GADA: étude comparative," J. Renew. Energ., vol. 20, no. 1, pp. 147–160, 2017.

[156] C. Mehdipour, A. Hajizadeh, and I. Mehdipour, “Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under balanced network conditions,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 83, pp. 560–569, 2016.

[157] N. Bouchiba, A. Barkia, L. Chrifi-Alaoui, S. Drid, S. Sallem, and M. B. A. Kammoun, “Real-time integration of control strategies for an isolated DFIG-based WECS,” Eur. Phys. J. Plus, vol. 132, no. 8, pp. 1–11, 2017.

[158] Y. Bekakra and D. B. Attous, “Sliding mode controls of active and reactive power of a DFIG with MPPT for variable speed wind energy conversion,” Aust. J. Basic Appl. Sci., vol. 5, no. 12, pp. 2274–2286, 2011.

[159] F. Merrahi, “Alimentation et commande d’une machine asynchrone à double alimentation: Application à l’énergie éolienne,”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[160] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation,”, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.

[161] R. Azaizia, “Étude et commande d’une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux,”, Thèse de doctorat, Université M’hamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2008.

[162] Z. Boudjemaa, “Commande vectorielle sans capteur de vitesse de la machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI-Flou,” Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure De L'enseignement Technologique D’Oran, Algérie, 2009.

[163] F. Boumaraf, “Commande intelligente d’une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation,”, Mémoire de magister, Université El Hadj Lakhdar, Batna, Algérie, 2009.

[164] S. Nouhou and A. M. SIDDO, “Étude du Générateur Asynchrone pour l’utilisation dans la production de l’énergie éolienne,” Mémoire d’Ingéniera, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[165] M. K. Das, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and C. T. Gaunt, “Control of a grid connected doubly-fed induction generators for wind energy conversion,” in 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009, pp. 1–5.

[166] Z. Zeghdi, L. Barazane, S. Abdelmalek, K. Miloudi, A. Chemsa, and A. Larabi, “Contrôle robuste et suivi optimal de la puissance active et reactive du gada intégré à l’éolienne par utilisé des différents régulateurs,”, International Symposium on Mechatronics and Renewable Energies-10- 11 Décembre 2018, El-Oued, Algérie, 2018.

ANNEXES

ANNEXE 1

Passage de triphasé au biphasé

1 Transformation de Park

Le modèle triphasé de la génératrice GADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques. La résolution de ce système d'équation est très difficile à cause de la dépendance des coefficients au temps. Ceci conduit à l'utilisation de la transformation de Park qui permettra de rendre ces paramètres constants et permet de réduire la complexité des systèmes d'équations.

La transformation de Park est ancienne (1929) et découle de la diagonalisation des matrices inductances statoriques et rotoriques [159]. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (αβ), puis vers le repère (dq).

Le repère (αβ) est toujours fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile, il forme avec le repère fixe (αβ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [160].

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statorique et rotorique biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent (figure (A1.1)).

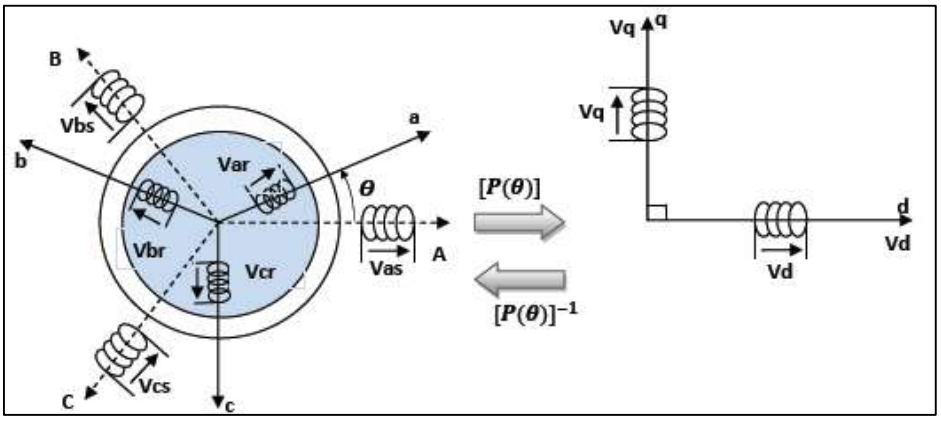


Figure A1.1. Passage de système triphasé au système biphasé et l'inverse [146].

La matrice de transformation de Park est définie comme suit [159]:

$$P(\theta)=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right)\\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right)\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad \text{(A1.1)}$$

Son inverse donné par:

$$P(\theta)^{-1}=P(\theta)^{T}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta-\frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \quad \text{(A1.2)}$$

2 Choix du référentiel de Park

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Jusqu'ici, les équations et les grandeurs de la génératrice ont été exprimés dans un repère dq faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre [161]. Suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la génératrice GADA, nous pouvons résumer qu'il existe trois choix utiles de référentiel à deux axes (dq) [162, 163]:

a-Référentiel lié au stator

$\omega_{coor}=0$, ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées, et est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques, et dans l'étude des observateurs.

b-Référentiel lié au rotor

$\omega_{coor}=\omega_r$, ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires des machines asynchrones où la vitesse est supposée constante.

c-Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X,Y), il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique crée par les enroulements du stator, c'est-à-dire à la vitesse de pulsation synchrone est caractérisé par $\omega_{coor}=\omega_s$. Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine [161].

Pour l'application de la transformation de Park à la génératrice GADA, les grandeurs statorique et rotorique sont transformées comme suit : On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant pour lequel $\omega_{coor} = \omega_s$.

3 Equations électriques de la génératrice GADA dans le plan (dq)

On choisit comme référence le repère de Park liée au champ tournant dont $\omega_{coor} = \omega_s$,en appliquant la transformation de Park pour le système d'équations électriques du stator, rotor on aura:

Tensions-courants:

$$\begin{cases} [V_{dq}]_s = [P(\theta_s)][V_s] \\ [V_{dq}]_r = [P(\theta_s - \theta)][V_r] \\ [I_{dq}]_s = [P(\theta_s)][I_s] \\ [I_{dq}]_r = [P(\theta_s - \theta)][I_r] \end{cases} \quad (A1.3)$$

$$\begin{cases} [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dq}]_s \\ [V_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[V_{dq}]_r \\ [I_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[I_{dq}]_s \\ [I_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[I_{dq}]_r \end{cases} \quad (A1.4)$$

Flux:

$$\begin{cases} [\phi_{dq}]_s = [P(\theta_s)][\phi_s] \\ [\phi_{dq}]_r = [P(\theta_s - \theta)][\phi_r] \end{cases} \quad (A1.5)$$

$$\begin{cases} [\phi_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[\phi_{dq}]_s \\ [\phi_r] = [P(\theta_s - \theta)]^{-1}[\phi_{dq}]_r \end{cases} \quad (A1.6)$$

En multipliant les systèmes des équations (3.29) par la matrice de Park, on obtient:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \dfrac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \dfrac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \dfrac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_r \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \dfrac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_r \phi_{dr} \end{cases} \quad (A1.7)$$

En multipliant les systèmes des équations (3.30) par la matrice de Park, on obtient les relations entre les flux et les courants, exprimées par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(A1.8)}$$

Où

$\omega_r = \omega_s - \omega, \quad \omega = p\Omega$

V_{ds}, V_{qs}, V_{dr} et V_{qr} : sont les tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park;

I_{ds}, I_{qs}, I_{dr} et I_{qr} : sont les courants statoriques et rotoriques dans le repère de Park;

$\phi_{ds}, \phi_{qs}, \phi_{dr}$ et ϕ_{qr} : sont les flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park;

R_s, R_r : sont les résistances respectives des bobinages statoriques et rotoriques(rad/s);

ω_s, ω_r : sont les angles de Park respectifs des grandeurs statoriques et rotoriques(rad/s).

4 Equation du couple électromagnétique dans le plan (dq)

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques est donnée par:

$$P_e = V_{As} i_{As} + V_{Bs} i_{Bs} + V_{Cs} i_{Cs} + V_{ar} i_{ar} + V_{br} i_{br} + V_{cr} i_{cr} \quad \text{(A1.9)}$$

Et dans le repère de Park, exprimée par l'expression suivante:

$$P_e = \frac{3}{2}\left(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}\right) \quad \text{(A1.10)}$$

En développant cette expression, nous trouvons que P_e se décompose en trois termes: puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source et puissance mécanique.

$$P_e = \left[R_s\left(I_{ds}^2 + I_{qs}^2\right) + R_r\left(I_{dr}^2 + I_{qr}^2\right) + I_{ds}\frac{d\phi_{ds}}{dt} + I_{qs}\frac{d\phi_{qs}}{dt} + I_{dr}\frac{d\phi_{dr}}{dt} + I_{qr}\frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r\left(\phi_{dr} I_{qr} - \phi_{qr} I_{dr}\right) \right] \quad \text{(A1.11)}$$

$$= P_J + P_{em} + P_{mec}$$

La puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par:

$$P_{mec} = C_m \Omega_{mec} \quad \text{(A1.12)}$$

Tel que:

$$C_m \frac{\omega_r}{P} = \omega_r\left(\phi_{dr} I_{qr} - \phi_{qr} I_{dr}\right) \quad \text{(A1.13)}$$

Donc le couple électromagnétique est donné par:

$$C_{em} = P\left(\phi_{dr} I_{qr} - \phi_{qr} I_{dr}\right) \quad \text{(A1.14)}$$

On peut aussi établir d'autres expressions pour le couple:

$$C_{em} = PM_{sr}\left(I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qs}\right) \quad \text{(A1.15)}$$

$$C_{em} = P\frac{M_{sr}}{L_r}\left(\phi_{qs}I_{dr} - \phi_{ds}I_{qr}\right) \quad \text{(A1.16)}$$

$$C_{em} = P\frac{M_{sr}}{L_r}\left(\phi_{dr}I_{qs} - \phi_{qr}I_{qs}\right) \quad \text{(A1.17)}$$

D'autre part les puissances active et réactive statoriques sont données par [164, 165]:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}\left(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}\right) \\ Q_s = \frac{3}{2}\left(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}\right) \end{cases} \quad \text{(A1.18)}$$

L'équation du couple électromagnétique (C_{em}):

$$\begin{cases} C_{em} = -P\frac{M}{L_r}\left(\phi_{dr}I_{qs} - \phi_{qr}I_{ds}\right) \\ C_{em} = P\frac{M}{L_s}\left(\phi_{ds}I_{qr} - \phi_{qs}I_{dr}\right) \end{cases} \quad \text{(A1.19)}$$

5 Equation mécanique dans le plan (dq)

Afin d'obtenir le modèle complet de la génératrice asynchrone à double alimentation, l'équation mécanique doit être prise en compte. En appliquant les relations fondamentales de la dynamique à la machine, l'équation mécanique est:

$$\frac{Jd\omega_r}{Pdt} = C_{em} - C_g - C_f \quad \text{(A1.20)}$$

Le couple de frottement est donné par : $C_f = \frac{f_v}{P}\omega_r = f_v\Omega_{mec}$

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \left(\frac{Jd\omega_r}{Pdt}\right) = -\frac{3}{2}P\frac{M}{L_s}\left(\varphi_{rd}i_{sq} - \varphi_{rq}i_{sd}\right) - C_g - f_v\Omega_{mec} \quad \text{(A1.21)}$$

ANNEXE 2

Calcul des paramètres du régulateur PI

Dans notre travail, nous nous intéressons à la méthode de conception qui est basé sur la compensation de la constante de temps du régulateur avec celle du processus de la grandeur à réguler. La figure (A2.1) montre un système de réglage de chaque puissance au niveau de stator de la GADA en boucle fermée par un régulateur PI.

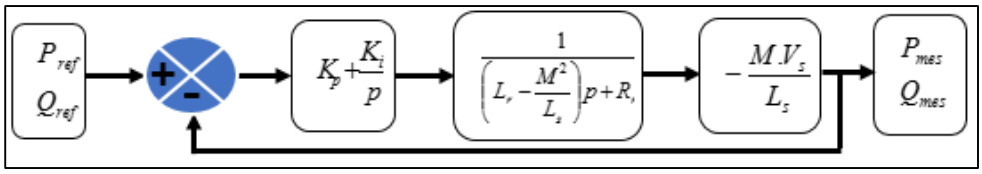


Figure A2.1. Schéma conventionnel de la régulation des puissances statoriques.

Avec

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_r L_s}\right) \tag{A2.1}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec le régulateur PI (du système de régulation de la figure (A2.1)) s'écrit comme suite [166]:

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}\frac{MV_s}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{\frac{P}{K_P}\left(P + \frac{L_s R_r}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}\right)} \tag{A2.2}$$

La méthode de compensation des pôles est celle choisie pour la synthèse des régulateurs.

Les zéros de la fonction de transfert seront compensés. Ainsi nous aurons l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \tag{A2.3}$$

Il est à noter que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs en dépendent directement. Dans le cas contraire la régulation sera défaillante.

En effectuant la compensation de la fonction de transfert en boucle ouverte, celle-ci devient:

$$FTBO = \frac{\dfrac{MV_s}{L_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)}}{P} \tag{A2.4}$$

En boucle fermée nous aurons:

$$FTBF = \frac{1}{1+\tau_r P} \tag{A2.5}$$

avec $\tau_r = \dfrac{1}{K_p}\dfrac{L_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)}{V_s M}$

Le temps de réponse du système τ_r sera choisi lors de la simulation afin d'offrir le meilleur compromis entre performances et rapidité. D'autant plus qu'une valeur non adaptée causerait des perturbations lors des régimes transitoires et provoquerait des dépassements et des instabilités indésirables [131].

Ainsi, les gains des correcteurs seront exprimés en fonction des paramètres de la machine Comme suit:

$$\begin{cases} K_p = \dfrac{1}{\tau_r}\dfrac{L_s\left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right)}{V_s M} \\ K_i = \dfrac{1}{\tau_r}\dfrac{R_r L_s}{V_s M} \end{cases} \tag{A2.6}$$

Il est clair que la méthode de la compensation des pôles n'est pas la seule alternative permettant la synthèse des régulateurs PI. Toutefois cette méthode procure l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de premier ordre [166].

On applique la même méthode sur la boucle des courants:

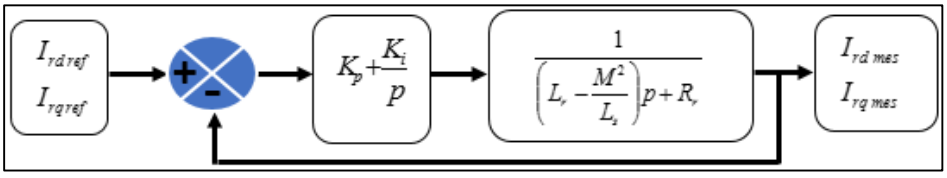


Figure A2.2. Schéma de la régulation des courants rotoriques.

La boucle de régulation de la tension de bus continu est nécessaire pour limiter $V_{dc}(t)$a cause du caractère élévateur du montage. On autre $V_{dc}(t)$ réguler revient à réguler la puissance fournie à la charge. L'amplitude de curant $i(t)$ est imposé par la sortie du régulateur de tension pou adapté la puissance absorbé par le redresseur à la puissance dissipée dans la charge.

La fonction de transfert du régulateur PI donné par:

$$FT_{PI} = K_P + \frac{K_i}{P} = K_f\left(1+\frac{1}{T_P}\right) \tag{A2.7}$$

La fonction de transfert en boucle ouvert du régulateur PI associée à la fonction de transfert du coté continu est:

$$FTBO = K_f\left(1+\frac{1}{T_P}\right)\left(\frac{1}{C_{dc}P}\right) \tag{A2.8}$$

En prenant $T = C_{dc}$,cette fonction de transfert en boucle ouvert se simplifier et réduit est alors à:

$$FTBO = K_f\left(\frac{1+\frac{1}{T_P}}{T^2 * P^2}\right) \tag{A2.9}$$

D'où la fonction de transfert en boucle fermée:

$$FTBF = K_f\left(\frac{1+\frac{1}{T_P}}{1+\frac{1}{T_P}+\frac{T^2 * P^2}{K_f}}\right) \tag{A2.10}$$

Pour une première estimation du paramètre du correcteur, on choisit K_f pour que le système se comporte comme un système de première ordre. il suffit donc que $T > \frac{T^2}{K_f}$; ce qui est facilement obtenu avec un choix convenable du facteur K_f du correcteur. Les paramètre Du régulateur PI sont définis comme suite:

$$\begin{cases} K_P = K_f \\ K_i = \dfrac{K_f}{C_{dc}} \end{cases} \tag{A2.11}$$