

Université Badji-Mokhtar Annaba

Département d'Électrotechnique

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat

**MODELISATION ET CONTROLE D'UNE CHAINE
EOLIENNE DE CONVERSION DE L'ENERGIE**

Par Azzedine Dekhane

Thèse présentée

en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

Option Commande des Systèmes Industriels et Énergies Renouvelables

© A.Dekhane, 2017

ملخص

طاقة الرياح أصبحت وعلى نحو متزايد جزء مهم من الشبكة الكهربائية، بحيث لا يمكن اعتبارها مصدر هامشي من مصادر الطاقة.

لذلك، فإن التأثير على الشبكة والتقطع، المتأصل في هذا النوع من الطاقة أصبح مهم للغاية. في هذا العمل سنتناول الأهداف والتقنيات المستخدمة للتحكم المستخدم في المحرك "التوربيني" بالمحور الأفقي ذي الثلاث شفرات المرتكز على مولد غير متزامن مضاعف التغذية (GADA) .

لقد قمنا بتطوير النموذج الرياضي الخاص بالمولد وكافة نضام توليد الكهرباء المستخدم لغرض المحاكاة و التحليل ، وتحكمنا في درجة ميل شفرات التوربين وطاقة المولد للسيطرة على الطاقة النشطة وغير النشطة الصادرة عند مخرج التوربين. متطلبات الشبكة الكهربائية ، تفرض منا الحد من تغيرات الطاقة مع الاخذ بعين الاعتبار خصوصية سرعة تغير سرعة الرياح في الجزائر.

نتائج المحاكاة المنجزة من خلال برنامج "Matlab Simulink" تم تفسيرها تحليلها ومناقشتها. وعلاوة على ذلك، فإن التحكم الرقمي لاسراتيجية التشغيل معروض في الفصل الأخير، وهو ما يسمح لنا باختبار مدى نجاعة الاستراتيجية.

كلمات مفتاحية : طاقات متجددة ، طاقة الرياح، رياح، مولد غير متزامن مزدوج التغذية، تحكم، نمذجة رياضية، محاكاة.

Résumé

L'énergie éolienne joue un rôle de plus en plus important dans le réseau électrique, elle ne peut plus être considérée comme une source d'énergie marginale. Par conséquent, l'impact sur le réseau de l'intermittence, inhérente à ce type d'énergie devient non négligeable. Dans ce travail on passe en revue les objectifs et les techniques utilisées dans le contrôle d'une éolienne tripales à axe horizontal basée sur une génératrice asynchrone doublement alimentée. Nous développons le model en vue de la simulation et l'analyse de la génératrice. On procède au contrôle de l'inclinaison des pales de la turbine et de la génératrice pour pouvoir maitriser les puissances active et réactive à la sortie de l'éolienne. Les exigences du fonctionnement du réseau en temps réel nous obligent à limiter les fluctuations de la puissance tout en assurant le maintien des paramètres en relation avec la variation de la vitesse du vent en Algérie.

Les résultats de simulations réalisés sur Simulink de MATLAB sont interprétés et commentés. Par ailleurs, l'implémentation numérique de la stratégie de contrôle est présentée dans le dernier chapitre, celle-ci nous a permet d'évaluer les performances de la stratégie.

Mots-clés : Énergies renouvelables, énergie éolienne, vent, machine asynchrone à double alimentation, contrôle, modélisation mathématique, simulation.

Abstract

Wind energy is an increasingly important part in the grid, it cannot be considered as a marginal energy source. Therefore, the impact on the network and the intermittently, the inherent in this type of energy becomes significant. In this work we review the objectives and techniques used in the control of a three-bladed horizontal axis wind turbine based on a doubly fed induction generator. We develop the model for the simulation and analysis of the generator. We control the inclination of the turbine blades and generator power to master the active and reactive power at the output of the turbine. The requirements of the operation in real-time network require us to limit power fluctuations while ensuring the parameters maintenance in relation to the variation of the wind speed in Algeria.

The results of simulations realized under MATLAB Simulink software are interpreted and discussed. Moreover, the digital control strategy implementation is presented in the last chapter, it allows us to assess the performance of the strategy.

Keywords : Renewable energies, wind power, wind speed, doubly fed induction machine, control, mathematical modeling, simulation.

Table des matières

ملخص.....	1
Résumé.....	2
Table des matières.....	4
Liste des tableaux.....	7
Liste des figures	8
Remerciements.....	12
Introduction Générale	13
Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables et présentation des systèmes éoliens ...	15
1. Historique et Développement des Énergies Renouvelables [1].....	15
1.1. Hydraulique.....	17
1.2. Photovoltaïque	17
1.3. L'Éolien	17
2. Étude sur le bruit et la nuisance d'une éolienne	18
2.1. Origine du bruit.....	19
3. Effets sonores et leurs atténuations.....	20
3.1. Caractéristiques sonores des éoliennes	21
4. Atténuation du bruit	22
4.1. Atténuation du bruit mécanique.....	22
4.2. Atténuation du bruit aérodynamique	22
5. Problématique d'insertion une production décentralisée.....	23
5.1. Impact de la production décentralisée sur le réseau.....	24
5.1.1. Impact sur le sens du transit de puissance [21].....	24
5.1.2. Impact sur le plan de tension [22].....	25
5.1.3. Incertitude sur la phase de planification [23].....	25
5.1.4. Nécessité de renforcement du réseau [26]	25
6. Technologies actuelles des systèmes Éoliens [27].....	25
6.1. Régulation mécanique de la puissance	25

6.2.	Éoliennes à vitesse fixe	26
6.3.	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation 27	
6.4.	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone	30
7.	Capacités de réglages des différentes technologies d'éoliennes de grande puissance..	31
7.1.	Capacité de réglage de la tension et de la puissance réactive	31
7.2.	Capacité de réglage de la fréquence.....	32
7.3.	Capacité de fonctionnement en isolé	33
Chapitre II : Modélisation des éoliennes à axe horizontal		36
1.	Composantes d'un aérogénérateur	36
2.	Rendement énergétique d'un capteur éolien.....	37
3.	Modèle de la turbine éolienne.....	40
3.1.	Modèle du Multiplicateur	41
3.2.	Modèle de l'Arbre.....	42
3.3.	Modèle de l'actionneur des pales.....	43
4.	Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA).....	45
4.1.	Topologies de générateur	45
4.2.	Structure de la Machine Etudiée	49
4.3.	Les différents Modes de fonctionnement de la GADA	50
4.4.	Modélisation de la GADA	52
5.	Simulation de la GADA.....	56
6.	Résultats de Simulations et interprétation.....	56
Chapitre III Commande de la puissance		64
1.	Contrôle séparé des puissances active et réactive de La GADA	65
1.1.	Commande directe	66
1.1.1.	Mise en place de la régulation	66
1.1.2.	Synthèse du régulateur PI	67
1.1.3.	Résultats de simulations.....	69
1.2.	Commande indirecte	72
2.	Régulateur flou.....	78

2.1.	Notions de base de la logique floue	78
2.2.	Opérateurs et Normes	80
2.3.	Structure d'un régulateur Flou	81
3.	Contrôle direct avec un régulateur flou.....	83
4.	Simulation et comparaison des différentes méthodes.....	86
Chapitre IV Techniques du contrôle de la tension du bus continu		94
.1	Description du système éolien à évaluer.....	94
2.	MODELISATION DE LA GADA	95
3.	Simulations Et Discussions.....	97
3.1.	Cas Idéal.....	97
3.2.	Cas d'un convertisseur non commandé	99
3.3.	Cas d'un redresseur commande en MLI	101
Conclusion Générale.....		106
Annexe A (Notations).....		i
Liste des abréviations et acronymes		ii
Annexe B		iv

Liste des tableaux

Tableau 1.	Classification des turbines éoliennes [28]	28
Tableau 2.	Capacités de réglage des différentes technologies éoliennes	33
Tableau 3.	Composants d'une éolienne à axe horizontale.....	36
Tableau 4.	Règles floues	84
Tableau 5.	Temps de réponse des régulateurs	90

Liste des figures

Figure 1.	Vue en coupe d'une éolienne.....	19
Figure 2.	Niveau sonore/ vitesse du vent	20
Figure 3.	Zones de fonctionnement de l'éolienne	26
Figure 4.	Éolienne à vitesse fixe	27
Figure 5.	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation.....	28
Figure 6.	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à grand nombre de paires de pôles	31
Figure 7.	Vue en coupe d'une éolienne à axe horizontal [1].....	36
Figure 8.	Caractéristique de la puissance en fonction du vent.	39
Figure 9.	Modèle de la turbine éolienne.....	40
Figure 10.	Coefficients de puissance en fonction de Lambda et Beta.	41
Figure 11.	Modèle de l'arbre et de la turbine.	43
Figure 12.	Schéma de principe du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice 43	
Figure 13.	Modèle et commande de système de calage de pales.	44
Figure 14.	Caractéristiques puissance vitesse mécanique, et puissance vitesse de la turbine. 44	
Figure 15.	Génératrice avec vent constant.	45
Figure 16.	Génératrice à rotor bobiné.	46
Figure 17.	GADA à vitesse variable.	47
Figure 18.	Convertisseur en série à vitesse variable connecté à la génératrice.....	48
Figure 19.	Principe du rotor bobiné [15].....	49
Figure 20.	Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une GADA [9].....	51
Figure 21.	Système interne de la GADA.....	56
Figure 22.	Model du vent pour la simulation.	57
Figure 23.	Vitesse de la turbine lors d'un vent constant.	57
Figure 24.	Vitesse de la turbine lors d'un vent variable.....	58
Figure 25.	Couple de la turbine (Vent constant).	58

Figure 26.	Couple de la turbine (vent variable).....	59
Figure 27.	Puissance active (Vent constant).	59
Figure 28.	Puissance active (Vent variable).....	60
Figure 29.	Puissance réactive (vent constant)	60
Figure 30.	Puissance réactive (Vent variable).....	61
Figure 31.	Schéma bloc de la commande directe.	67
Figure 32.	Boucle de régulateur PI.....	67
Figure 33.	Résultats de simulation pour la commande.	70
Figure 34.	Résultats de simulation pour la commande directe pour un vent variable.	71
Figure 35.	Schéma bloc de la commande indirecte.....	72
Figure 36.	Puissance active et la puissance réactive (vent constant).	73
Figure 37.	Puissances active et réactive (vent variable).....	74
Figure 38.	Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.	75
Figure 39.	Puissance active et la puissance réactive (vent constant).	76
Figure 40.	Puissance active et la puissance réactive (vent variable).....	77
Figure 41.	Degrés d'appartenance en logique booléenne et les ensembles.....	79
Figure 42.	Exemple d'ensembles considérés en logique floue.	79
Figure 43.	Cas de l'ensemble flou "moyenne" de la variable.....	80
Figure 44.	Synoptique global d'un régulateur flou.	82
Figure 45.	Schéma synoptique du control.....	84
Figure 46.	Entrée et la sortie du régulateur de puissance active.	85
Figure 47.	Entrée et la sortie du régulateur de puissance réactive.	85
Figure 48.	commande de puissance active et réactive (directe PI)	87
	88
Figure 49.	commande de puissance active et réactive (régulateurs flous).	88
Figure 50.	Puissance active et réactive (Contrôle indirect avec Feedback).	89
Figure 51.	Système éolien à vitesse variable.....	94
Figure 52.	Tension bus continu(a),puissance active (b), puissance réactive (c), courant (rouge) et tension statorique (bleu) dans la phase A (d).	98

Figure 53. Tension bus continu(a), puissance active (b), puissance réactive (c), courant (rouge) et tension statorique (bleu) dans la phase A (d). 100

Figure 54. Schéma bloc d'un redresseur MLI intégré dans un système éolien..... 102

Figure 55. Tension (a),puissance active (b), puissance réactive (c), courant (rouge) et tension statorique (bleu) dans la phase A (d)..... 103

*Quand
le vent du changement se lève, les uns construisent des murs, les autres des moulins à vent*

” Proverbe Chinois, ”

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Docteur **Abdallah ABDERREZAK**. Si j'ai mené cette thèse à terme, c'est grâce à lui. Il a su me transmettre son motivation et son intérêt pour la recherche scientifique. J'ai beaucoup appris de lui.

Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance pour son aide, son soutien, ses conseils ainsi que la confiance qu'il m'a faits en acceptant de m'encadrer.

Je tiens également à remercier Le professeur **Hocine LABAR** qui m'a fait l'honneur de présider le jury ainsi que les Professeurs **Tahar BAH**I notre chef de formation doctorale, **Mourad HOUABES** et **Abdelkrim MOUSSAOUI** et le Docteur **Hamid KHERFANE** pour avoir accepté de faire partie du jury et d'y consacrer une partie de leurs temps.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

Introduction Générale

Le vent est une source d'énergie renouvelable, économique, exploitable avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement. Dans le monde entier, les ressources d'énergie éolienne sont pratiquement illimitées. Les récents développements technologiques dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, en électronique de puissance et en commande de machines électriques tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile.

Cette source d'énergie, a connu une croissance importante au cours de la dernière décennie dans beaucoup de régions dans le monde. Elle constitue par conséquent la source d'énergie renouvelable qui présente le plus grand taux d'intégration au sein des réseaux électriques. Pour soutenir son évolution et augmenter sa valeur économique, l'industrie éolienne et la recherche doivent être capables de trouver les solutions des problèmes qui peuvent freiner son évolution et qui sont liés à la nature de cette source d'énergie. L'un des principaux défis étant de trouver des solutions face à l'intermittence du vent qui rend sa production variable et incontrôlable. Pour ce faire, le développement d'outils capables de prédire la puissance produite des centrales éoliennes à court terme est une solution qui aidera les opérateurs des réseaux électriques à intégrer davantage l'énergie éolienne dans leur portefeuille énergétique tout en maintenant le réseau électrique équilibré en tout temps.

L'Algérie comme tout autre pays a tracé sa feuille de route pour l'usage et la promotion des énergies renouvelables. Motivé par son engagement envers la communauté internationale pour la lutte contre le réchauffement climatique et sa possession de l'un des plus grands gisements solaires au monde, une série de lois et d'institutions viennent consolider ce programme ambitieux.

L'objectif de ce travail consiste essentiellement à la modélisation et le contrôle d'une chaîne éolienne à axe horizontale basée sur une machine asynchrone double alimentation pour pouvoir répondre aux exigences du réseau en limitant les fluctuations en matière de la puissance à fournir des services-systèmes tout en mettant en avant la

rentabilité économique du système.

Dans le chapitre 1, un bilan sur les formes d'énergies les plus consommées dans le monde est exposé. Il est suivi de la présentation des problèmes environnementaux liés à l'utilisation de l'énergie.

Une présentation générale de la technologie éolienne actuelle est faite en commençant par la classification couramment utilisée. La technologie utilisant les boîtes de vitesses pour les turbines éoliennes est aussi présentée. Les différents types de générateurs électriques présents dans les turbines éoliennes sont exposés. Les applications, avec un segment dédié aux systèmes isolés sont aussi proposées. Un résumé sur les programmes et les textes réglementaires dans le domaine des énergies renouvelable en Algérie.

Dans le deuxième chapitre, on présente en premier lieu les différents types de machines électriques utilisées pour les systèmes éoliens et la modélisation mathématique de chaque élément dans la chaîne de conversion.

Finalement, nous introduisant l'ensemble des modèles dans la simulation du modèle global (turbine- multiplicateur- génératrice) sans commande.

Le chapitre 3 comporte l'étude du contrôle indépendant des puissances actives et réactives en utilisant la modélisation du chapitre précédent nous présentons trois types de contrôle séparé de la puissance active et réactive pour une éolienne à axe horizontal en utilisant la modélisation du chapitre précédent, afin de comparer leurs performances : la méthode directe avec un PI et un régulateur à base de logique floue, et aussi le contrôle de la méthode indirecte avec boucle. Nous visons à obtenir le maximum de performances et la réduction du nombre de contrôleurs, pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne.

Le dernier chapitre présente une étude sur l'effet de réglage de la tension du bus continu au niveau de la chaîne de conversion pour maintenir une robustesse de la commande présentée. A cet effet, l'analyse du comportement du système sous différents cas d'alimentation du bus est présentée avec comparaison afin de valider les principes théoriques.

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables et présentation des systèmes éoliens

Cette partie de thèse présente un bilan des formes d'énergies les plus consommées au monde. Il établit la corrélation entre l'utilisation et la consommation de l'énergie et les problèmes environnementaux qui s'ensuivent. Les conséquences de l'évolution de l'industrie électrique vers un marché concurrentiel ouvert y sont abordées succinctement ainsi que les caractéristiques économiques et environnementales des formes renouvelables d'énergie. La technologie éolienne actuelle y est présentée sous la forme d'une classification couramment employée. Les différents types de générateurs électriques utilisés dans les éoliennes y sont exposés. On présente aussi une étude sur le bruit et la nuisance d'une éolienne

1. Historique et Développement des Énergies Renouvelables [1]

Le développement et l'utilisation en vue de l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance, ils sont naturellement décentralisés, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à base d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie [1].

Les énergies renouvelables sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps, moulins à eau, à vent, feu de bois, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire. Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX^{ème} siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie

que l'on pensait plus prometteuses [2]. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs observés depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables.

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde [3].

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elles perturbent généralement moins l'environnement, n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ; elles sont inépuisables ; elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ; elles offrent une importante indépendance énergétique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent [4]:

- L'énergie d'origine à finalité mécanique (à partir du vent, des mouvements de l'eau...).
- L'énergie à finalité électrique (à partir de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de barrages hydrauliques...).
- L'énergie d'origine et à finalité thermique (géothermie, solaire thermique...).

La plupart de ces formes d'énergie proviennent du soleil avec quelques exceptions près (marées, géothermie...). Étant donné que l'énergie sous forme mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable que localement (pompage direct de l'eau, moulins...). C'est pourquoi elle est transformée en énergie électrique. A l'exception des quelque autres formes de l'énergie tel que la biomasse et de l'hydraulique, un

inconvenient majeur des énergies renouvelables provient de la non-régularité des ressources. De plus, les fluctuations saisonnières et journalières de la demande en puissance ne sont pas forcément synchronisées avec les ressources [5]. Par exemple, en hiver, le besoin énergétique est plus important pour le chauffage et l'éclairage alors que les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La diversification des sources permet statistiquement de limiter ces inconvénients. Il peut s'agir notamment de coupler des panneaux photovoltaïques avec une éolienne. Le stockage de l'énergie électrique supprime ces inconvénients lorsque la technologie le permet.

Les formes d'énergie renouvelables à finalité électrique qui sont actuellement les plus exploitées tout en respectant au mieux l'environnement sont l'hydraulique, le solaire photovoltaïque et l'éolien.

1.1. Hydraulique

Par rapport à l'air, sa densité plus importante en fait un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable ».

1.2. Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement solaire. Les panneaux photovoltaïques, composés de cellules photovoltaïques à base de silicium, ont la capacité de transformer l'énergie photonique en énergie électrique. Le courant continu ainsi produit est directement utilisable.

1.3. L'Éolien

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement. Exploitée depuis l'antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux

premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient un taux de croissance de 30% par an depuis une dizaine d'années. L'Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, comptait environ 15000 MW de puissance installée en 2000. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance installée dans le monde[6].

2. Étude sur le bruit et la nuisance d'une éolienne

Les sources d'énergies renouvelables couplées à une utilisation rationnelle de l'énergie permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile, et par conséquent de réduire les impacts environnemental et socio-économique quel que soit la demande en énergie. Cependant, les parcs éoliens ont un avenir très prometteur en Algérie et par conséquent on projette de les installer en grande échelle.

Dans cette étude, nous essayons de mettre en évidence quelques éléments indicateurs sur la nuisance que peut causer une chaîne éolienne pour la production de l'énergie électrique.

L'Algérie envisage la substitution des énergies fossiles progressivement par des sources d'énergie renouvelables. Ceci grâce à la situation géographique et des avantages dont bénéficie notre pays. A cet effet, l'objectif est que le marché des énergies renouvelables local, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite au lieu de 0,02% aujourd'hui [7].

Malgré l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables, la population s'interroge sur les impacts environnementaux et sanitaires conséquents à l'implantation d'éoliennes. En particulier, de nombreux riverains d'installations futures mettent en avant l'argument du bruit généré par les éoliennes pour refuser l'installation de nouveaux parcs. Nous essayons donc, de mettre en évidence quelques éléments indicateurs sur la nuisance que peut causer une chaîne éolienne pour la production de l'énergie électrique. A titre d'exemple, une éolienne de 1,5 MW distante de 500 mètres cause un niveau de bruit de

40db [8]. Et, également le nombre des éoliennes dans un secteur donné fait augmenter le niveau sonore. En théorie, une deuxième source sonore d'une même puissance, localisée à la même distance d'un observateur que la première, ajoute 3db à sa perception. Ainsi, deux éoliennes perçues individuellement à 40db totaliseraient théoriquement 43db à l'oreille de l'observateur. Il est important de rappeler que le niveau de bruit diminue évidemment avec la distance et que par ailleurs le seuil de la douleur que peut causer un bruit est de 120db et le bruit que dégage une éolienne est d'environ 50db. Le bruit est aussi fonction de la technologie de fabrication de l'éolienne. C'est pourquoi, le bruit a pu constituer un problème avec les éoliennes de première génération. Elles faisaient appel à des technologies aujourd'hui obsolètes.

2.1. Origine du bruit

La figure (1.1) montre une vue en coupe d'une éolienne à axe horizontal. Ces dernières sont majoritairement présentes sur le marché.

On distingue les pales (1) destinées pour un mouvement de rotation, un arbre lent (2) lié à un multiplicateur (3) qui ajuste, à sa sortie, la vitesse d'un arbre qualifié de rapide (4) et au bout de la chaîne une génératrice (5) qui produit l'électricité.

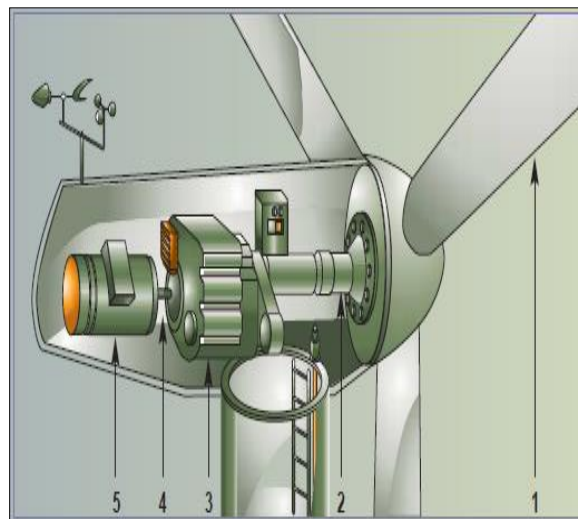


Figure 1. Vue en coupe d'une éolienne

Le bruit généré par une éolienne à deux origines [9] : le bruit mécanique et le bruit

aérodynamique.

Le bruit mécanique est créé par les différents organes en mouvement tels que les engrenages à l'intérieur du multiplicateur.

Par ailleurs, le bruit aérodynamique est dû au contact du vent et de son écoulement autour des pales qui engendrent un son caractéristique, comme un souffle. La plus grande partie du bruit a pour origine l'extrémité de la pale et dans une moindre mesure son bord de fuite [10]. Toutefois, en l'absence de vent, les éoliennes restent elles aussi silencieuses donc absolument calmes.

3. Effets sonores et leurs atténuations

Le vent, en fonction de sa vitesse, participe à l'effet de masque. L'étude réalisée dans [11] décrit la relation entre le niveau sonore ambiant d'un milieu agricole relativement ouvert, avec parcelles boisées et la vitesse du vent.

La figure donne une idée du niveau sonore en fonction de la vitesse du vent.

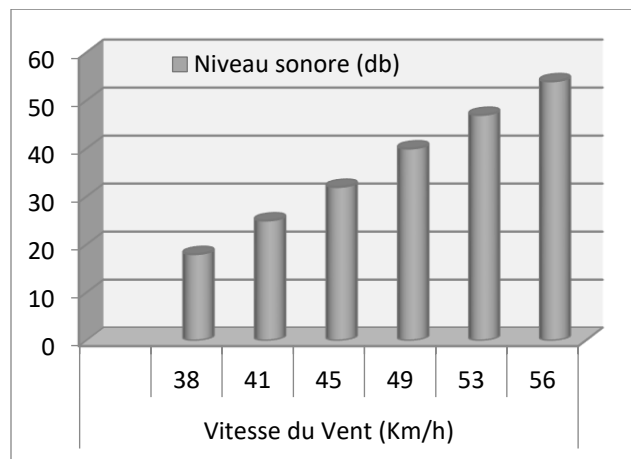


Figure 2. Niveau sonore/ vitesse du vent

Le niveau sonore d'une éolienne se stabilise lorsque le vent atteint une certaine vitesse. Au-delà de cette vitesse, le niveau sonore du vent continue à augmenter alors que celui de l'éolienne reste stable. Le bruit du vent vient alors couvrir celui de l'éolienne.

3.1. Caractéristiques sonores des éoliennes

Une émission sonore est caractérisée par sa fréquence (*Hz*), elle montre le caractère grave ou aigu d'un son ; et, son intensité (*db*), ce qui correspond au niveau sonore physiquement émis ou perçu. Sachant que le niveau sonore d'une machine est exprimé par la relation suivante :

$$L_w = L_p + \log(Q/4 * \pi * r^2) \quad (1.2)$$

Où, L_w et L_p sont respectivement les niveaux de puissance et sonore ; Q étant la directivité, égale à 2 pour une éolienne ; et r est l'éloignement de la source.

On en déduit le caractère logarithmique du niveau sonore en relation de l'éloignement de la source sonore. Il est reconnu que les éoliennes peuvent émettre des sons de basse fréquence et des infrasons moins de 20 Hz. Les connaissances reliées à ce type de son demeurent pour l'instant relativement peu développées et les impacts pouvant en résulter sont encore plus difficiles à évaluer. Selon une revue récente de la littérature sur le sujet, effectuée en Nouvelle-Zélande [12], rien ne permet d'affirmer que les sons de basse fréquence ou les infrasons peuvent causer des problèmes à qui que ce soit vivant à proximité d'une éolienne ou d'un parc éolien. Néanmoins, il est demandé aux promoteurs d'effectuer, dans le cadre de leur suivi du climat sonore des projets de parcs éoliens, une évaluation des sons de basse fréquence. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant indiquent que la fréquence du bruit produit par les éoliennes est principalement de valeur moyenne et qu'il n'y a pas de tonalité audible (pointe à une fréquence en particulier). Notons que selon l'agence française de la sécurité sanitaire, de l'environnement et du travail, « Aucune donnée sanitaire disponible ne permet d'observer les effets liés à l'exposition aux basses fréquences et aux infrasons générés par les éoliennes » [13].

4. Atténuation du bruit

La meilleure façon d'atténuer un bruit est de le diminuer à la source. Les éoliennes récentes sont de plus en plus performantes et par conséquent, de moins en moins bruyantes. Outre la diminution à la source, la méthode couramment utilisée afin d'atténuer les impacts potentiels des installations éoliennes sur la population avoisinante et les risques pour la santé qui pourraient découler d'une exposition prolongée à un niveau de bruit trop élevé est de prévoir une distance séparatrice appropriée entre la source du bruit et les constructions ou usages avoisinants susceptibles d'être affectés par cette source.

4.1. Atténuation du bruit mécanique

Dans les années 80 les éoliennes de ces périodes laissaient percevoir du bruit mécanique jusqu'à des distances relativement importantes. Or, dans ces dernières années, les émissions sonores des éoliennes ont été réduites grâce aux innovations technologiques des nouvelles éoliennes. Actuellement, les multiplicateurs sont spécialement conçus pour les éoliennes, et non comme auparavant on trouvait les systèmes standards utilisés dans l'industrie.

Grace à l'avancée technologique, on construit aujourd'hui des éoliennes sans multiplicateur de vitesse, ce qui réduit encore le bruit.

Par ailleurs, le capitonnage de la nacelle permet de réduire les bruits centrés dans les moyennes et hautes fréquences.

4.2. Atténuation du bruit aérodynamique

L'utilisation des profils et géométries de pales spécifiques à l'éolien a permis de réduire leur son. Les recherches se poursuivent, principalement pour des raisons de performance. Le passage des pales devant la tour crée un bruit qui se situe dans les basses fréquences. Le bruit peut aujourd'hui être considéré comme un problème secondaire si des précautions élémentaires sont prises.

Les éoliennes sont de plus en plus silencieuses et les nuisances sonores au niveau des habitations peuvent être évitées.

En conclusion, la visite d'un parc éolien constitue certainement le meilleur moyen de se forger une opinion sur le bruit des éoliennes en fonctionnement, en se plaçant à différentes distances des machines. Dans le cadre d'une démarche d'information du public, cela permet aux acteurs concernés, dans leur diversité, de vivre l'expérience collective de la perception sonore.

La procédure de permis de construire, à laquelle toute installation éolienne est soumise, impose la réalisation d'une étude sur l'impact dont le but de limiter tout risque de nuisance sonore. De ce fait, on impose une distance minimum entre l'éolienne et la première habitation. Actuellement, une norme spécifique de mesure du bruit pour les éoliennes est élaborée. Cette dernière prévoit une procédure pour mesurer le bruit une fois les éoliennes installées.

5. Problématique d'insertion une production décentralisée

Les problèmes induits par l'intégration d'éoliennes dans le réseau électrique sont causés par :

- Leur production aléatoire et difficilement prévisible ;
- Une absence de réglage puissance - fréquence ;
- Une participation au réglage de la tension limitée pour les éoliennes à vitesse variable, et aucune participation à ce réglage pour les éoliennes dont la génératrice est directement couplée au réseau ;
- Une sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence pour certaines technologies ;
- Une sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent.

Les problèmes majeurs de l'éolien sont la grande variabilité de sa production et surtout la difficulté de prévoir cette production précisément plusieurs heures à l'avance [14].

En général, il y a plus de vent en hiver qu'en été, durant le jour que la nuit, ce qui correspond aux tendances de la consommation. Cependant, il apparaît que durant les périodes de grandes chaleurs ou de grands froids, la puissance éolienne est très faible, voire nulle [15]. La multiplicité des installations éoliennes sur un vaste territoire est néanmoins

favorable à une corrélation entre la consommation et la production éolienne comme le montre des études sur le foisonnement éolien [16].

Le fait de ne pas participer aux services système (réglage de la tension, de la fréquence, démarrage en autonome ou black- start, possibilité de fonctionner en îlotage,...) amène les éoliennes à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique [17]. Le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques. Le taux de pénétration de l'éolien, c'est-à-dire la puissance que génèrent les éoliennes par rapport à la puissance totale consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables [18].

La grande sensibilité de l'éolien aux perturbations du réseau, telles que les creux de tension ou les variations de fréquence, entraîne souvent une déconnexion de la production lors d'incidents sur le réseau [19].

5.1. Impact de la production décentralisée sur le réseau

Dans la littérature, plusieurs études ont été menées pour identifier les impacts de la production décentralisée, puis proposer des solutions : [20].

A l'heure actuelle, la majorité des productions décentralisée sont raccordées au réseau de distribution. On s'intéressera d'abord à l'impact sur les réseaux de distribution, puis aux répercussions sur le réseau de transport.

5.1.1. Impact sur le sens du transit de puissance [21]

Les réseaux ont été dimensionnés pour transiter des flux de puissance du réseau de transport vers le réseau de distribution. L'injection de puissance par les productions décentralisées au niveau de la distribution va engendrer une inversion des flux. Les appareils de protection, à l'origine unidirectionnels, vont devoir alors être bidirectionnels. De plus, des problèmes de congestion locale peuvent apparaître et nécessiter un renforcement du réseau.

5.1.2. Impact sur le plan de tension [22]

La production décentralisée va fatalement modifier le plan de tension près de son point de connexion. Cependant, le gestionnaire de réseau doit être capable de conserver la tension dans des plages définies. Il est demandé aux centrales d'une puissance supérieure à 1 MW de pouvoir ajuster la tension à leur point connexion à la demande du gestionnaire.

5.1.3. Incertitude sur la phase de planification [23]

Les sources intermittentes (éolien, micro hydraulique ...) représentent une part importante des productions décentralisée [24]. Le problème majeur de l'éolien est l'incertitude sur les prévisions de la vitesse du vent, sur les sites éoliens, induisant une incertitude sur la production des éoliennes. Les erreurs de prévisions sur 24 h peuvent atteindre des valeurs de plus de 50% en négatif (sous-production) ou en positif (surproduction) avec des changements de signe rapides en cours de journée. Des capacités de production de réserves contrôlables sont alors nécessaires pour pallier à ces incertitudes, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe.

La prévision est globalement bonne en ce qui concerne l'amplitude mais présente une incertitude sur le moment où ce niveau de production sera atteint [25].

5.1.4. Nécessité de renforcement du réseau [26]

La capacité des lignes et des postes est limitée. Cette limitation peut constituer dans le cas de l'éolien un problème aigu, car les lieux de production (sites ventés) sont souvent éloignés des lieux de consommation.

6. Technologies actuelles des systèmes Éoliens [27]

6.1. Régulation mécanique de la puissance

L'objectif de cette régulation est double, d'une part protéger l'éolienne du vent fort et d'autre part délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale à une vitesse de vent nominale au-delà de cette vitesse les

paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement :

- La zone I : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- La zone II : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- La zone III : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n
- La zone IV : la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($=90^\circ$)

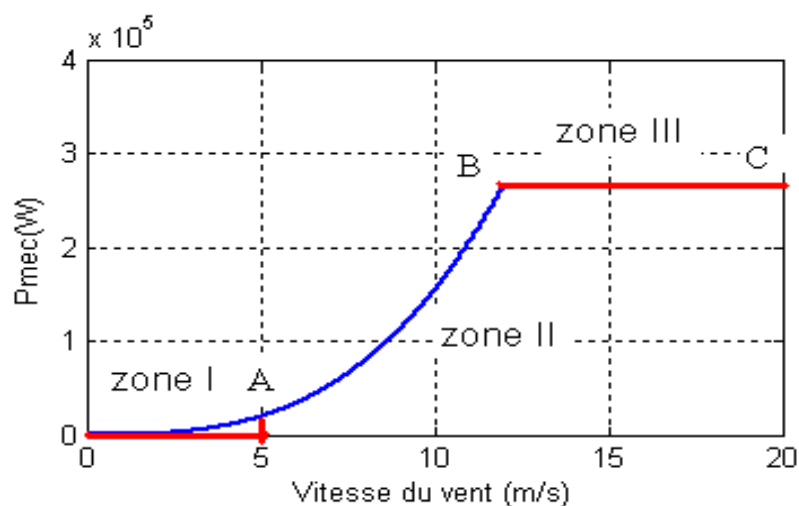


Figure 3. Zones de fonctionnement de l'éolienne

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

- Le système « pitch » (pas de calage variable)
- Le système « stall » ou (à décrochage aérodynamique)
- Le système « stall actif »

6.2. Éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure 4). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch

control).

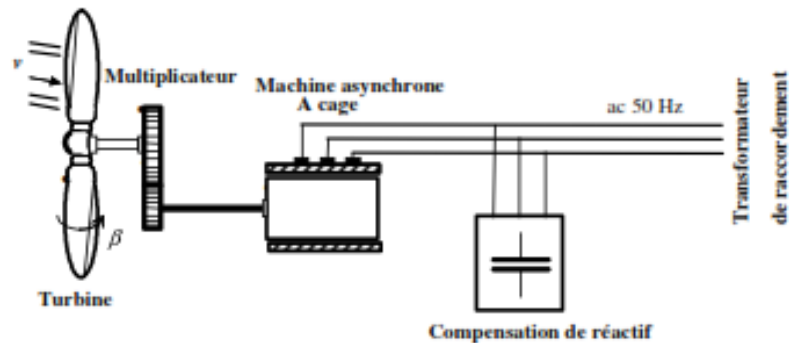


Figure 4. Éolienne à vitesse fixe

La dynamique relativement lente du pitch control (plusieurs dizaines de seconde) et les variations rapides de la vitesse du vent amènent ce type d'éolienne à suivre approximativement la caractéristique de réglage. Ce type d'éolienne n'offre donc quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée, d'autant plus que la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée du réseau.

6.3. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation

En termes de puissance d'une turbine (*Figure 3*), le lieu du point représentant le maximum de la puissance convertie peut être obtenu et parcouru en adaptant la vitesse de la turbine. Ainsi, afin de maximiser la puissance convertie, la vitesse de la turbine doit donc être adaptée par rapport à la vitesse du vent. C'est pourquoi les éoliennes de forte puissance raccordées aux réseaux moyenne et haute tension fonctionnent de plus en plus fréquemment à vitesse variable. Les principaux avantages de ces éoliennes sont :

- Augmentent de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance est converti. Indirectement la disponibilité et la puissance générée du système sont augmentées.
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique

permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesses de vent élevées. En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.

- Elles réduisent les efforts mécaniques lors des variations de la vitesse du vent, d'où une adaptation de la vitesse de la turbine. Cette flexibilité permet d'amoinrir l'incidence des rafales de vent sur la puissance.
- Elles réduisent le bruit lors du fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente.

Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

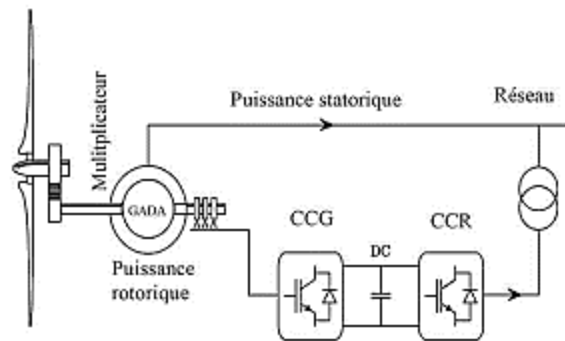


Figure 5. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation

Tableau 1. Classification des turbines éoliennes [28]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
petite	moins de 12 m	moins de 40 kW
moyenne	12 m à 45 m	de 40 kW à 999 kW
grande	46 m et plus	1MW et plus

Le glissement est fonction de la résistance du circuit rotorique. Ainsi, pour les machines à circuit rotorique bobiné, afin de rendre variable la vitesse mécanique du

générateur en modifiant la résistance du circuit rotorique (variation du glissement). Au lieu de dissiper cette puissance, il est beaucoup plus intéressant de la renvoyer sur le réseau au moyen de deux convertisseurs électroniques de puissance reliés par un bus continu. Le circuit rotorique est accessible grâce à un système de balais/bagues. En conséquence, la puissance transitant à travers le circuit rotorique est devenue variable et permet deux fonctionnements distinctes :

- Si la vitesse mécanique est supérieure à la vitesse synchrone ($g < 0, \Omega > \Omega_s$), un fonctionnement hypersynchrone est obtenu pour lequel la puissance est extraite du circuit rotorique et est envoyée sur le réseau à travers les convertisseurs de puissance.
- Sinon ($g > 0, \Omega < \Omega_s$), un fonctionnement hyposynchrone est obtenu et la puissance circule alors du réseau vers le circuit rotorique.

Seule une variation de la vitesse de $\pm 30\%$ (correspondant à la valeur du glissement g) autour de la vitesse de synchronisme est acceptable; ceci va engendrer une limitation de la puissance circulant dans le circuit rotorique ($|g.P|$). Étant donné qu'une seule fraction de la puissance est rendue variable, la chaîne de conversion électronique est dimensionnée pour une moindre puissance et présente un coût réduit.

Le facteur de puissance sera réglé car la génératrice est contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone. En effet, les puissances active et réactive seront contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté sur le circuit électrique du rotor [29][30].

Les zones de fonctionnement caractéristiques sur une éolienne de [31] :

- La zone 2 : une extraction maximale de la puissance est réalisée en adaptant la vitesse de la génératrice. La vitesse mécanique est très variable et correspond à une grande plage de variation de la puissance électrique produite. L'angle de calage des pales est maintenu constant, seul le contrôle du couple électromagnétique de la génératrice est mis en œuvre dans cette zone.

- La zone 3 correspond à une vitesse mécanique quasiment constante de la génératrice. Dans cette zone, la puissance générée est proportionnelle au couple (d'origine éolien) appliqué. La vitesse moyenne de la turbine est réglée par action sur l'orientation des pales, la puissance débitée au réseau est lissée impliquant un stockage inertiel dans les masses en rotation.
- La zone 4, la puissance est limitée à sa valeur maximale grâce au système d'orientation des pales.

Le contrôle de la puissance générée peut donc être réalisé en agissant sur l'orientation des pales, mais aussi en contrôlant le couple de la génératrice asynchrone au moyen du convertisseur de puissance connecté au rotor de la génératrice. Le contrôle de la puissance générée est plus précis.

Il existe également une technologie d'éolienne basée sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné dans laquelle les bobinages rotoriques sont reliés à une résistance de dissipation via un redresseur à thyristor. Cette structure simplifiée permet un réglage limité de la vitesse, offre peu de possibilité de réglage de la puissance générée et présente un rendement amoindri [32].

6.4. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues/balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance en particulier pour les projets off-shore situés en milieu marin. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. Si, de plus, la génératrice est équipée d'aimants permanents ; le système de bagues/balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure, représentée à la Figure 6, est qu'elle nécessite pour sa connexion au

réseau, des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue contrôle de l'éolienne. En effet, l'interface avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent.

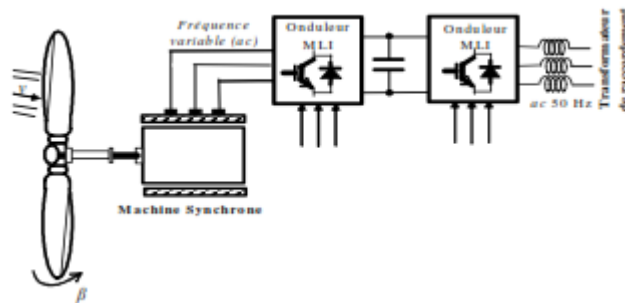


Figure 6. Éolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à grand nombre de paires de pôles

7. Capacités de réglages des différentes technologies d'éoliennes de grande puissance

La nature imprévisible et très fluctuante du vent, limite la participation des éoliennes aux services système [33] ce qui engendre la réduction de leur taux de pénétration.

7.1. Capacité de réglage de la tension et de la puissance réactive

Les capacités de réglage de la tension des générateurs éoliens vont dépendre principalement de leur topologie. Les topologies qui se basent sur les machines asynchrones à cage, sont uniquement consommatrices de puissance réactive. Elles n'ont donc pas la capacité de régler la tension. Afin de compenser l'énergie réactive consommée, ces génératrices sont associées avec des batteries de condensateur. Le réglage de réactif

reste cependant approximatif, sa précision dépendra de la valeur des condensateurs [34].

Les machines asynchrones doublement alimentées et les machines synchrones ont la capacité de régler la puissance réactive à leurs bornes grâce à l'interface d'électronique de puissance. Il est donc possible, dans les limites du dimensionnement des convertisseurs, de régler la tension, plusieurs travaux ont été concentré à ce type de réglage [35].

7.2. Capacité de réglage de la fréquence

La production intermittente des générateurs éoliens limite leurs capacités à participer aux réglages de la fréquence.

Des travaux effectués sur les capacités des éoliennes à participer aux réglages de la fréquence [36] proposent d'utiliser l'énergie cinétique stockée dans les pales. [37] et [38] proposent à l'aide d'une technologie basée sur une MADA d'agir sur l'angle de calage des pales afin de constituer une réserve de puissance mobilisable lors de variation de fréquence. La technologie basée sur les MADA ne permet pas une participation aux réglages puissance-fréquence sur toute la plage de fonctionnement de l'éolienne (limitation de la vitesse de rotation minimale de fonctionnement atteignable). Les travaux présentés en [39] proposent deux stratégies de commandes basées sur la technologie MSAP qui permet une participation aux réglages primaires de la fréquence.

Le Tableau 2 dresse un bilan des capacités de réglages pour les différentes technologies d'éoliennes de grande puissance.

L'interfaçage avec de l'électronique de puissance nous offre des possibilités de fonctionnement qui sont pour l'heure peu exploitées.

Tableau 2. Capacités de réglage des différentes technologies éoliennes

Type d'éolienne	Interface réseau	Moyen de contrôle	Fonctionnement possible	Services système
MAS (vitesse fixe)	Facultatif Gradateur Bancs de condensateur	Pitch control	Contrôle de P (approximatif) et dynamique lente Contrôle de Q si condensateur	marginal
MADA (vitesse variable)	Convertisseur AC-->AC Dimensionner à 25 % de Pn (rotor)	Pitch control Couple génératrice	Contrôle P Contrôle Q	Réglage de f Réglage de U tant qu'il y a du vent
MSAP (vitesse variable)	Convertisseur AC-->AC	Pitch control Couple génératrice	Contrôle P Contrôle Q Fonctionnement isolé	Réglage de f Réglage de U Ilotage tant qu'il y a du vent

7.3. Capacité de fonctionnement en isolé

Le découplage, crée par les convertisseurs d'électronique de puissance entre le réseau et le stator de la MSAP, permet un fonctionnement de ce type de technologie en isolé. [40] a étudié ce type de fonctionnement.

Références bibliographique chapitre I

1. Akassewa Tchapo SINGO : Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome : Université Henri Poincaré, Nancy-I :2010
2. Masters, G. M., (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Wiley- Interscience, New Jersey
3. The International Energy Agency (IEA), <http://www.iea.org>.
4. Mons, L. (2005) *Les enjeux de l'énergie*, Larousse, France
5. World Energy Council (2004). *Survey of Energy Resources*, Elsevier
6. Nicolas LAVERDURE : Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires
7. Michaël Bockhoff, Jean Jacques, Thierry Loyau, Léon Thiery : *Mesures en acoustique industrielle*.
8. NF EN ISO 3743-1. – Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Méthodes d'expertise en champ réverbéré petites sources transportables – Partie 1 : méthode par comparaison en salle d'essai à parois dures (2009).
9. Energy Efficiency and Conservation Authority (Bel Acoustic Consulting, 2004),
10. Agence Française de la Sécurité Sanitaire, de l'Environnement et du Travail, mars 2008.
11. G. Cimuca "Système inertiel de stockage d'énergie associé a des générateurs éoliens", Thèse présentée le 14 Décembre 2004.
12. G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, M. Radulescu, "Control and performance evaluation of a flywheel energy storage system associated to a variable speed wind generator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 53, No. 4, June 2006, pp:1074 – 1085.
13. V. Courtecuisse, B. Robyns, S. Plumel, B. Francois and J. Deuse, "Capacity of a variable speed turbine to participate in primary frequency control", *Sixth international workshop on large- scale integration of wind power and transmission networks for offshore wind farms*, Delft, October 26-27, 2006.
14. Morren, J.; de Haan, S.W.H.; Ferreira, J.A., "Contribution of DG units to primary frequency control", *Future Power Systems*, 2005 International Conference on
15. J. Morren, S W.H. de Haan and J.A. Ferreira, "Primary Power/Frequency control with wind turbine and fuel cells", *IEEE PES General Meeting 2006*, Montreal, Canada, June 2006.
16. Mogos, Emmanuel Florin (2005) *Production décentralisée dans les réseaux de distribution*, Doctorat génie électrique ENSAM, soutenue le 20 juillet 2005
17. MORALES Dario, « Définition optimale des éléments d'un système décentralisé de production d'énergie électrique », Soutenu le 5 juillet 2006
18. J. Morren, S. W.H. de Haan, W. L. Kling, J. A. Ferreira, " Wind turbine emulating inertia and supporting primary frequency control," *IEEE Transactions on power systems*, vol.21, N°1, February 2006, pp. 433-434.
19. B. Multon, X. Roboam, «Aérogénérateurs électriques », *Techniques de l'ingénieur*
20. Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, WCB/McGraw-Hill 1997.
21. « Nouvelles technologies de l'énergie 2 : stockage et technologies à émission réduite », Jean-Claude Sabonnadière, Edition Hermes Lavoisier, 2007, ISBN 978-2-7462-1502-3
22. J-C Sabonnadière « Nouvelles technologies de l'énergie 4 », Edition Hermes, 2007, ISBN978-2-7462-1502-3
23. C. Saudemont, L. Leclercq, B. Robyns, G. Cimuca, M. Radulescu, « Développement d'un émulateur temps réel d'un système de génération éolienne associé à un stockage d'énergie », *REE*, n°11, décembre 2004, pp. 49-59.
24. André MERLIN *Electricité et énergies renouvelables : jusqu'où le réseau électrique actuel peut-il gérer des sources décentralisées ?*, La Jaune et La Rouge, revue de l'amicale des anciens élèves de l'Ecole polytechnique,

25. A. Merlin, « Renewables : to what extent can the existing French system cope with dispersed generation ? », *Electra (CIGRE)*, n° 219, avril 2005, pp. 4 - 11.
26. Mogos, Emmanuel Florin (2005) *Production décentralisée dans les réseaux de distribution*, Doctorat génie électrique ENSAM, soutenue le 20 juillet 2005
27. Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*, John Wiley&Sons, England Ang,
28. Kinjo, T.; Senjyu, T.; Urasaki, N.; Fujita, H. "Output levelling of renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system", *Energy Conversion, IEEE Transaction on Volume 21, Issue 1, March 2006*.
29. J-C. Sabonnadière, N. Hadjsaïd, « Lignes et réseaux électrique 1 » édition lavoisier, 2007 [SAB 07_b] J-C. Sabonnadière, N. Hadjsaïd, « Lignes et réseaux électrique 2 » édition lavoisier, 2007 [SAB 06] Sabonnadière et al, « Nouvelle technologies de l'énergie 1 : les énergies renouvelables », édition lavoisier, 2006
30. Y. G.Rebours, D. S.Kirschen, M. Trotignon and S. Rossignol, „A survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Service-Part I: Technical Feature“, *IEEE transaction on power system*, Vol.22, N°1., February 2007
31. Y. G.Rebours, D. S.Kirschen, M. Trotignon and S. Rossignol, „A survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Service-Part II: Technical Feature“, *IEEE transaction on power system*, Vol.22, N°1., February 2007
32. O. Richardo “ Réglage coordonné de Tension dans les Réseau de Distribution à l'aide de la
33. Robyns B., Davigny A., Saudemont C., Ansel A., Courtecuisse V., Plumel S., Deuse J « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », *Actes des journées du club EEA , Gif sur Yvette, 26-28 mai 2004, Paris, Hermès, p. 53-68.*
34. Benoît ROBYNS, Aymeric ANSEL, Christophe SAUDEMONT, Arnaud DAVIGNY, Gabriel CIMUCA, Mircea RADULESCU, Jean-Michel GRAVE, "Apport du stockage de l'énergie à l'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques. Contribution aux services systèmes", *Revue de l'Electricité et de l'Electronique, REE, N° 5, pages. 77-85, 5-2005.*
35. B. Robyns, Y. Fu, F. Labrique, H. Buyse, “Commande numérique de moteurs synchrones à aimants permanents de faible puissance”, *Journal de Physique III – T5, n°8, August 1995.*
36. RTE, France, Mémento de la sûreté électrique 2004. Disponible en ligne : <http://www.rte-france.com>.
37. ABOU CHACRA Fouad, Valorisation et optimisation du stockage d'énergie dans un réseau d'énergie électrique, Thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud 11, le 4 juillet 2005.
38. T. Ackerman, « Wind power in power systems », Wiley, 2005
39. Melle G. Semrouni, Sous-directrice de la Promotion des Énergies Renouvelables " Les Énergies Renouvelables Les filières développées en Algérie ", Séminaire sur les énergies renouvelables en Algérie, Berlin, 11 juillet 2013.
40. MORALES Dario, « Définition optimale des éléments d'un système décentralisé de production d'énergie électrique », Soutenu le 5 juillet 2006

Chapitre II : Modélisation des éoliennes à axe horizontal

1. Composantes d'un aérogénérateur

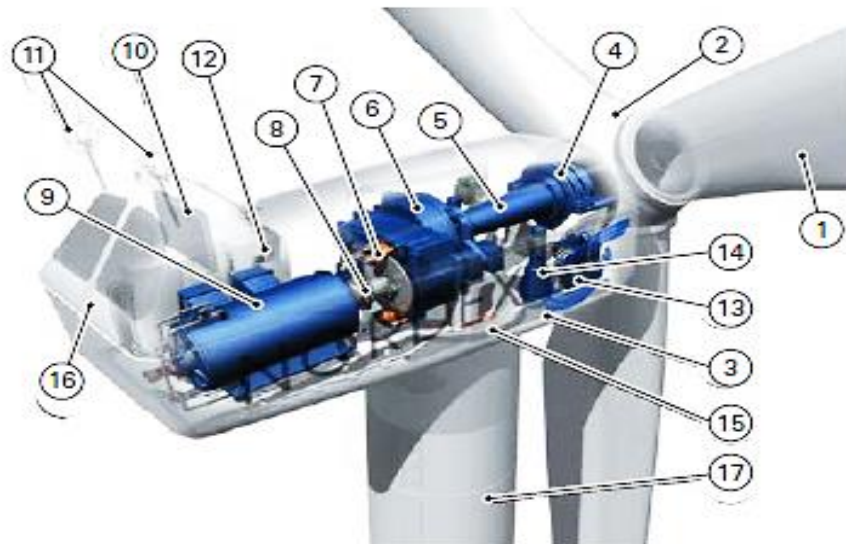


Figure 7. Vue en coupe d'une éolienne à axe horizontal [1].

Les composants d'une telle éolienne sont désignés dans le tableau 3.

Tableau 3. Composants d'une éolienne à axe horizontale.

1	Pales en composite fibre de verre
2	Moyeu de la turbine en fonte
3	Structure de la turbine en fonte ou en acier galvanisé
4	Paliers du rotor à double rangée de billes
5	Arbre lent du rotor en acier haute résistance
6	Multiplicateur de vitesse à 3 étages
7	Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure
8	Accouplement avec la génératrice de type flexible
9	Génératrice. Refroidisseur à l'eau

10	Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur-génératrice
11	Système de mesure du vent
12	Système de contrôle surveillance et pilote la turbine
13	Système hydraulique pour les freins et le système d'orientation
14	Entraînement d'orientation de la tourelle
15	Paliers du système d'orientation
16	Capot de la nacelle
17	Tour en acier

2. Rendement énergétique d'un capteur éolien

Si l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace à la vitesse v pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée serait [2]:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.1)$$

Avec ρ masse volumique de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$ au niveau de la mer).

Mais en réalité une turbine éolienne extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_e , par suite de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , définit par la relation :

$$C_p = \frac{P}{P_e} ; C_p < 1 \quad (2.2)$$

Si m représente la masse d'air qui traverse la surface A par unité de temps à la vitesse moyenne V_0 , d'où $m = \rho A V_0$ on obtient alors:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_0 (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.3)$$

Avec,

V_1 : vitesse axiale d'écoulement en amont de la turbine ;

V_2 : vitesse axiale en aval de la turbine ;

V_0 : vitesse moyenne d'écoulement sur la surface A balayée par la turbine :

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.4)$$

Le maximum de la puissance est donné par :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^2 \quad (2.5)$$

Cette relation constitue la formule de Betz [3], [4]. Il s'en suit le coefficient de la puissance :

$$C_{pmax} = \frac{P_{max}}{P_e} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (2.6)$$

L'efficacité de la captation d'énergie, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques et des réglages de la chaîne de conversion, est inférieure à cette limite (limite de Betz).

Donc on peut tracer la courbe P_{max} en fonction de la vitesse du vent.

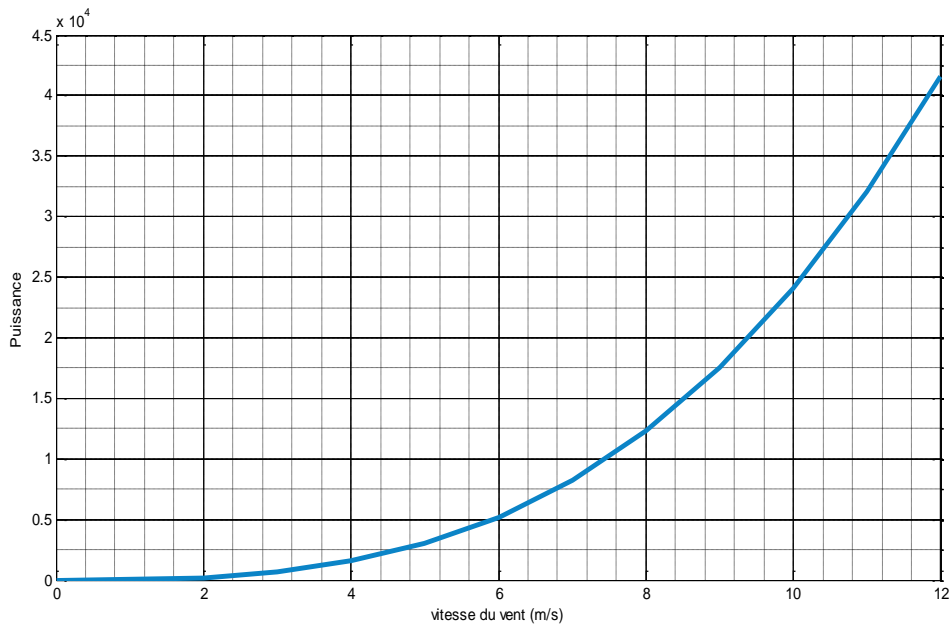


Figure 8. Caractéristique de la puissance en fonction du vent.

Ce graphe est utilisé pour chercher le maximum de puissance désigné en anglais par MPPT (MAXIMUM POWER POINT TRACKING), qu'on peut extraire selon la vitesse du vent disponible. Cependant, pour exploiter cette énergie, on doit prendre en compte les contraintes suivantes [5] :

- La vitesse du vent peut fluctuer de $\pm 25\%$ sur une période de quelques minutes.
- La direction du vent n'est pas constante ; par conséquent, on doit continuellement réorienter la turbine pour qu'elle reste face au vent, de façon à optimiser la puissance disponible.
- La régularité du vent en direction et en vitesse dépend du site. Pour déterminer les meilleurs gisements éoliens, on doit procéder à des relevés de vitesse et de direction des vents sur une période d'au moins un an.
- Lorsque la puissance du vent excède la puissance de l'éolienne, on doit agir pour limiter la puissance mécanique de la turbine et la puissance électrique de la génératrice.
- Lors de vents violents, on doit réduire le pas des hélices de la turbine ou même arrêter complètement l'éolienne afin d'éviter d'endommager la turbine et la tour qui la supporte.

3. Modèle de la turbine éolienne

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure 9.

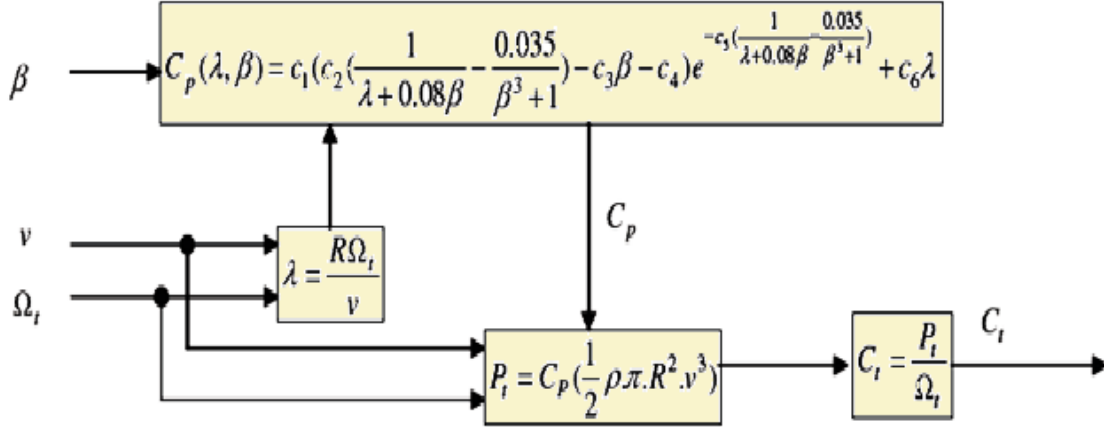


Figure 9. Modèle de la turbine éolienne.

La turbine éolienne est caractérisée par les courbes du coefficient de puissance C_p . On introduit une variable sans dimension appelée la vitesse spécifique (2.7) pour caractériser les performances aérodynamiques d'une éolienne :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (2.7)$$

Avec :

Ω est la vitesse angulaire de rotation de la turbine

R rayon de la turbine.

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} c_p(\lambda, \beta) * \rho * \pi * R^2 * V^3 \quad (2.8)$$

Avec

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + c_6\lambda \quad (2.9)$$

Où, les coefficients sont :

$$C_1 = 0.5109, \quad C_2 = 116, \quad C_3 = 0.4, \quad C_4 = 5, \quad C_5 = 21, \quad C_6 = 0.0068.$$

Tenant compte de cette formulation mathématique du modèle de la turbine éolienne, nous avons tracé (figure 10) différentes allures du coefficient de puissance en fonction de différentes vitesses spécifiques λ pour une éolienne tripale paramétrée par l'angle de calage (Beta) β des pales.

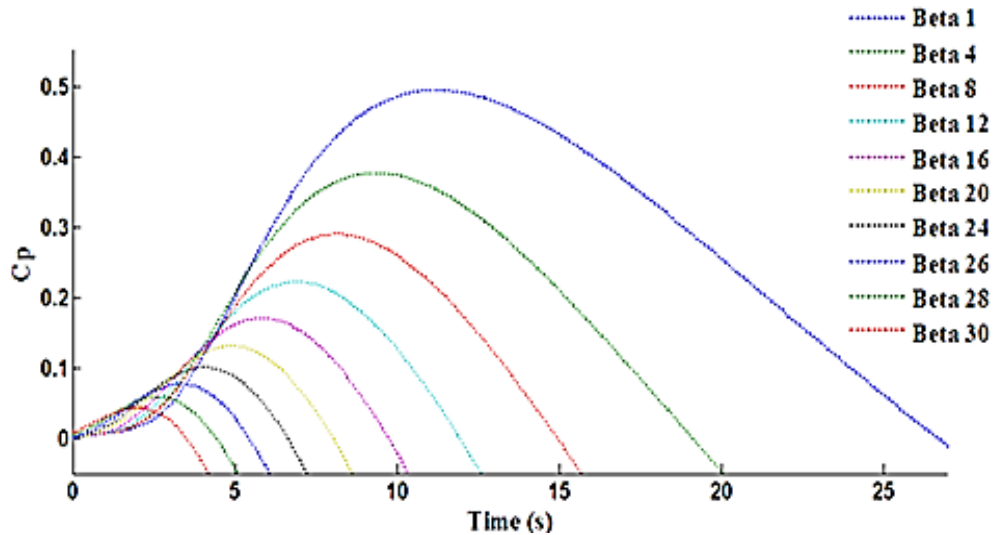


Figure 10. Coefficients de puissance en fonction de Lambda et Beta.

Ces caractéristiques statiques sont les plus importantes d'une éolienne, nous remarquons que l'augmentation de β permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (2.10)$$

3.1. Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé 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 la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (2.11)$$

Où,

G est le rapport de multiplication (-) et C_{mec} est le couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur selon l'expression suivante :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (2.12)$$

Où, Ω_{mec} est la vitesse mécanique du générateur (rad/s).

3.2. Modèle de l'Arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_t - f \Omega_{mec} \quad (2.13)$$

Où, le couple total de l'éolienne C_t est exprimé par la relation (1.17).

$$C_t = C_{mec} + C_{em} \quad (2.14)$$

Avec

C_{em} : couple électromagnétique du générateur en (N.m) ;

J : inertie totale des parties tournantes ($Kg.m^2$) ;

f : coefficient de frottements visqueux.

Le schéma de la figure 11, représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine.

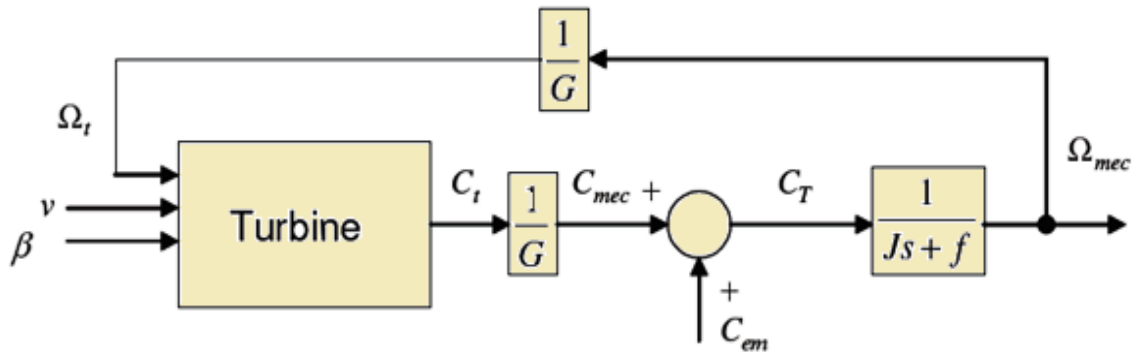


Figure 11. Modèle de l'arbre et de la turbine.

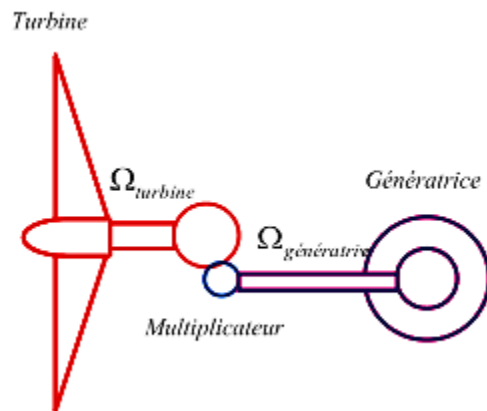


Figure 12. Schéma de principe du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice

3.3. Modèle de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée.

Avec un tel système les pales sont tournées par un dispositif de commande appelé (Pitch control).

En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, (la figure 13). Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

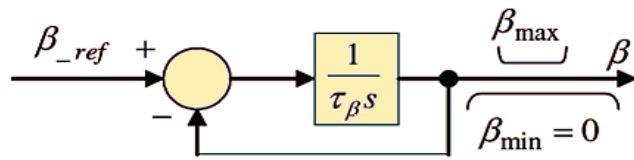


Figure 13. Modèle et commande de système de calage de pales.

Suite à cette analyse, nous avons développé un programme pour montrer les caractéristiques des puissances en fonction de la vitesse mécanique (voir la figure 14), et en fonction de la vitesse de la turbine.

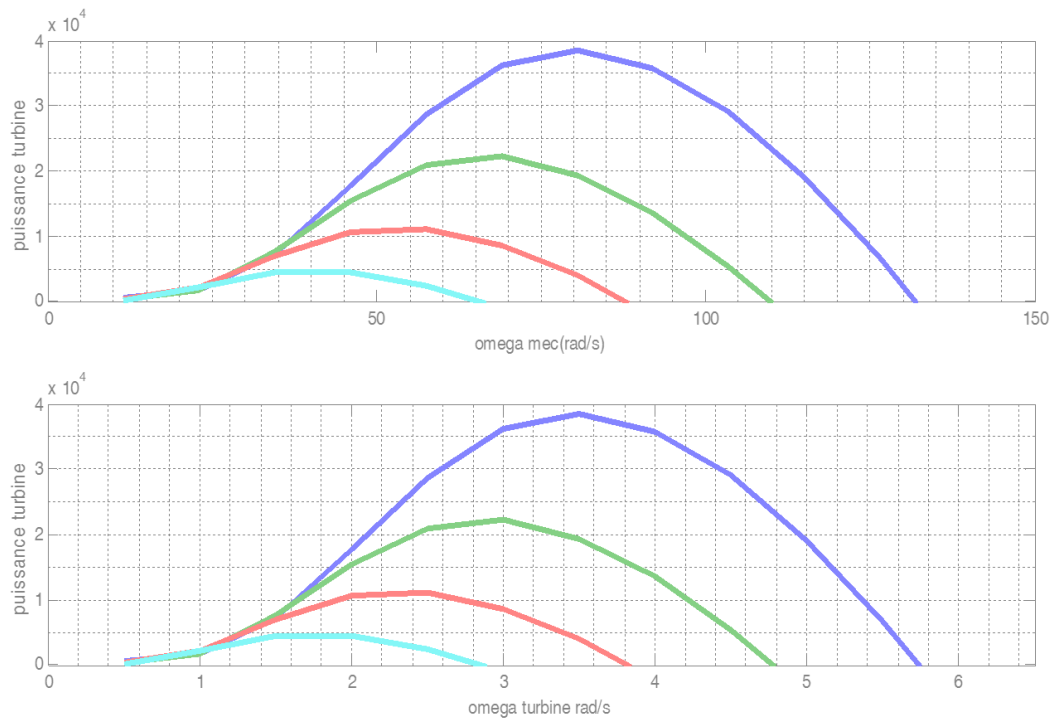


Figure 14. Caractéristiques puissance vitesse mécanique, et puissance vitesse de la turbine.

4. Modélisation de la Génératrice Asynchrone à Double

Alimentation (GADA)

Nous disposons maintenant des généralités sur les systèmes éoliens et les différentes configurations, il faut modéliser la génératrice.

4.1. Topologies de générateur

La technologie utilisée pour la production d'énergie éolienne a progressé pour une vingtaine d'années. Les premiers efforts se sont concentrés sur le fonctionnement à vitesse constante pour les petites machines qui sont directement connectées au réseau électrique grâce à un démarreur progressif pour réduire les commutations transitoires.

Vu les avantages de fonctionnement à vitesse variable des éoliennes, l'utilisation des grandes machines est devenue possible en raison de leur efficacité.

On distingue quatre types de générateurs éoliens [6].

Type A

Il est communément appelé « vitesse fixe » car la vitesse du vent est presque constante. La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est directement connectée au réseau grâce à un STEPUP transformateur [7].

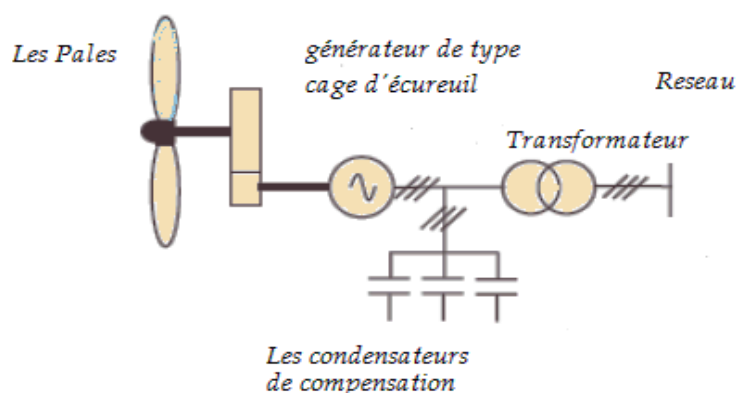


Figure 15. Génératrice avec vent constant.

Elles sont entraînées par des turbines à une vitesse juste au-dessus de la vitesse de synchronisme, (le glissement est environ 2%).

La différence de vitesse, lorsque la machine n'est pas chargée et fonctionne à pleine charge, est très faible [8].

La nécessité de la puissance réactive de générateur oblige la mise en place des condensateurs de compensation aux bornes du générateur.

Des puissances réactives supplémentaires sont tirées de réseau. Génératrice directement couplée au réseau grâce à un transformateur step-up comme le montre la figure 15.

Type B

Vitesse variable limitée, génératrice ayant la résistance du rotor variable. La construction mécanique du stator est similaire au type A, mais le rotor a également un enroulement triphasé qui n'est pas court-circuités. En revanche, le rotor est relié à un convertisseur comme le montre la figure 16. Le convertisseur facilite le contrôle des grandeurs électromagnétiques du rotor, et donc de couple, cela permet à la vitesse du générateur de varier sur une petite gamme, généralement jusqu'à 10%. Ce type utilise aussi des condensateurs de compensation pour fournir la puissance réactive au générateur[8].

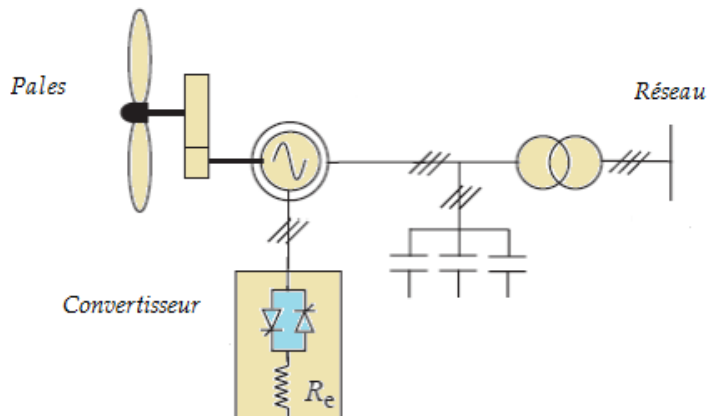


Figure 16. Génératrice à rotor bobiné.

Type C

La vitesse est variable. L'éolienne est à base d'une génératrice asynchrone doublement alimentée (GADA) et un convertisseur au rotor. Dont le rotor est alimenté par un convertisseur.

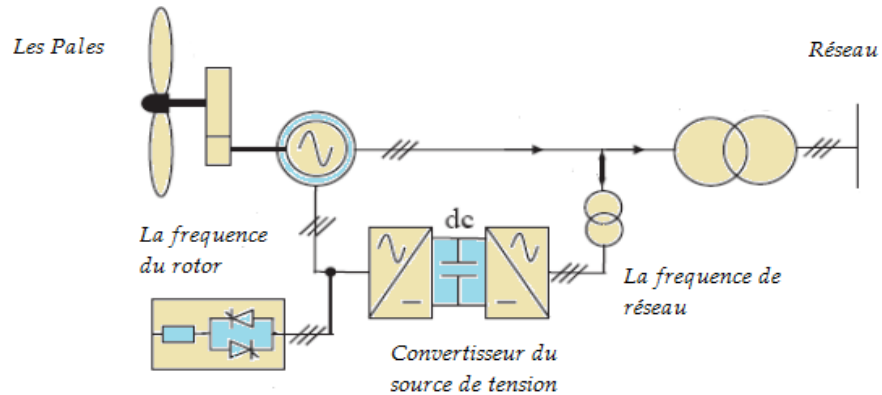


Figure 17. GADA à vitesse variable.

Le stator est directement relié au réseau (figure 17). Les convertisseurs sont évalués à environ 20÷30% de la puissance nominale. Le but du convertisseur connecté à l'enroulement du rotor, consiste à injecter une tension triphasée à la fréquence de glissement dans le circuit du rotor. La tension injectée peut être modifiée en amplitude et en phase par le contrôleur. Cela facilite la variation du couple électromagnétique et donc, de la vitesse du rotor. En outre, il permettra de contrôler le facteur de puissance du stator. Un circuit Crowbar est placé en court-circuit au rotor dans le cas d'une surtension ou de surintensité dans le convertisseur à courant continu pour protéger les convertisseurs. La plage de réglage de vitesse est comprise entre 70÷120% de la vitesse de synchronisme nominale [9, 10,11].

Type D

À vitesse variable, le générateur (alternateur à aimants permanents) est directement au réseau grâce à un convertisseur de fréquence.

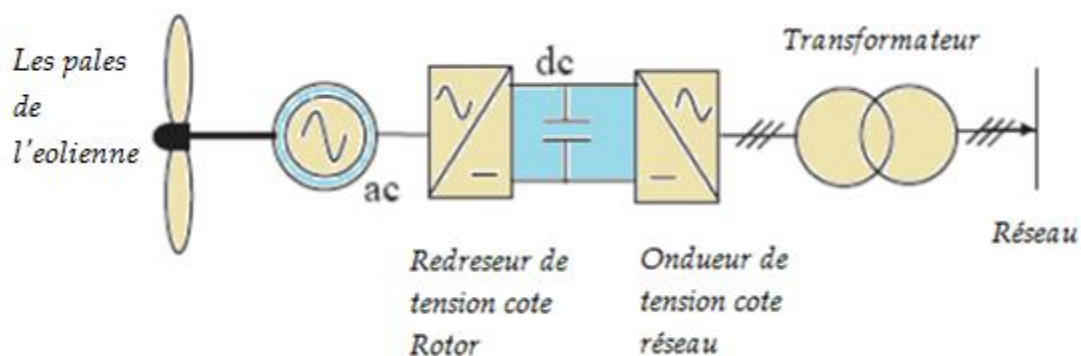


Figure 18. Convertisseur en série à vitesse variable connecté à la génératrice.

Dans cette approche, le multiplicateur est remplacé par l'utilisation des plusieurs pales de grands diamètres à basse vitesse. Le générateur électrique est isolé du réseau.

Le convertisseur côté générateur est habituellement utilisé pour contrôler la vitesse du générateur et le convertisseur côté réseau est généralement utilisé pour la tension réactive.

Avant 2001, les types A et B ont été utilisés dans des endroits sur terre et ceux de types C et D que dans quelques parcs éoliens offshore. Les types A, C présentent la technologie dominante pour les grands parcs d'éoliennes, puisque ces types permettent à un éventail plus large de contrôler la vitesse (-30% à 20%).

En outre, seule une faible partie de la puissance passe par le convertisseur, donc il est de dimension réduite et moins chers en comparaison avec un convertisseur de capacité nominale nécessaire pour le type D [13].

Une machine asynchrone à double alimentation permet une production optimale d'électricité quelles que soient les conditions du vent et de la vitesse. Les éoliennes de

forte puissance sont généralement équipées de MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation). Cette machine présente des avantages de par son contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus de son prix compétitif et de sa grande robustesse.

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques nous permet de maîtriser les puissances produites tant au niveau actif que réactif, ce qui est un point très intéressant pour la gestion de l'éolienne.

4.2. Structure de la Machine Etudiée

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure 19 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [14].

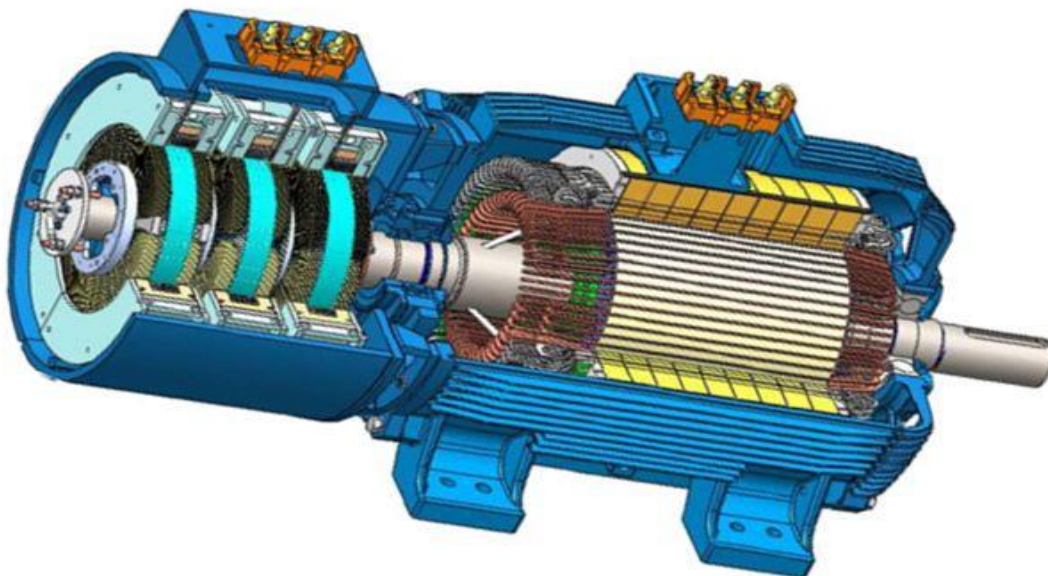


Figure 19. Principe du rotor bobiné [15].

4.3. Les différents Modes de fonctionnement de la GADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

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 ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [16].

Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

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

Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme la machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de 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 le rotor.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

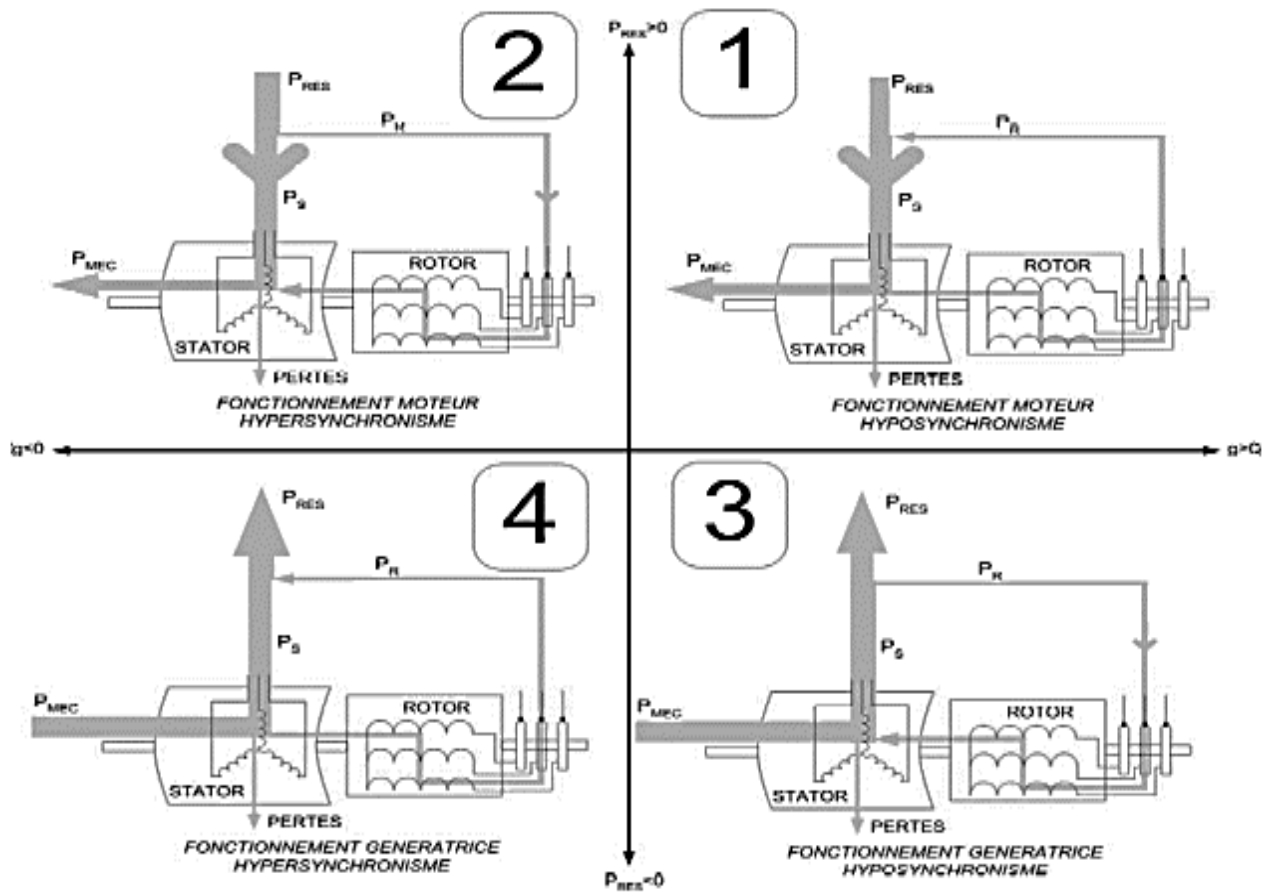


Figure 20. Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une GADA [9].

La figure 20 montre le transfert d'énergie dans une machine à double alimentation.

4.4. Modélisation de la GADA

Afin d'établir la modélisation de la GADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotorique non nulles.

La GADA à trois enroulements statoriques. Ses enroulements rotoriques sont connectés en étoile et ses trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [17]. Elle permet de fonctionner en moteur ou en générateur indépendamment de la vitesse de rotation [18]. La commande des tensions rotoriques permet de produire le champ magnétique à l'intérieur de la machine et offre la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [19].

Nous partons des équations générales de la machine asynchrone à double alimentation qui s'écrivent, dans un repère triphasé, de la manière suivante [20] [21].

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] [I_s] \\ [R_r] [I_r] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\Phi_s] \\ [\Phi_r] \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Et, les flux

$$\begin{cases} [\Phi_s] = L_s [I_s] + M [I_r] \\ [\Phi_r] = M [I_s] + L_r [I_r] \end{cases} \quad (2.16)$$

Où,

$$L_s = L_s - M_s; L_r = L_r - M_r; M = \frac{3}{2} M_{sr}. \quad (2.17)$$

Les transformations de Park et de Concordia appliquées à (2.15), donnent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \dot{\theta}_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \dot{\theta}_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rq} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rd} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sq} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sd} \end{cases} \quad (2.19)$$

L'équation mécanique de la machine est donnée par l'expression suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \cdot \Omega \quad (2.20)$$

Avec l'équation du couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rq} \phi_{sd} - I_{rd} \phi_{sq}) \quad (2.21)$$

Qui sous les conditions (2.22), on déduit la relation simplifiée (2.23).

$$\phi_{sd} = \phi_s \quad \text{et} \quad \phi_{sq} = 0 \quad (2.22)$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{rq} \phi_{sd} \quad (2.23)$$

Par conséquent, en tenant compte de (2.22), les équations des flux (2.19) deviennent :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rq} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rd} \end{cases} \quad (2.24)$$

Si l'on suppose que le réseau électrique est stable, dont la tension simple est V_s ,

le flux statorique ϕ_s sera constant. Cette considération associée à l'équation (2.23) montre que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature I_{rq} . De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance, utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques (2.18) de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (2.25)$$

Avec ω_s la pulsation électrique des gradateurs statoriques.

En considérant que le flux statorique constant, on déduit de (2.25) que :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (2.26)$$

A l'aide de l'équation (2.24), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques,

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (2.27)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (2.28)$$

Ou encore, en gardant l'hypothèse que le flux statorique est constant et en rappelant l'équation (2.25), on obtient :

$$\begin{cases} P = V_s I_{sq} \\ Q = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (2.29)$$

Alors, en substituant dans l'équation précédente les courants par leurs expressions (2.26), on obtient :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ Q = V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + V_s \frac{\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.30)$$

A partir des équations (2.26) et (2.27), nous obtenons, pour les flux statoriques,

l'expression suivante :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (2.31)$$

L'expression des puissances (2.30) peut donc réécrite sous la forme ci-dessus :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (2.32)$$

Si l'on considère l'inductance magnétique (M) constante, on remarque que l'équation (2.32) fait apparaitre que la puissance active statorique (P) est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{rq} , à un constant pré $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$.

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation (2.19) les courants statoriques par l'expression (2.27), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = (L_r - M^2) I_{rd} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} \end{cases} \quad (2.33)$$

Et, l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente par leurs expressions dans l'équation (2.17), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - M^2) \frac{dI_{rd}}{dt} - \\ \quad g \omega_s (L_r - M^2) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + \\ \quad g \omega_s (L_r - M^2) I_{rq} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.34)$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

5. Simulation de la GADA

À 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 bloc de la machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

En examinant les équations (2.34) et (2.32), on peut établir le schéma bloc de la figure 12 qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sortie les puissances actives et réactives statoriques.

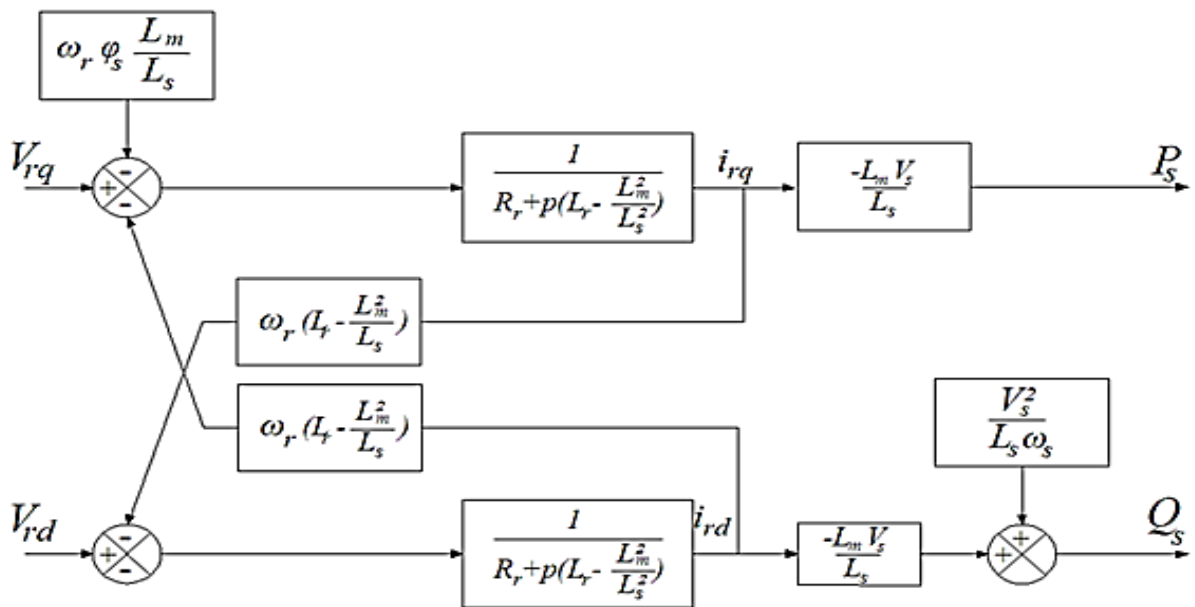


Figure 21. Système interne de la GADA.

Grâce à la modélisation de la machine (parties mécanique et électrique) un programme de simulation dans l'environnement MATLAB® est réalisé.

Les figures (20, ...29) présentent les résultats de simulations

6. Résultats de Simulations et interprétation

D'abord nous avons considéré un vent variable selon la configuration illustrée par le résultat de simulation de la figure 11. Cette configuration impose à la génératrice de

fonctionne selon l'allure de la vitesse imposée par la figure 13. Alors, que son allure pour un vent constant est présentée par la figure 14. On remarque qu'après un régime transitoire la vitesse se stabilise.

Les figures 16 et 17 montrent respectivement les allures des coefficients de puissance lorsque le vent est considéré constant et lorsqu'il est variable. Par ailleurs, nous avons illustré les allures des puissances actives pour un vent constant et variable (voir respectivement les figures 26 et 27). Finalement, nous avons présenté les puissances réactives développées par un vent constant (voir figure 21) et par un vent variable (voir figure 22).

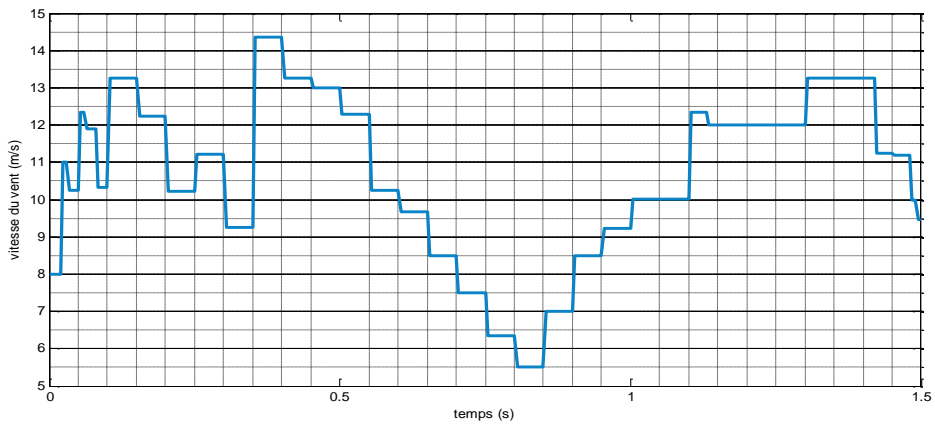


Figure 22. Model du vent pour la simulation.

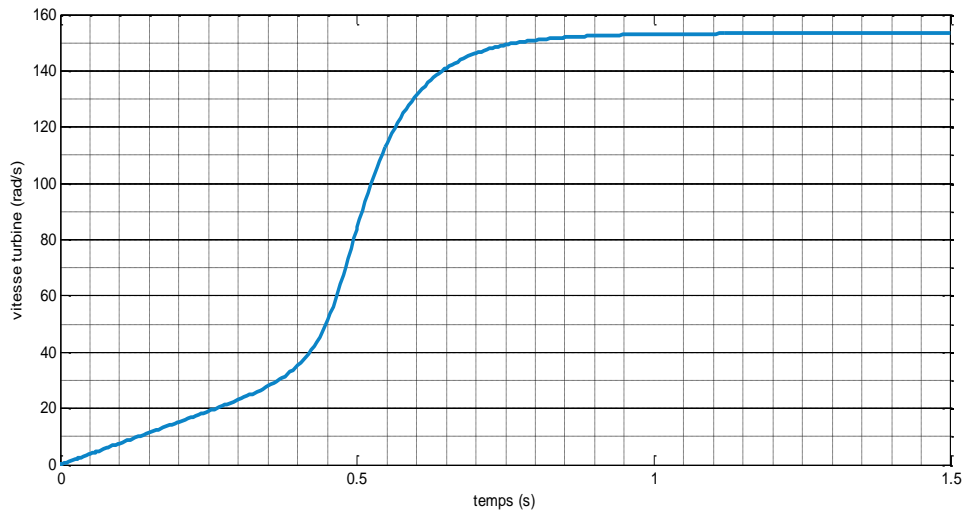


Figure 23. Vitesse de la turbine lors d'un vent constant.

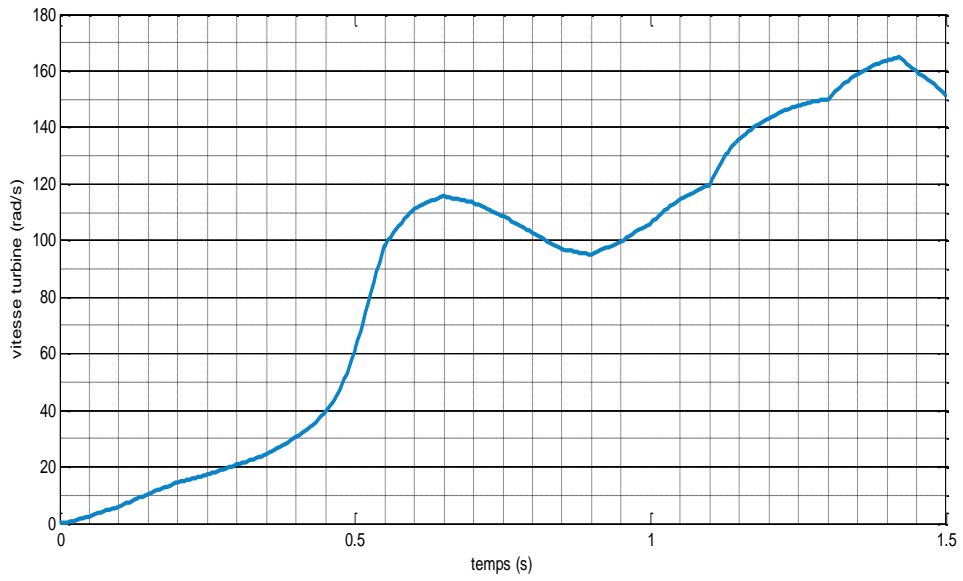


Figure 24. Vitesse de la turbine lors d'un vent variable.

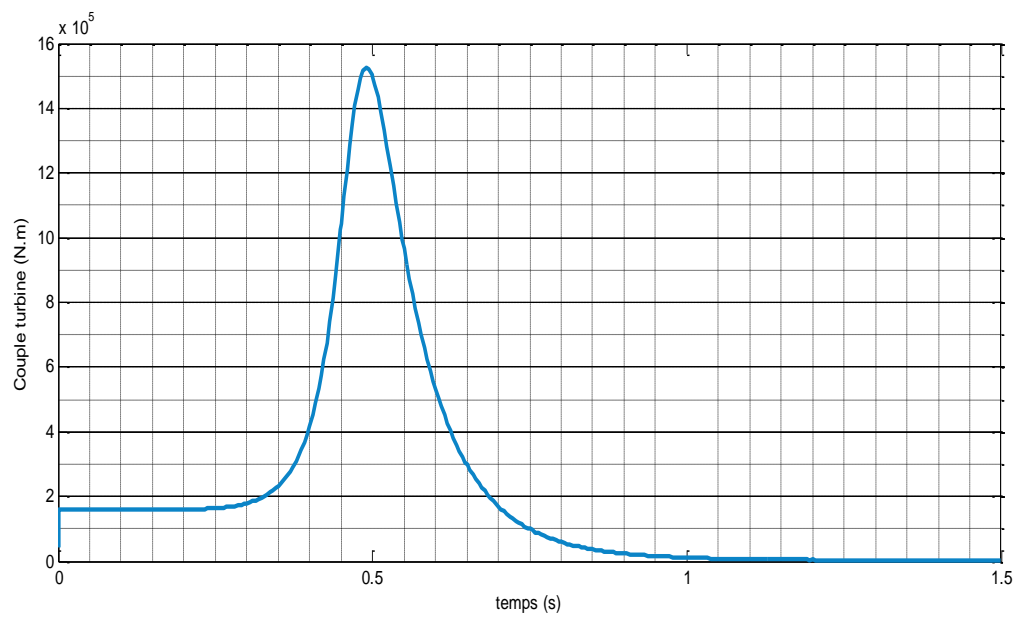


Figure 25. Couple de la turbine (Vent constant).

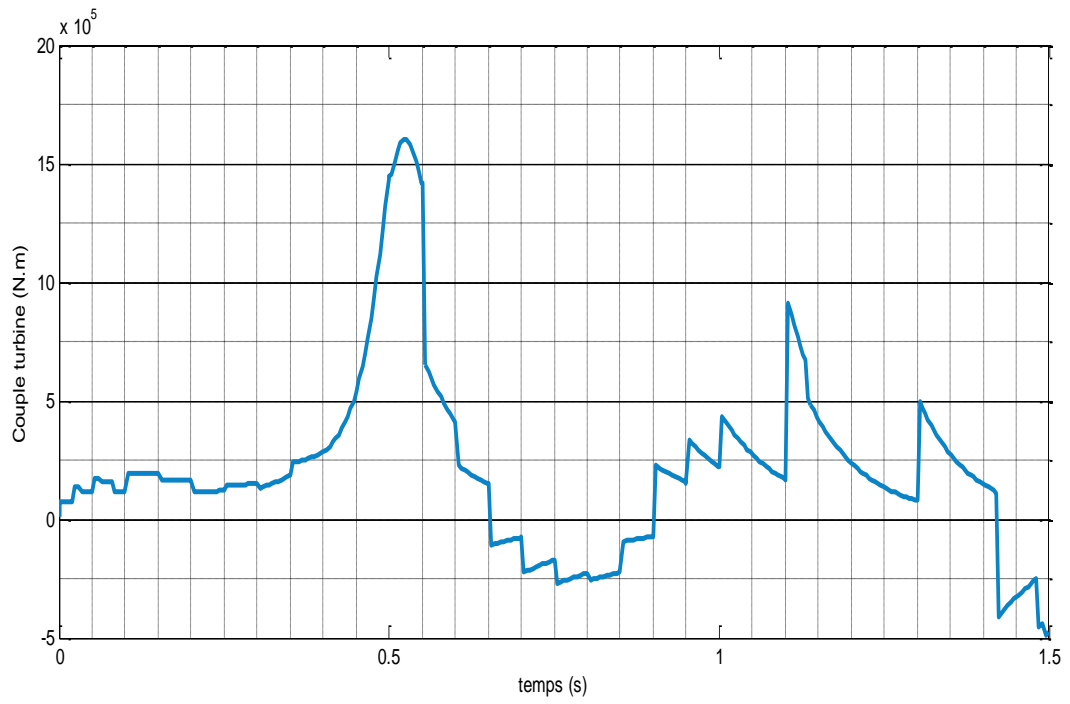


Figure 26. Couple de la turbine (vent variable).

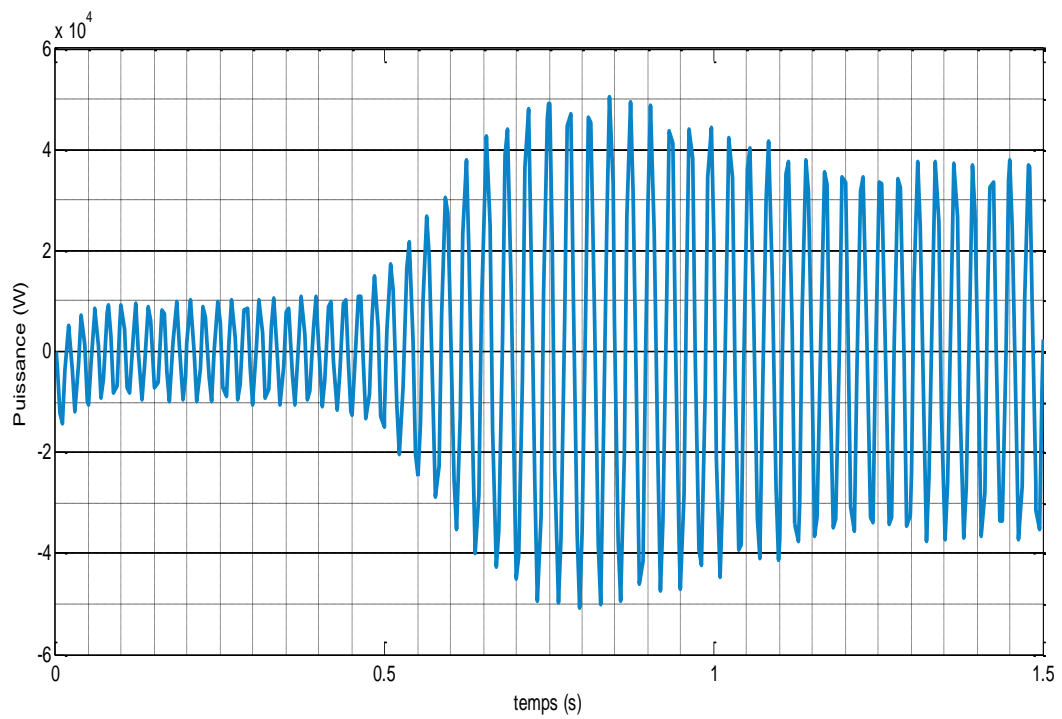


Figure 27. Puissance active (Vent constant).

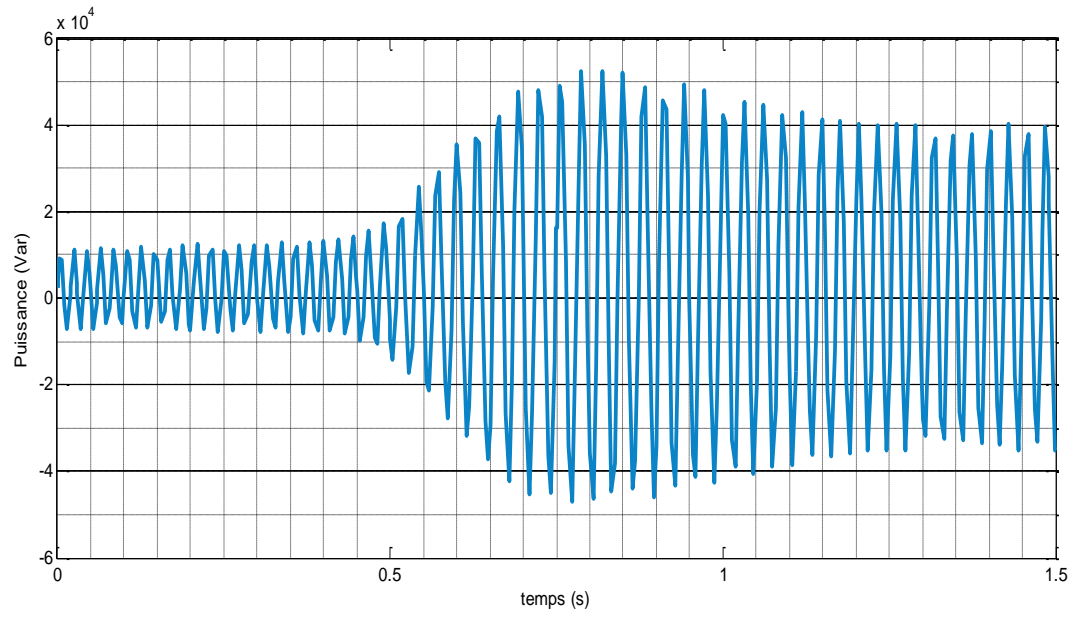


Figure 28. Puissance active (Vent variable).

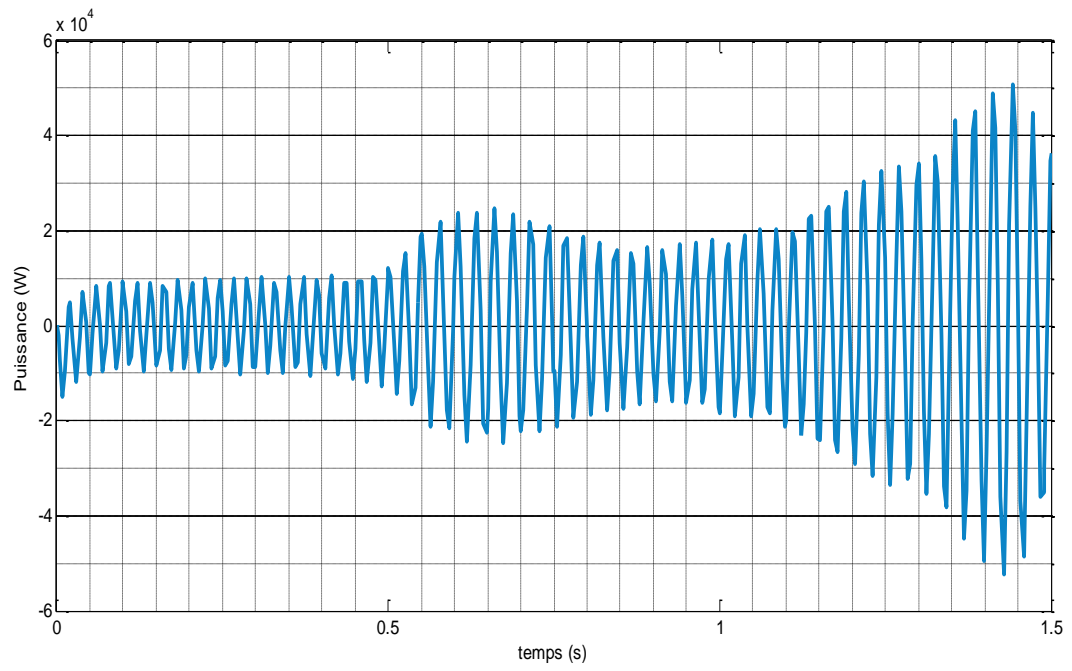


Figure 29. Puissance réactive (vent constant)

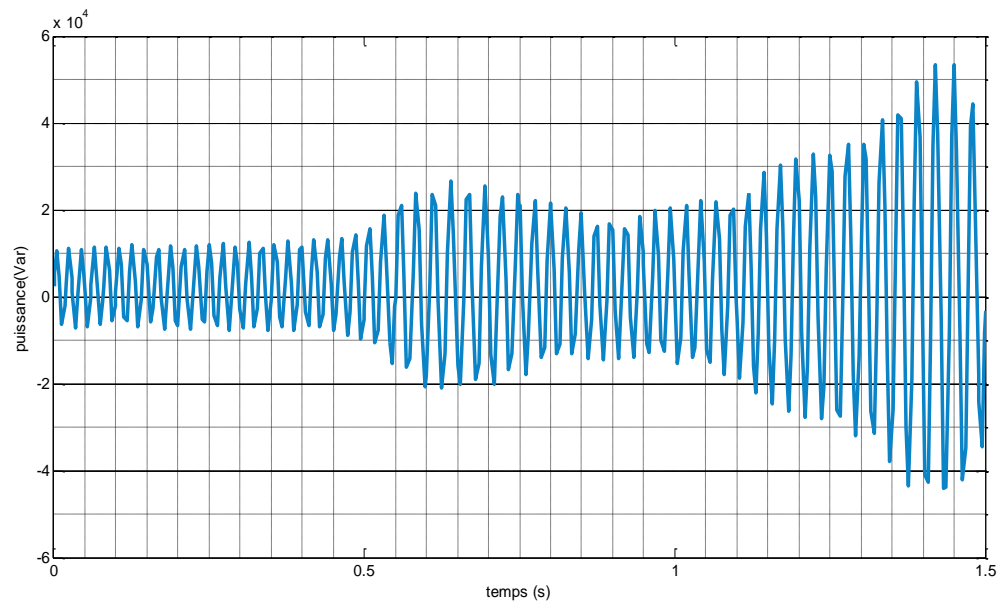


Figure 30. Puissance réactive (Vent variable).

Conclusion

On a détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne tenant compte des caractéristiques du profil. Nous avons modélisé l'ensemble mécanique incluant le multiplicateur, permettant l'interconnexion avec une génératrice qui aura le couple comme entrée et la vitesse comme sortie. Ce modèle permet d'obtenir l'allure du couple et simule un comportement mécanique proche de la réalité tout en étant facilement exploitable pour les simulations.

Cette partie mécanique est un élément essentiel dans la conversion éolienne. Elle comporte sa propre commande afin de maximiser la puissance extraire du vent par le réglage permanent de l'angle de calage des pales (MPPT).

On a cité les différentes technologies et topologies utilisées dans la production de l'énergie éolienne.

Pour obtenir un modèle avec lequel on obtient sa puissance de sortie, nous avons traité l'aspect modélisation et simulation de la machine asynchrone à double alimentation. Les résultats sont présentés et interprétés.

On a proposé une méthode de contrôle des puissances qui sera étudiée et traitée dans le troisième chapitre.

Références bibliographique chapitre II

1. N. Abu Tabak, " Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation ", thèse de doctorat de École Centrale de Lyon 2008.
2. N. Kasbadji Merzouk, " Carte des Vents de l'Algérie - Résultats Préliminaires - " Laboratoire d'évaluation du Potentiel Énergétique, Centre de Développement des Énergies Renouvelables B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger.
3. Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/>.
4. M. Rapin Ph. Leconte " Éoliennes ", Éditions T.I. BM 4 640v2.
5. C. Vauge, " Froid, Énergies nouvelles B2,II ", Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME).
6. Wildi. Sybille " Électrotechnique " 4^{ème} Edition.
7. Mme L. Hamane, " Les ressources éoliennes de l'Algérie ".
8. M. Pluviôse, " Conversion d'énergie par turbomachines : éolienne turbine à gaz " Paris ellipse.2005.
9. B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed " Aérogénérateurs électriques " Editions T.I.D 3 960.
10. " Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ", thèse 2007 d'École Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie.
11. V. Pradeep Mahadanaarachchi " Fault Analysis and protection of doubly fed induction generator-based wind farms ", Master of science May, 2009, Oklahoma State University, Sri Lanka.
12. N.D. Tleis, " Power System Modeling and Fault Analysis ", Elsevier, 2008.
13. S. Heier and R. Waddington, " Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems_", 2nd Edition, John Wiley, 2006.
14. J.B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. Wu and N. Jenkins, " Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generators ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18,No.2, May 2003.
15. A. Boyette, " Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ", Thèse de doctorat de l'université de Henry Poincaré, Nancy I.
16. F. Poitiers, " Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne " , école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
17. A. Boyette, Shahrokh Saadate, " Éolienne avec génératrice à double alimentation et unité de stockage d'énergie pour production d'électricité ", EPF Grenoble (CD rom S7-2) juillet 2006.
18. Frédéric Poitiers, " Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
19. Janaka B. Elkanayake, Lee Holdsworth, XueGuang Wu, and Nicholas Jenkins, "Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine", IEEE Transactions on power systems, Vol. 18, NO. 2, May 2003.
20. J. Morren¹, S.W.h. de Haan¹, P. Bauer¹, J.T.G. Pierik², J. Bozelie³, "Comparison of complete and reduced models of a wind turbine with Doubly-Fed Induction Generator ", Toulouse, ISBN: 90-75815-07-7. EPE 2003.
] H. Akagi, S. Ogasawara, H. Kim, "The theory of instantaneous power in three phase four wire systems and its applications", electrical engineering in Japan, ol.135, n 3, PP.74-86, 2001.

Chapitre III Commande de la puissance

Dans ce chapitre on propose un système de commande de la puissance pour une génératrice asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne à vitesse variable. Ce système utilise le découplage statorique du flux. L'algorithme du régulateur calcule le vecteur de tension devant être fourni au rotor afin de garantir que les puissances active et réactive atteignent leurs valeurs de référence. L'influence des erreurs d'estimation des fuites de l'inductance de générateur et des informations de résistance est également étudiée en raison de leurs demandes pour cette méthode de contrôle proposée. Enfin, une implémentation numérique est présentée pour valider les principes théoriques de ce régulateur.

Dans la littérature, pour obtenir un contrôle découplé des puissance active et réactive de la GADA, le contrôle orienté de vecteur tension statorique est utilisé [1] ou le contrôle de vecteur orienté flux statorique [2]. Le contrôle de la puissance active et réactive est obtenu avec un régulateur(contrôleur) du courant rotorique [3] ou le contrôle direct de couple(DTC) [4]. Certaines recherches ont été présentées par [5] utilisent des régulateurs PI et le contrôle orienté du flux statorique pour le contrôle du courant rotorique. Le problème dans l'utilisation du régulateur PI est le réglage des gains et les conditions GADA dans toute la plage de fonctionnement et les paramètres des variations qui peuvent entraîner une dégradation des performances du système (variation paramétrique). L'utilisation de régulateurs à hystérésis pour la commande de la puissance a été présentée dans [6], bien qu'elle a des variations indésirables de la fréquence de commutation (pour les convertisseurs).

Certains auteurs cherchent autres possibilités de contrôle de la puissance pour la GADA en utilisant une boucle de vecteur du courant rotorique, régulateur prédictive fonctionnelle « PREDICTIVE FUNCTIONAL CONTROLLER » [7], contrôleur de mode interne [8], le modèle sur la base de la commande prédictive [9] ou commande de mode glissant [10] [11]. Ces régulateurs sont conçus en utilisant le modèle GADA et ils ont une réponse satisfaisante de puissance par rapport à la réponse en puissance du PI, bien qu'il

soit à peine de les mettre en œuvre en raison des formulations complexes des régulateurs.

Une autre possibilité pour le contrôle de puissance peut être faite en utilisant la logique floue [12], Les réseaux de neurones [13] et neuro-floue [14]. Ces stratégies sont conçues par la connaissance du système et ils ont une réponse de puissance satisfaisante, bien que les régulateurs ont des implémentations coûteuses en matière de calcul élevé, l'incertitude due à la connaissance des paramètres système et des variations peuvent entraîner une dégradation des performances du système.

Dans ce contexte, on propose une étude comparative de la commande séparée des puissances active et réactive en utilisant système de commande de puissance pour la production d'énergie éolienne à vitesse variable.

1. Contrôle séparé des puissances active et réactive de La GADA

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en utilisant la modélisation du chapitre précédent (fig.21). On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement g , il est possible d'établir sans difficulté, une commande vectorielle car les influences des couplages restent faibles et les axes d et q peuvent être commandés séparément par leurs propres régulateurs. On aura, ainsi, deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [15] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplages et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode appelée **commande directe** car les régulateurs de puissances contrôlent directement les tensions rotorique de la machine.
- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplages et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles qui permettent de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette

méthode appelée **commande indirecte** et découle directement des équations (2.34) et (2.32).

Ces deux méthodes de commande des vont être étudiées et simulé dans la suite de ce chapitre.

1.1. Commande directe

Dans cette partie on présente la commande indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites au paragraphe précédent. On met en évidence le lien entre, d'une part, la puissance active et la tension V_{rq} et d'autre part, la puissance réactive et la tension V_{rd} .

1.1.1. Mise en place de la régulation

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure 31, pour déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{MV_s}{L_s}$. On considère dans l'étude que l'éolienne est raccordée à un réseau de forte puissance (stable), donc le terme précédent est constant. Par conséquent, Il n'y a pas de nécessité de placer un régulateur entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour régler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation pour chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbations représentés sur le schéma bloc de la figure 31. [16], [17], [18]. Du fait de la faible valeur du glissement, on néglige termes de couplages entre les deux axes de contrôle. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, (figure 31).

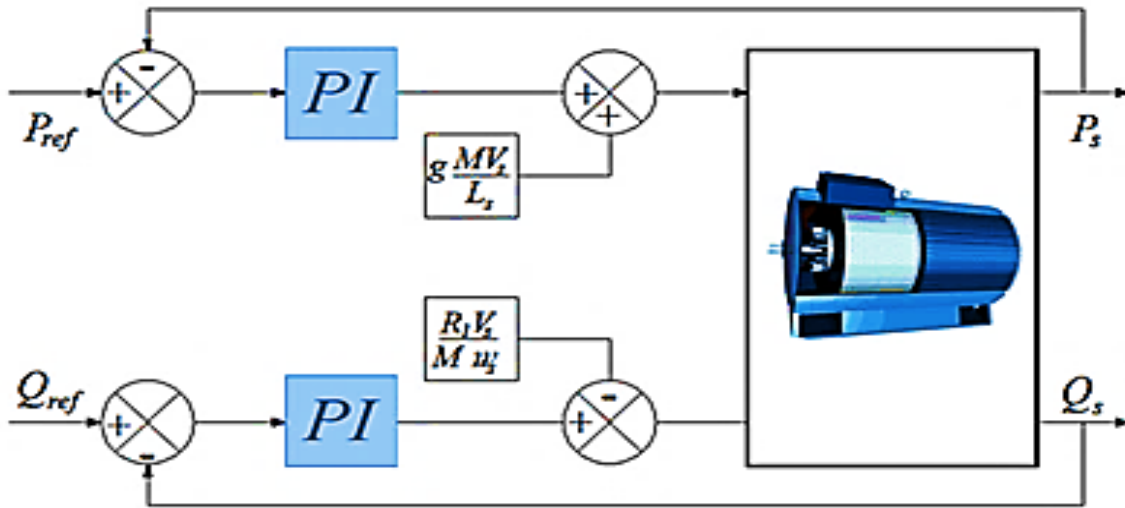


Figure 31. Schéma bloc de la commande directe.

1.1.2. Synthèse du régulateur PI

Le régulateur de type Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la GADA, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [19]. C'est pour cela que nous l'avons utilisé pour le système de génération éolien considéré.

La figure 32 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme : $k_p + \frac{k_i}{p}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure 32.

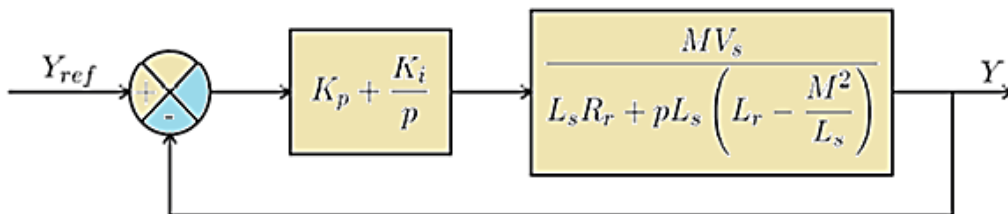


Figure 32. Boucle de régulateur PI.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \times \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (3.1)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (3.2)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante. Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivantes :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{p} \quad (3.3)$$

Ce qui donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad (3.4)$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s}$$

Avec τ_r , le temps de réponse du système de l'ordre de 10 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur éolienne ou les variations du vent sont peu rapides et les constantes du temps mécaniques sont importantes. Imposer une valeur plus faible du temps de réponse, n'améliore probablement pas les préférences de l'ensemble, mais risque d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse selon :

$$\begin{cases} k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \\ k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \end{cases} \quad (3.5)$$

1.1.3. Résultats de simulations

La modélisation de la machine, de sa partie mécanique et de sa commande directe a été implantées sous l'environnement MATLAB pour effectuer des tests de la régulation [20]. On a soumis le système à des échelons de puissances active et réactive pour observer le comportement de la régulation.

Les résultats de la simulation de la GADA et de la turbine considérées (voir l'annexe) sont présentés sur la figures 33.

D'après les résultats obtenus par simulation on remarque que les puissances suivent parfaitement leurs grandeurs de références. Le changement de l'une de puissances n'entraîne pas celui de l'autre. Donc, leur commande est indépendante. Le fonctionnement de contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

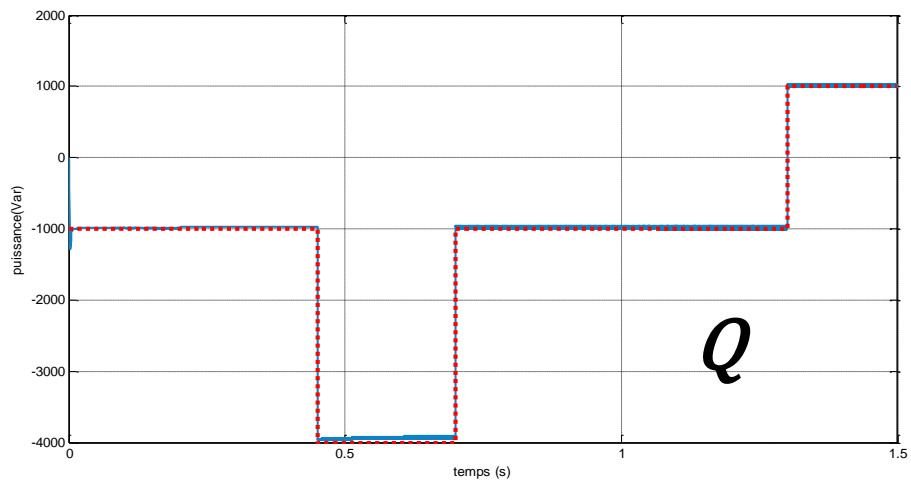
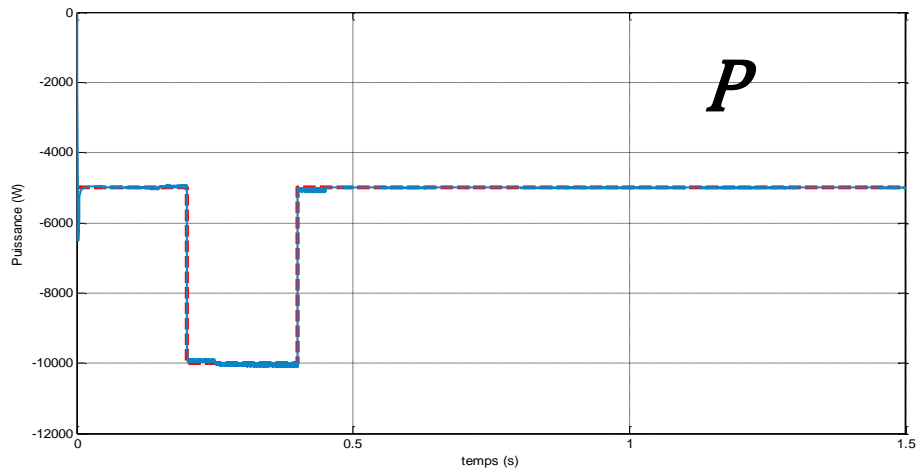


Figure 33. Résultats de simulation pour la commande.

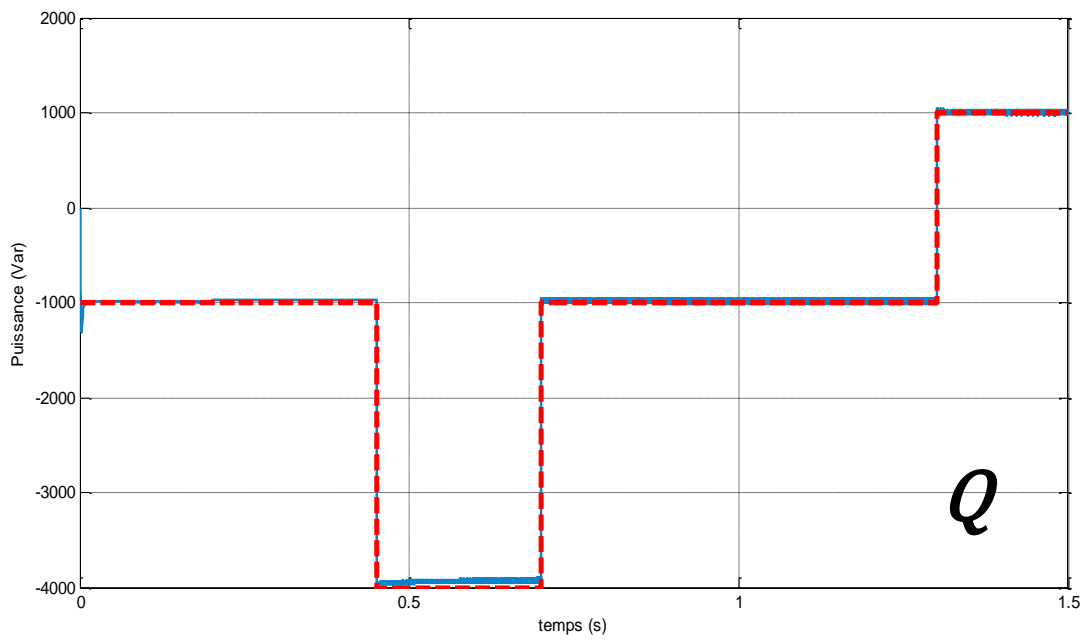
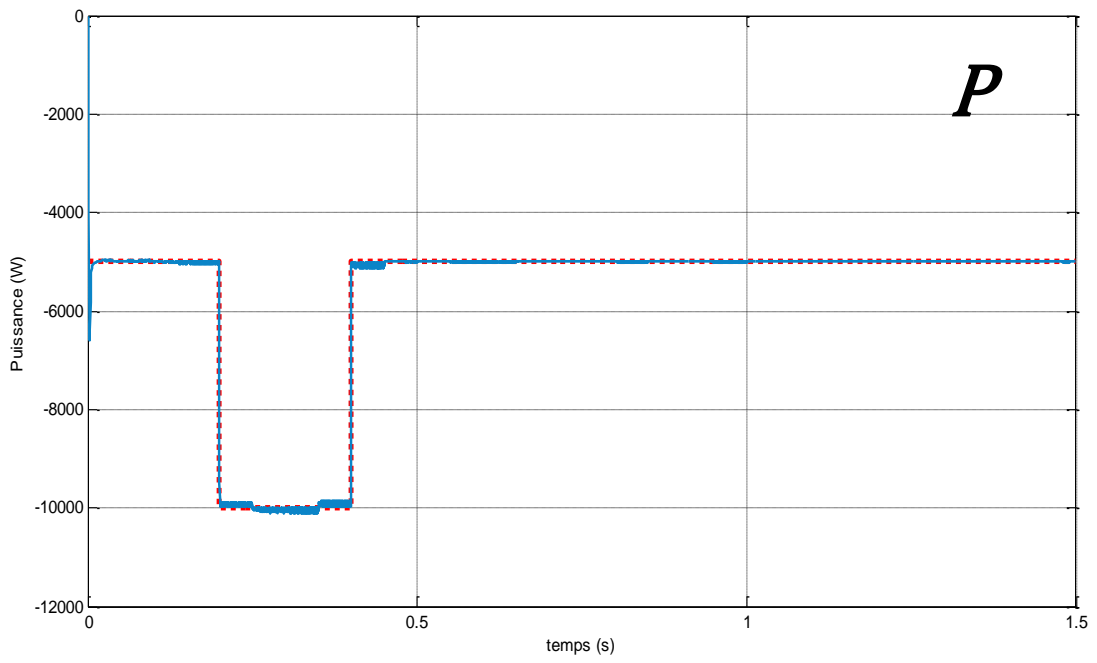


Figure 34. Résultats de simulation pour la commande directe pour un vent variable.

1.2. Commande indirecte

La méthode indirecte consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [21], [22], [23], [24], [25]. On construit ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. On aboutit alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens.

La commande indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADA. Les puissance statorique et les tensions rotorique sont exprimées en fonction des courants rotoriques.

A. Commande sans boucle de puissance

En gardant les mêmes hypothèses sur la stabilité du réseau, on établit le système de régulation de la figure 35, où l'on trouve désormais une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine.

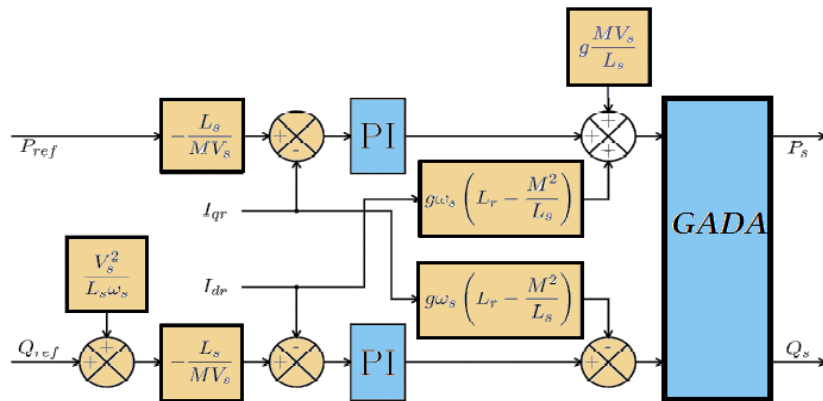


Figure 35. Schéma bloc de la commande indirecte.

La simulation de cette régulation sur MATLAB a donnée de bons résultats en termes de dynamique et de réponses aux échelons pour la puissance réactive, comme on peut le voir sur les figures 36, 37. On peut cependant observer une erreur de la puissance réactive lorsque la puissance active est faible.

Par contre, elle fait apparaître une erreur statique au niveau de la puissance active

et réactive qui est due au fait que dans cette régulation. On ne trouve qu'une seule boucle sur les courants et que les puissances sont donc restées en boucles ouvertes.

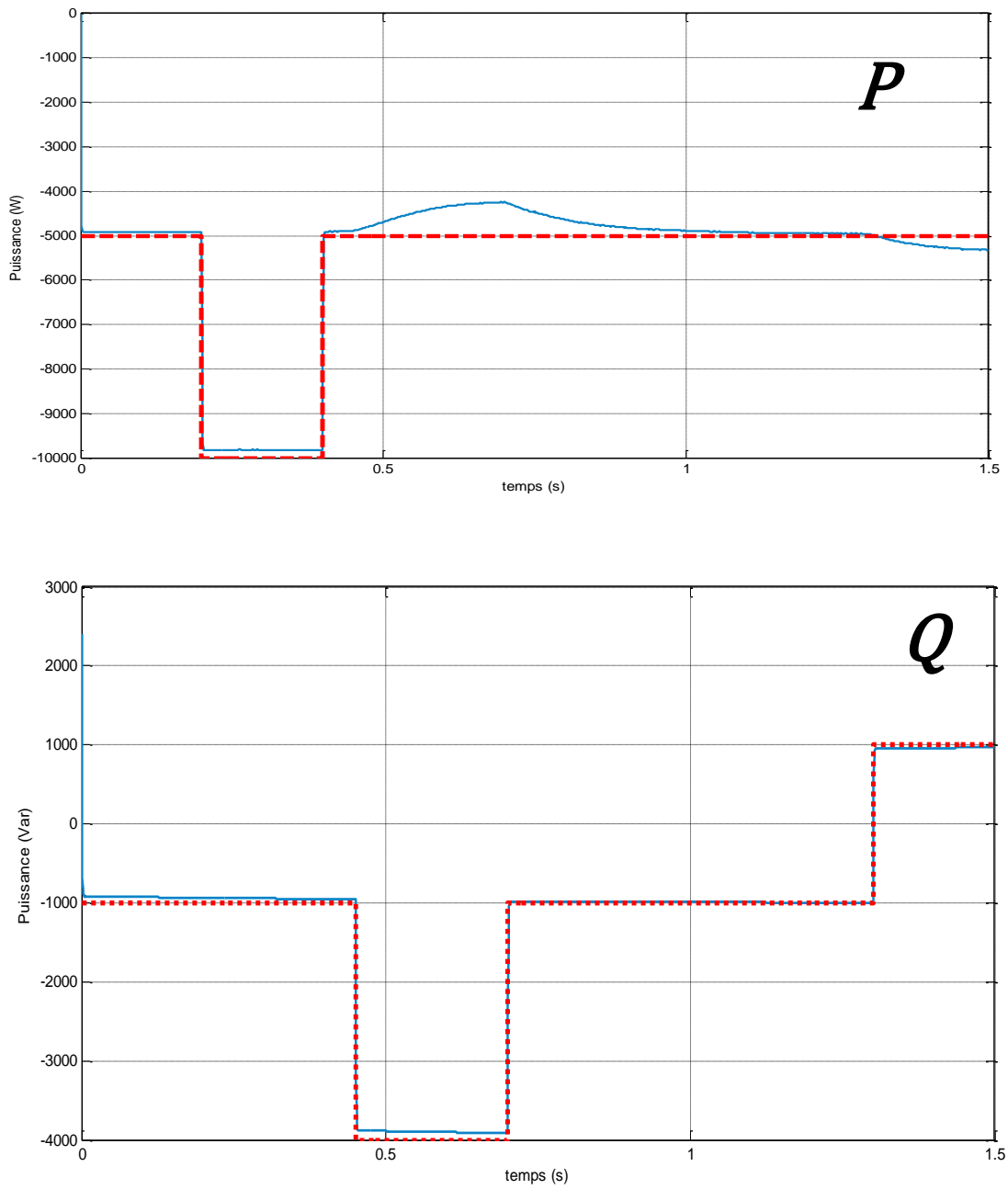


Figure 36. Puissance active et la puissance réactive (vent constant).

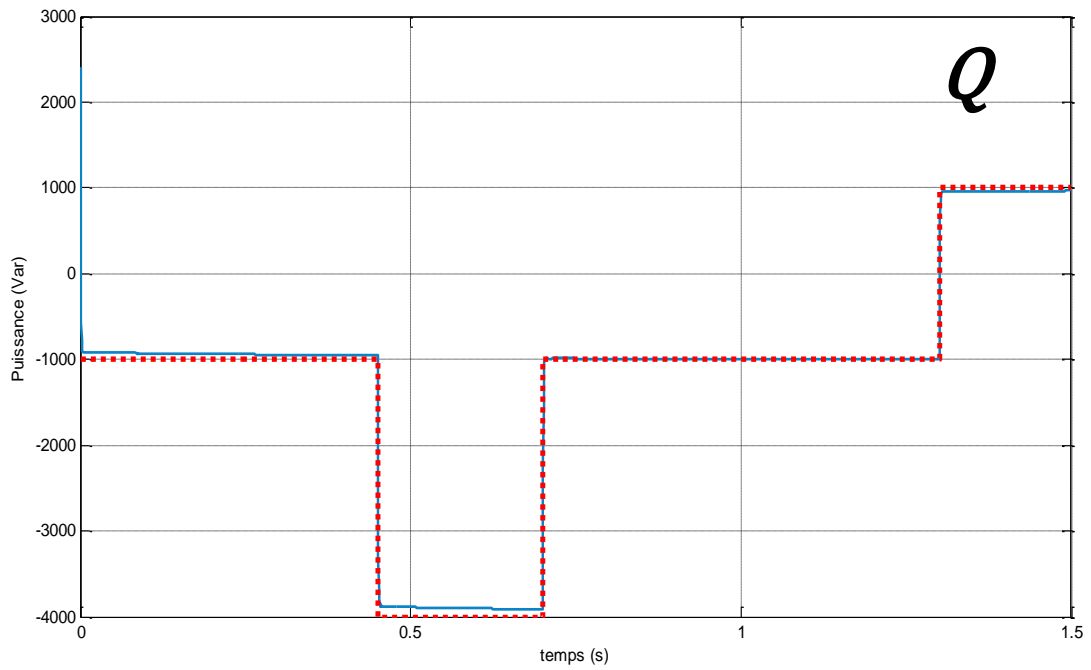
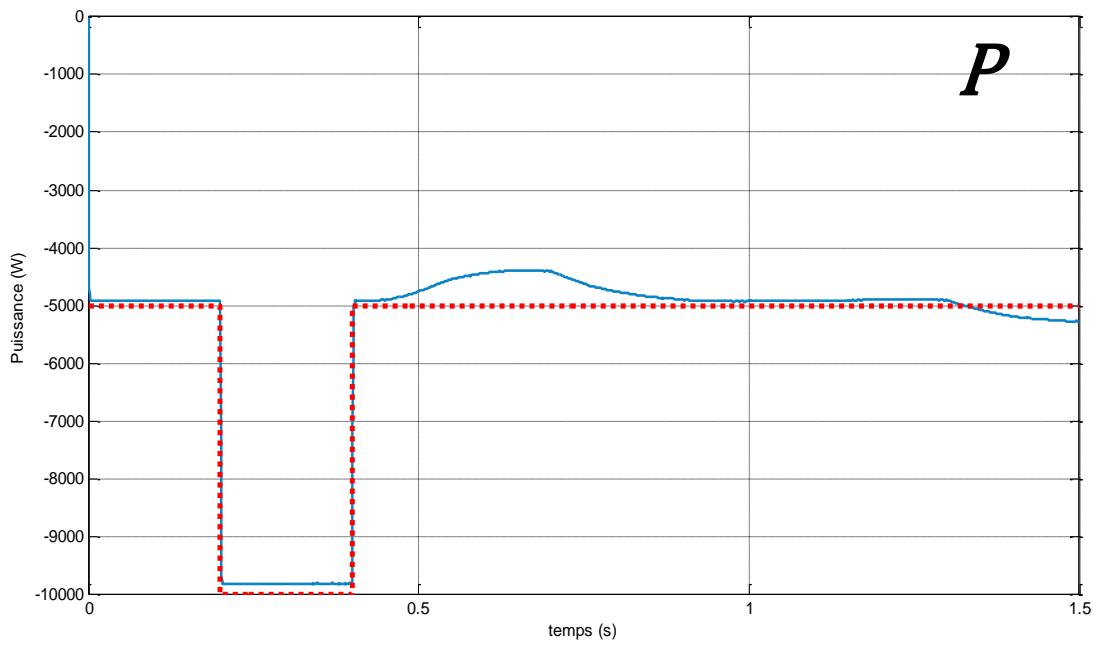


Figure 37. Puissances active et réactive (vent variable).

Une des hypothèses de notre modèle est que la tension V_s soit constante, mais lorsque la puissance active produite varie, cela entraîne nécessairement une légère variation de tension V_s , du fait des impédances de liaison entre le réseau et l'éolienne. Cette petite variation est aussi à l'origine de l'écart des puissances. De plus, la résistance statorique, qui a été négligée dans notre modélisation a une influence sur les puissances.

L'erreur est nettement plus importante sur la puissance réactive que sur la puissance active car sur la puissance réactive le terme correcteur, de la figure 35, vient s'ajouter avant le régulateur de courant.

B. Commande avec boucles de puissance

Afin d'améliorer la commande indirecte, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des axes des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.

Nous aboutissons au schéma bloc présenté en figure 38 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.

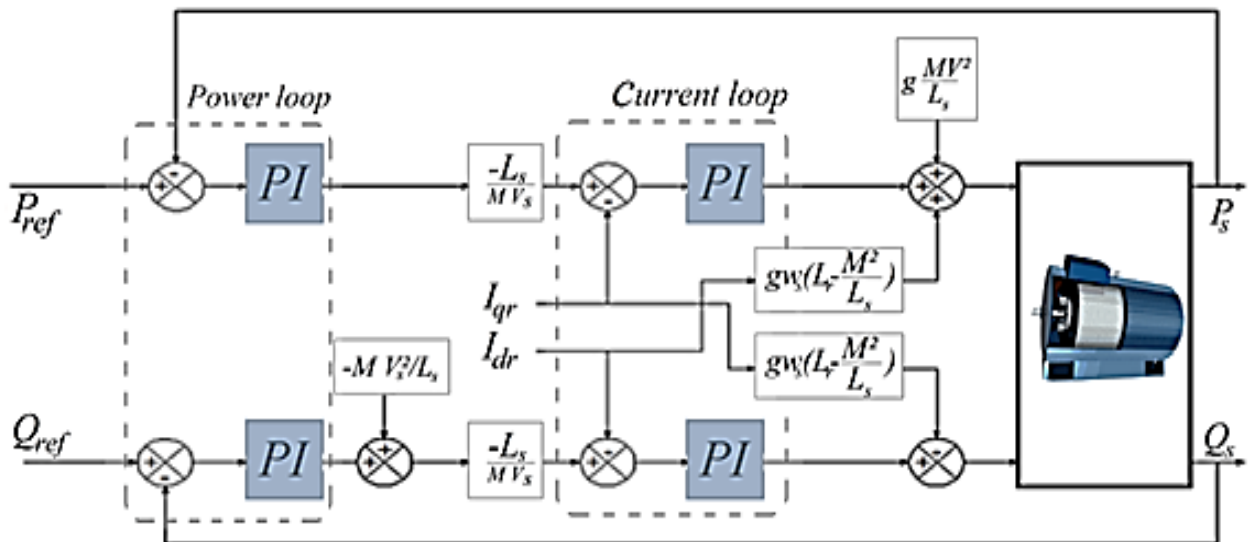


Figure 38. Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de puissance.

Les figures 39 et 40, montrent que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

Qu'il s'agit de la puissance active ou réactive, on observe une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances.

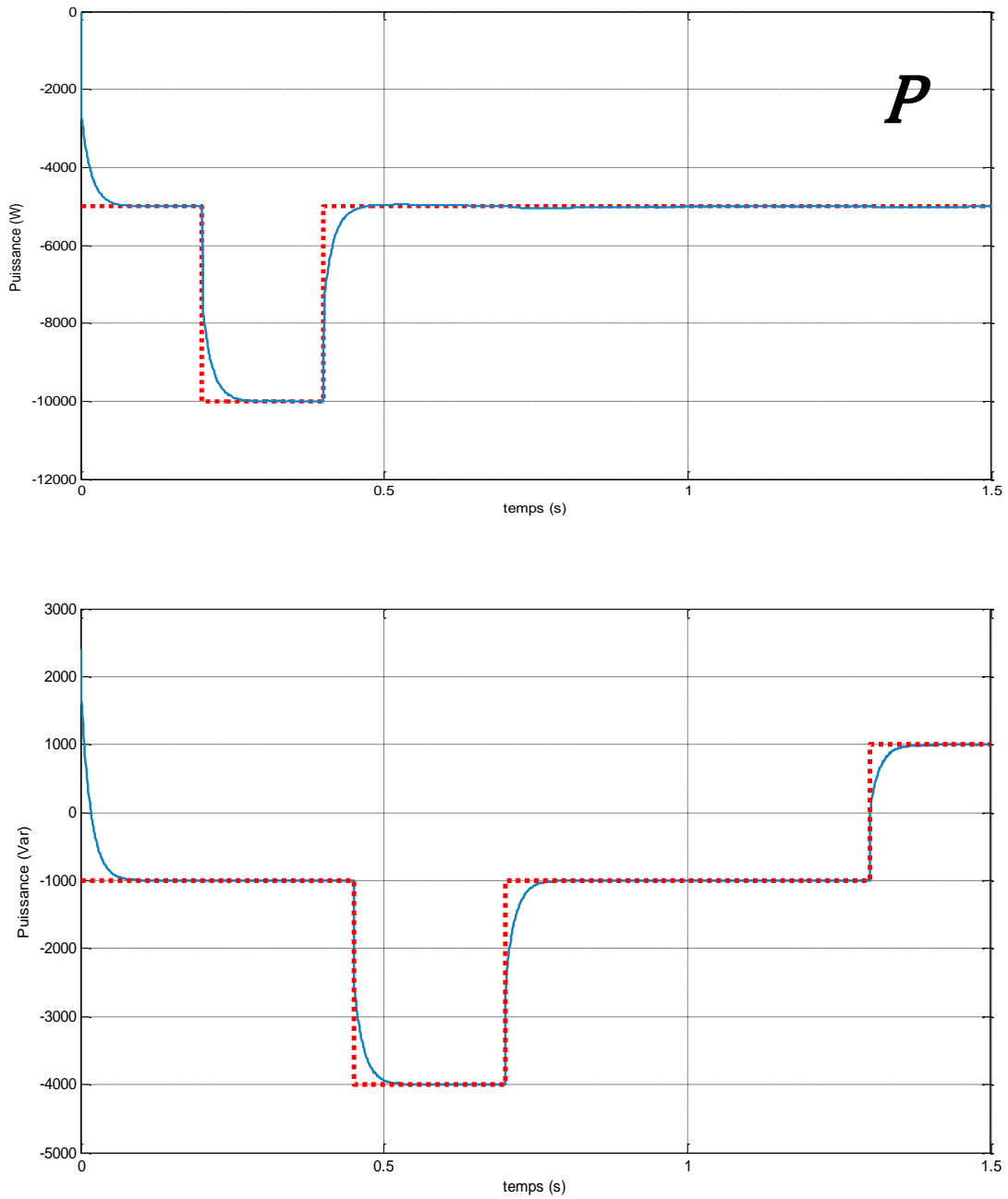


Figure 39. Puissance active et la puissance réactive (vent constant).

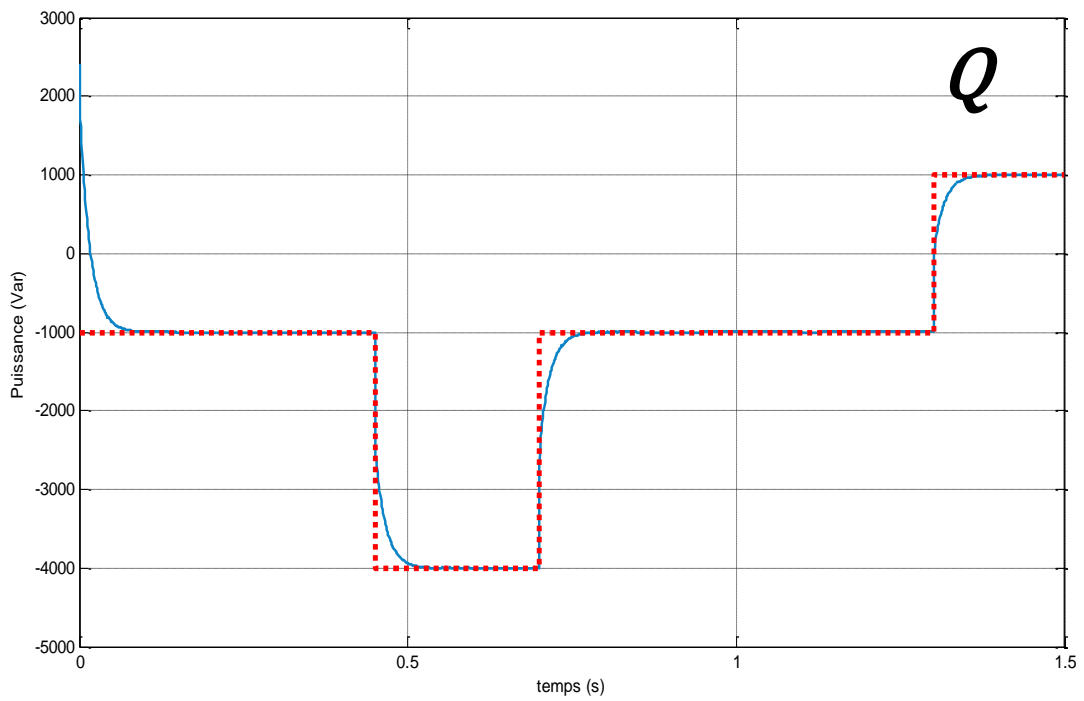
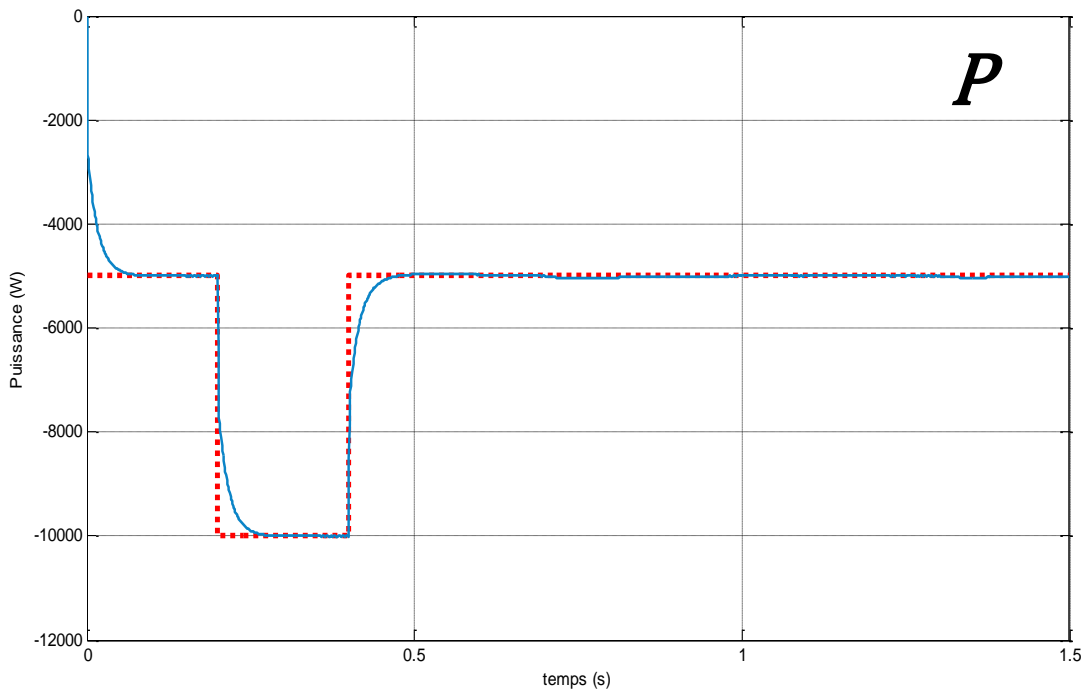


Figure 40. Puissance active et la puissance réactive (vent variable).

Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de l'exploitation du modèle de la machine.

Cette commande est plus performante que la commande directe qui provoque plus de perturbations entre les deux puissances. De plus, elle permet de limiter les courants rotoriques de la machine en fixant une limite dans la boucle du courant. Ces puissances seront aussi utilisées pour le contrôle général de l'éolienne.

2. Régulateur flou

La logique floue suscite actuellement un intérêt général auprès des chercheurs et des industriels. Plus généralement auprès de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnements naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine, de construire des systèmes artificiels effectuant des tâches habituellement prises en charge par les humains. En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles.

2.1. Notions de base de la logique floue

La logique floue est une approche conçue autour de la théorie des ensembles flous développée par Zadeh [27]. Les notions relatives de qualification faible aux grandeurs du rapport cyclique ou de courant sont difficiles à désigner de manière exacte. Fixons-nous des seuils et qualifions la valeur de la variable considérée par rapport à ces seuils. Le degré d'appartenance de la variable D relativement à l'ensemble « faible » n'est qu'une pondération de la vérité qui lui a été affecter [28]. Ce degré d'appartenance (μ) en logique booléenne, est soit 0 ou 1.

D peut avoir quand il est :

- Faible : $\mu_{\text{faible}}(D) = 1$, $\mu_{\text{moyenne}}(D) = 0$, $\mu_{\text{élevé}}(D) = 0$,
- Moyenne : $\mu_{\text{faible}}(D) = 0$, $\mu_{\text{moyenne}}(D) = 1$, $\mu_{\text{élevé}}(D) = 0$,

- Élevée : $\mu_{\text{faible}}(D) = 0$, $\mu_{\text{moyenne}}(D) = 0$, $\mu_{\text{élevée}}(D) = 1$.

La figure 41 montre que le degré d'appartenance de D ne peut prendre que deux qualificatifs à la fois selon les seuils affectés.

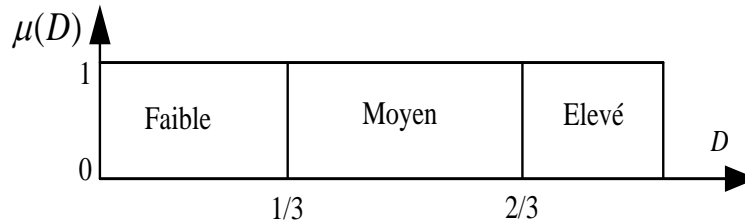


Figure 41. Degrés d'appartenance en logique booléenne et les ensembles

En logique floue, le degré d'appartenance n'est qu'une fonction offrant une valeur réelle dans l'intervalle $[0, 1]$. Par exemple, $\mu_{\text{moyenne}}(D)$, nous renseigne à quel degré la variable est qualifié moyen. Dans ce cas, ce dernier aura la qualification (voir figure 42) :

- Faible avec un degré d'appartenance 0,5
- Moyen avec un degré d'appartenance 0.5

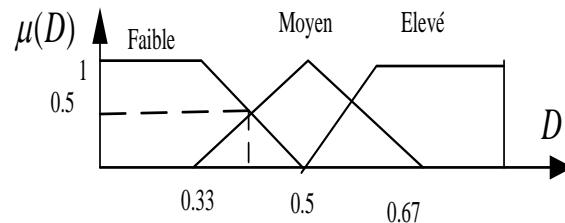


Figure 42. Exemple d'ensembles considérés en logique floue.

Soit une variable floue x , appelée aussi variable linguistique, à laquelle on définit une fonction de degré d'appartenance sur un univers de discours X [15], [16].

$$\begin{cases} \mu_A : X \rightarrow [0, 1] \\ x \mapsto \mu_A(x) \end{cases} \quad (3.6)$$

L'univers de discours X est l'ensemble des réels de l'intervalle $[0, 1]$. La figure 43 montres que la variable s'inscrit dans trois sous-ensembles flous : faible, moyen et élevé.

Chaque sous ensemble correspond à une des fonctions : μ faible (D), μ moyenne (D) et μ élevée (D).

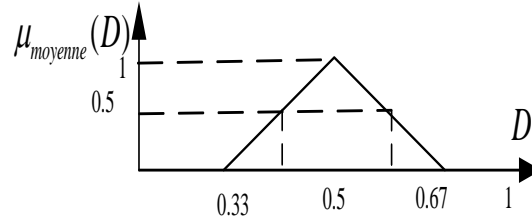


Figure 43. Cas de l'ensemble flou "moyenne" de la variable

La fonction degré d'appartenance μ moyenne sur tout l'univers de discours est :

$$\mu_{moyenne} \begin{cases} \frac{D-0.33}{0.17} & D[0.33 \ 0.5] \\ \frac{0.65-D}{0.17} & D[0.5 \ 0.67] \\ 0; & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.7)$$

2.2. Opérateurs et Normes

Puisque les fonctions caractéristiques des ensembles flous sont graduelles, l'extension de certains opérateurs définis sur les ensembles de la logique classique aux cas des ensembles flous pose certaines difficultés. Il n'est donc pas possible d'appliquer directement la logique booléenne qui manipule des ensembles à fonctions caractéristiques binaires (0 ou 1). Pour pallier à ce problème, quelques définitions sont introduites comme outils nécessaires au traitement des ensembles flous [31].

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites par les opérateurs "ET", "OU" et "NON". De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces opérateurs sont établies :

Considérons deux variables linguistiques x_1 et x_2 représentées par un ensemble de fonction. Soit $\mu_{ij}(x_1)$ la fonction d'appartenance au $i^{\text{ème}}$ sous ensemble flou de x_1 et soit $\mu_{2j}(x_2)$ la $j^{\text{ème}}$ fonction d'appartenance du sous ensemble flou de x_2 .

Alors les opérateurs flous "OU", "ET" et "ALORS", appliqués aux deux ensembles flous

sont définis à l'aide de leurs fonctions d'appartenance [32], de la manière suivante :

- **Opérateur ET** : il est réalisé par plusieurs méthodes ; on se limite à celle du produit des deux degrés d'appartenance $\mu_{ij}(x_1)$ et $\mu_{2j}(x_2)$ des deux ensembles flous en question, soit

$$\mu(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(\mu_{1i}(x_1) \cdot \mu_{2j}(x_2)) \quad (3.8)$$

- **Opérateur OU** : la réalisation de cet opérateur OU se fait par exemple par la formation de la moyenne arithmétique des deux fonctions d'appartenance $\mu_{ij}(x_1)$ et $\mu_{2j}(x_2)$ des deux ensembles flous i et j de x_1 et x_2 respectivement ; c'est-à-dire :

$$\mu(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(\mu_{1i}(x_1) + \mu_{2j}(x_2)) \quad (3.9)$$

- **Implication ALORS** : elle permet d'évaluer le degré de vérité des propositions floues, elle est réalisée par plusieurs méthodes telles que le produit des deux fonctions d'appartenance $\mu_{ij}(x_1)$ et $\mu_{2j}(x_2)$ des deux sous-ensembles flous i et j de x_1 et x_2 respectivement, d'où :

$$\mu(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(\mu_{1i}(x_1) \cdot \mu_{2j}(x_2)) \quad (3.10)$$

2.3. Structure d'un régulateur Flou

Le réglage par la logique floue traite les problèmes de commande mais avec une philosophie différente. En effet, ce type de régulateurs flous ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue [33], la figure 15 illustre le synoptique global d'un régulateur flou.

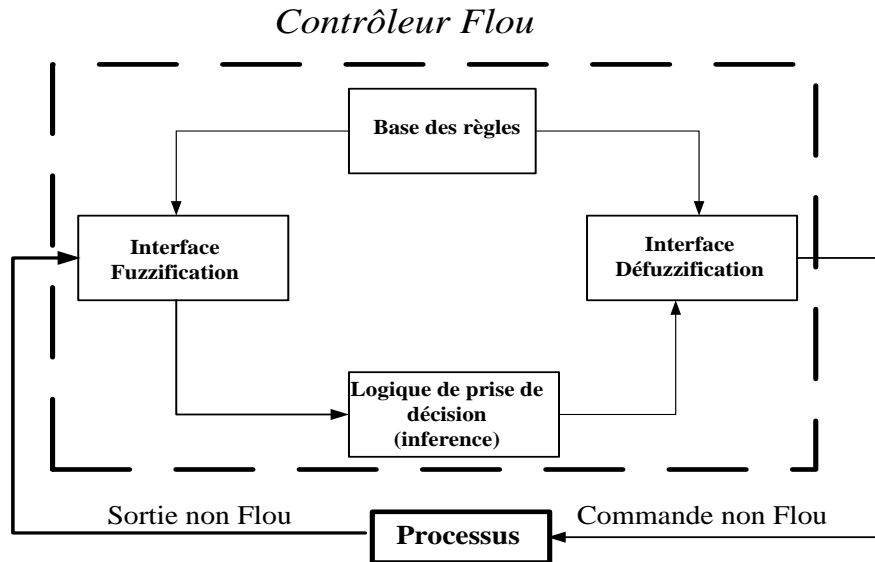


Figure 44. Synoptique global d'un régulateur flou.

✓ **L'interface de FUZZIFICATION inclut les fonctions suivantes :**

- Mesure des variables d'entrée.
- Transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- Transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

✓ **Base des règles :** Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur en fonction des signaux d'entrée. Elles sont exprimées sous la forme «SI ALORS», comme suit :

$$R_i : \text{SI } X_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et ...et } X_n \text{ est } A_{in} \text{ Alors } Y \text{ est } B_i$$

Ou sous la forme de SUGENO:

$$R_i : \text{SI } X_1 \text{ est } A_{i1} \text{ et ...et } X_n \text{ est } A_{in} \text{ Alors } Y = f_i(X) \text{ .Avec: } f_i(X), \text{ un polynôme.}$$

✓ **Logique de Prise de décision (Interface Flou):**

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [34].

Dans les règles floues interviennent les opérateurs "ET" et "OU". L'opérateur "ET"

s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur «OU» lie les différentes règles. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces deux opérateurs.

✓ **Interfaçage de défuzzification :**

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de Défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeurs physiques nécessaires pour un tel état de processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire.

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont. La Méthode du centre de gravité est la plus utilisée dans les contrôles flous, elle génère le centre de gravité fonction \ddot{y} d'appartenance issue de l'inférence. L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation suivante.

$$\ddot{y} = \frac{\int y \mu_{res}(y).dy}{\int \mu_{res}(y).dy} \quad (3.11)$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface. La détermination du centre de gravité nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel. De ce fait, cette méthode est la plus coûteuse en temps de calcul.

3. Contrôle direct avec un régulateur floue

Comme cela est expliqué dans le schéma synoptique de la commande floue Figure.45, on a deux entrées (l'erreur (e), et ses dérivés (de)) et une sortie (la commande (cde)).

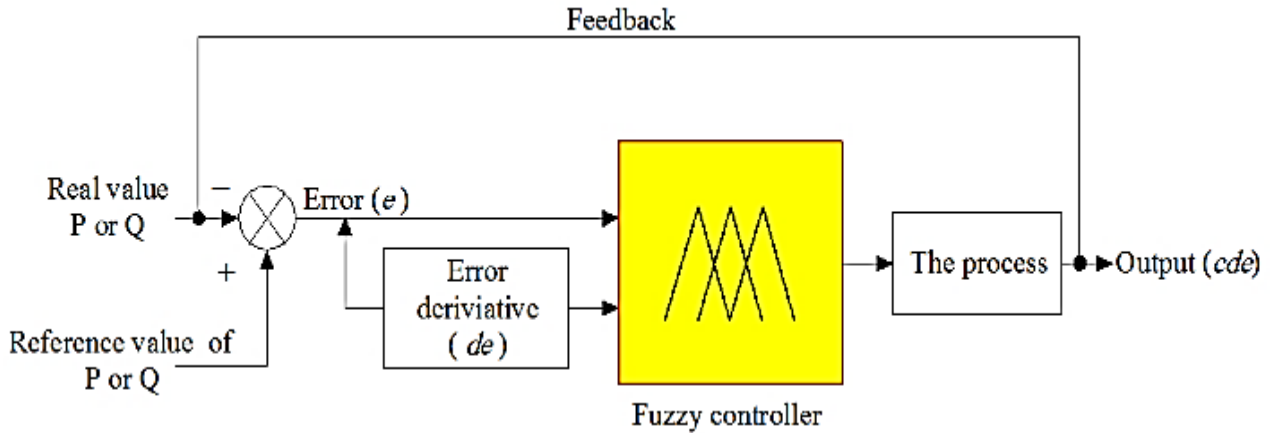


Figure 45. Schéma synoptique du control

Les entrées de commande floue sont les erreurs de puissance active et réactive, le taux de variation dans un intervalle de temps d'erreur. Les variables linguistiques et les termes sont présentés dans le tableau 4.

Comme cela est décrit dans Figure.45, cette partie se concentre sur le contrôle de la logique floue basée sur le système de Mamdani [35]. Ce système comporte quatre parties principales. Tout d'abord, en utilisant des fonctions d'appartenance d'entrée, les entrées sont fuzzified alors basée sur des bases de règles et système d'inférence, les sorties sont produites et, enfin, les sorties sont defuzzified et appliquées au système de commande principal. Les fonctions d'appartenance utilisées pour les variables d'entrée et de sortie sont présentés sur les Figures 46 et 47.

Tableau 4. Règles floues

		DÉRIVÉ DE L'ERREUR (DE)					
		NB	N	ZE	P	PB	
L'ERREUR (e)	NB	NB	NB	N	N	ZE	SORTIE (cde)
	N	NB	N	N	ZE	P	
	ZE	N	N	ZE	P	P	
	P	N	ZE	P	P	PB	
	PB	ZE	P	P	PB	PB	

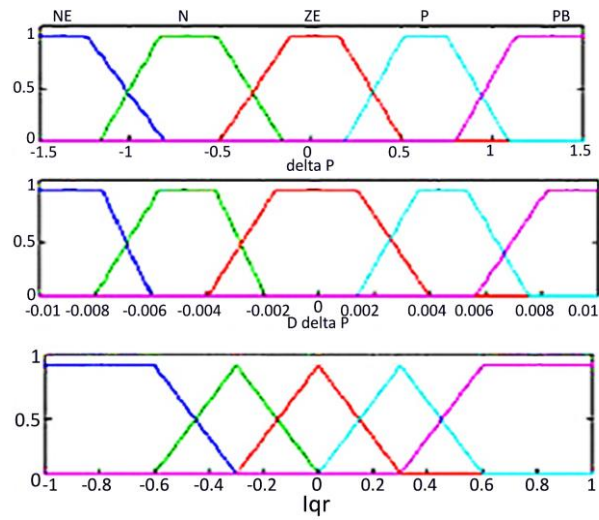


Figure 46. Entrée et la sortie du régulateur de puissance active.

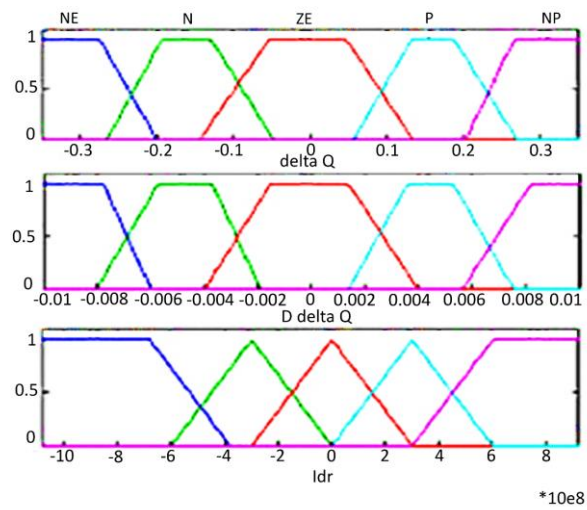


Figure 47. Entrée et la sortie du régulateur de puissance réactive.

4. Simulation et comparaison des différentes méthodes

Dans cette partie nous avons procédé à la comparaison des trois méthodes :

- Le contrôle direct avec PI et avec
- Le contrôle direct avec un régulateur floue et
- Le contrôle indirect avec la boucle de puissance

Ces trois méthodes ont été mis en œuvre dans l'environnement SIMULINK de MATLAB pour les tester. En appliquant des différents échelons de références aux puissances active et réactive nous constatant le comportement du contrôle.

Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures.48, 49 et 50.

La " Figure.48 ", présente les résultats des simulations avec le contrôle direct avec PI.

En effet, nous constatons l'existence d'une erreur de puissance réactive lorsque la puissance active est faible. Par contre, nous avons l'apparition d'une erreur statique des puissances principalement due à la méthodologie de cette méthode comprenant une seule boucle de courant, et les boucles des puissances restent ouvertes.

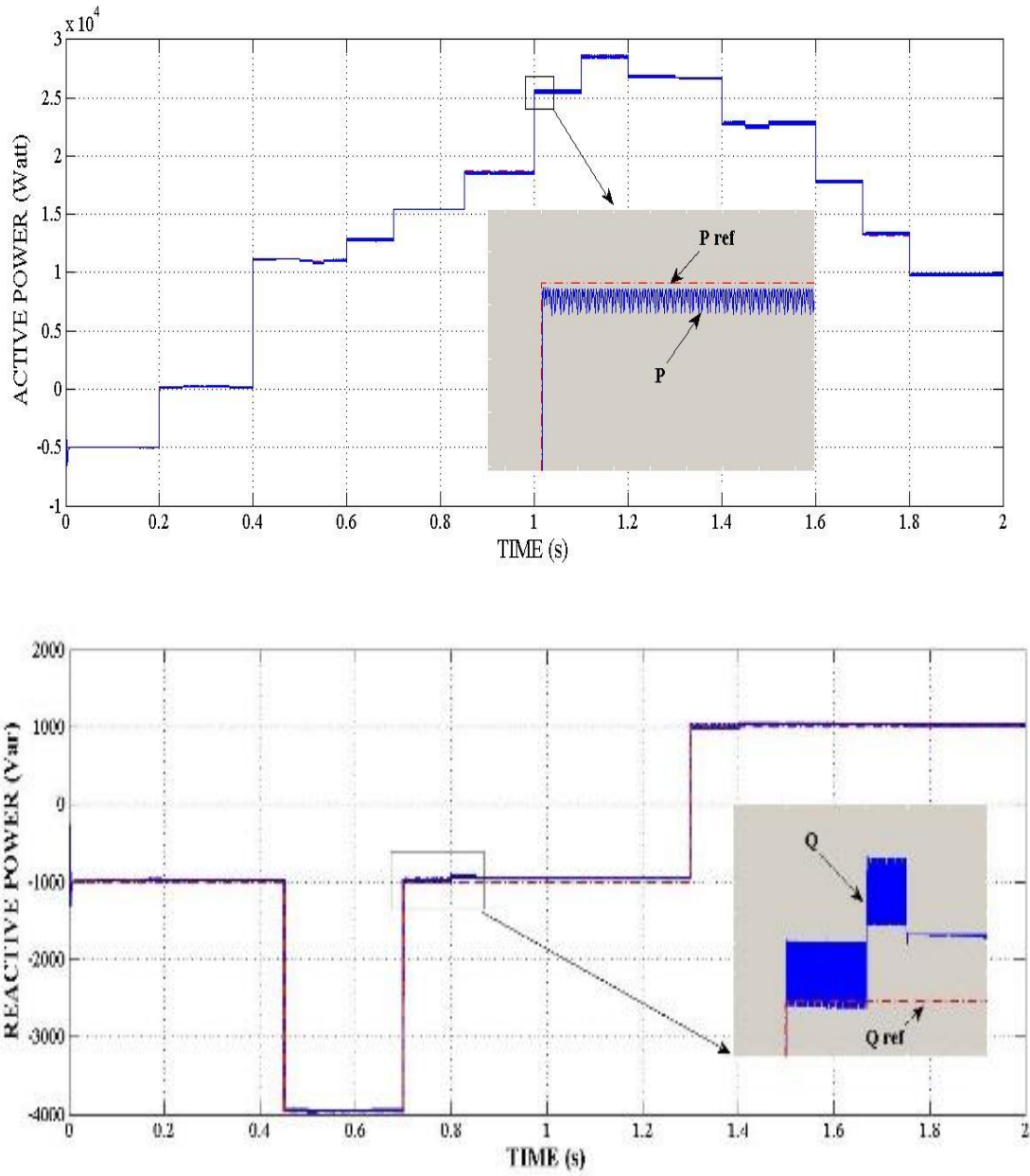


Figure 48. commande de puissance active et réactive (directe PI)

La Figure.49, présente les résultats de simulation du contrôle direct avec les régulateurs flous

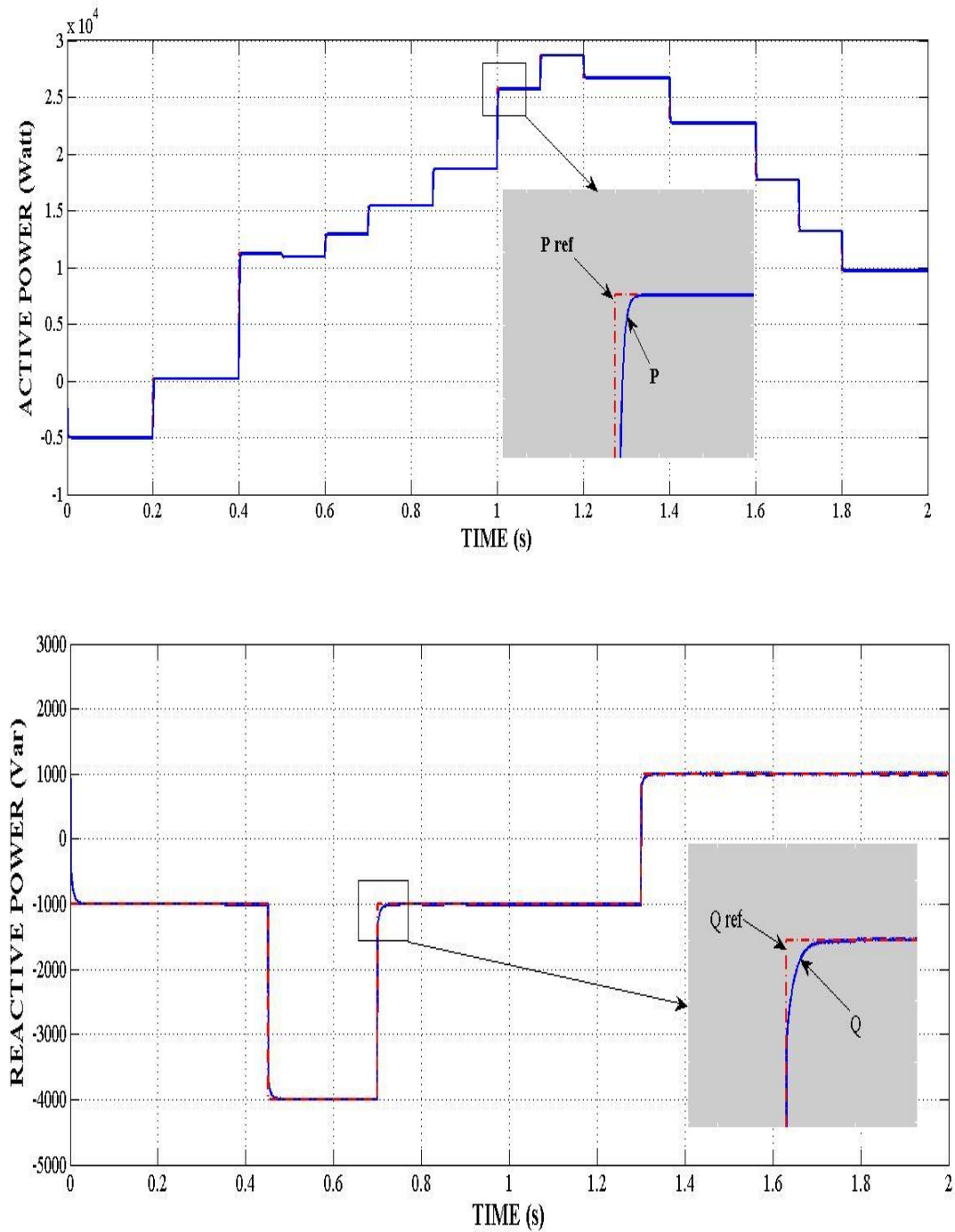


Figure 49. commande de puissance active et réactive (régulateurs flous).

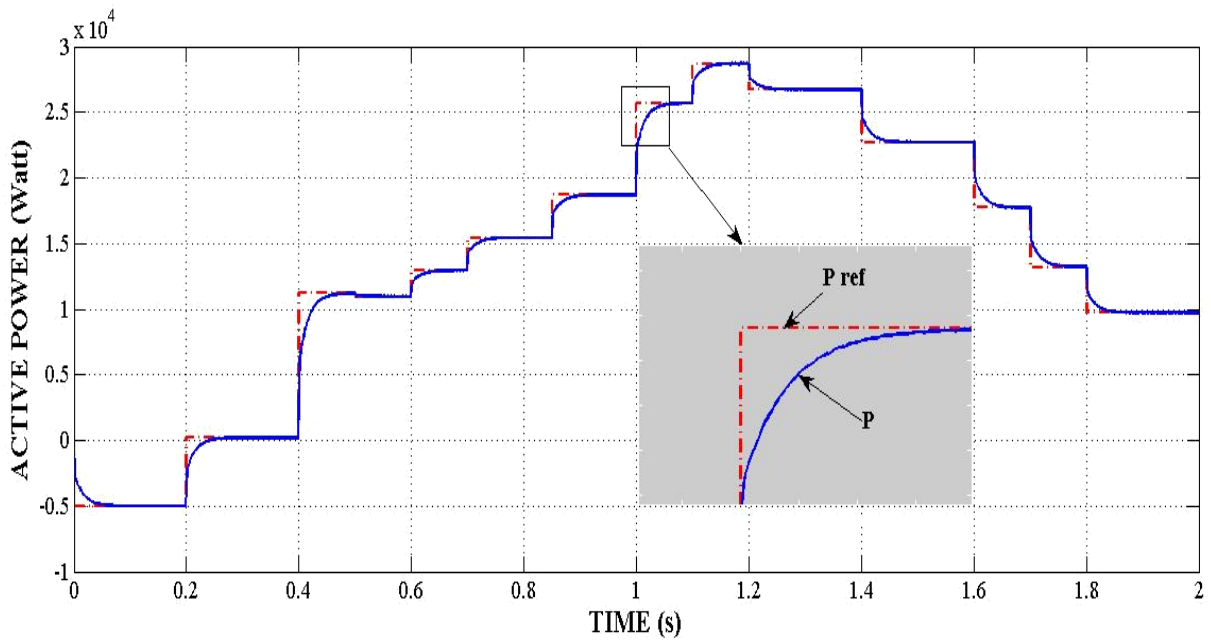
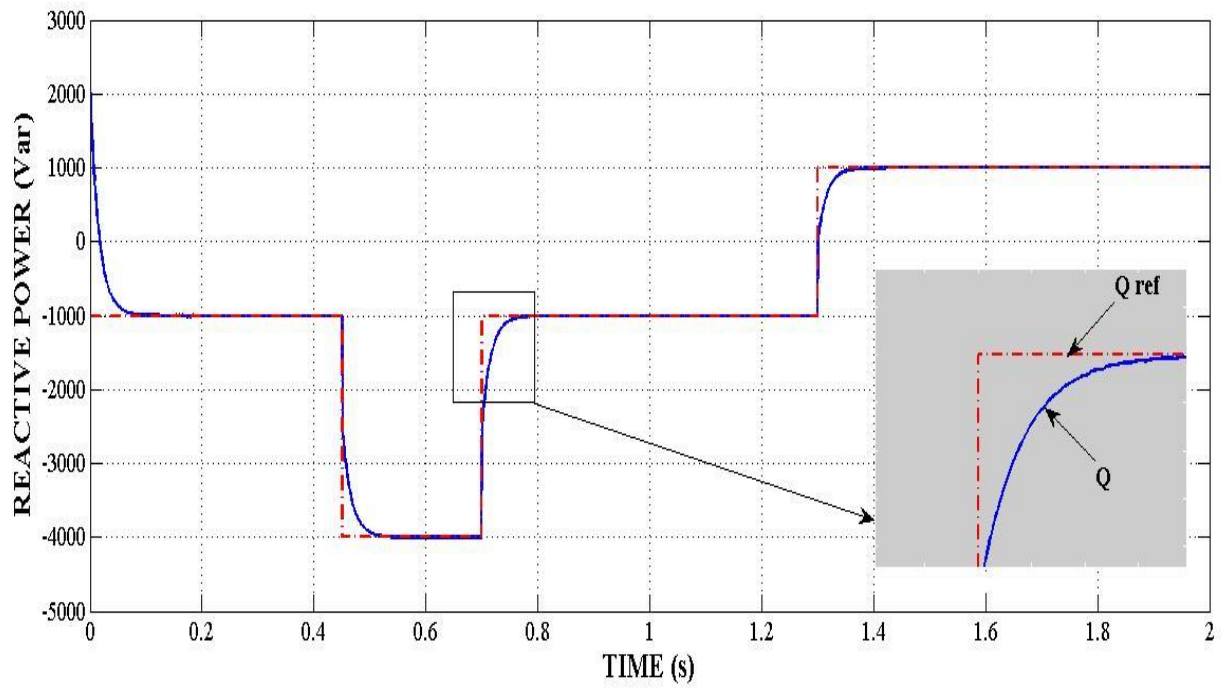


Figure 50. Puissance active et réactive (Contrôle indirect avec Feedback).

On constate que le système présente une erreur statique et dynamique nulle satisfaisante.

Pour les puissances actives et réactives la dynamique réagit rapidement et sans dépassement. Les niveaux des échelons sont correctement atteints. Le couplage entre les deux puissances est à peine perceptible, donc, il ne devrait pas y avoir de problème pour le fonctionnement futur du modèle du système.

La figure.50, présente les résultats des simulations du contrôle indirect avec boucle de courant.

Les résultats de simulation par cette méthode donnent une erreur statique nulle avec un temps de réponse relativement élevé, ce qui rend ce contrôle lent. Cette situation s'explique essentiellement à l'incorporation des deux boucles de contrôle (boucles de courant et de puissance).

Il est clairement que la méthode proposée est très facile à mettre en œuvre et de présenter une performance de satisfaction très comparant le contrôle indirect avec la méthode de la boucle de courant.

Tableau 5. Temps de réponse des régulateurs

Type de régulateur	Temps de réponse de P_s	Temps de réponse Q_s
Proposé	1 ms	0.8 ms
4 Pls	9 ms	8 ms

Conclusion

Les résultats de simulation déjà présentés ont montré que le contrôle indirect avec la boucle de puissance donne une meilleure performance que la méthode directe en utilisant la boucle de courant. Ceci élimine l'erreur statique, il y a un temps de réponse exceptionnel (0.08s) mais le contrôle avec la boucle de puissance est compliqué à mettre en œuvre en ce qui concerne la régulation des régulateurs, voilà pourquoi l'utilisation de régulateurs flous, qui semblent difficiles à adapter, est moins complexe que les quatre régulateurs et donc le coût sera inférieur. Nous avons démontré par les résultats de simulation présentés que l'erreur statique est égal à zéro et que le temps de réponse est plus rapide. En intégrant les connaissances des experts de la Logique floue, nous obtenons une performance très satisfaisante sans la nécessité d'un modèle mathématique détaillée pour le système.

En effet, le régulateur flous a des capacités inhérentes à traiter des données imprécises ou brutes, sa capacité de contrôle est étendue aux techniques de contrôle linéaire des systèmes travaillant dans des conditions de fonctionnement particulières (exemple : variation paramétrique).

Tenant compte de ces avantages nous pouvons dire que cette méthode de contrôle ouvre des perspectives prometteuses et économiquement pas coûteuses d'où l'intérêt à généraliser et à améliorer cette technique.

Références bibliographique chapitre III

1. Datta, R. and V.T. Rangathan, 2002. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 17: 414-421. DOI: 10.1109/TEC.2002.801993
2. Abad, G., J. Lopez, M.A. Rodriguez, L. Marroyo and G. Iwanski, 2011. *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. 1st Edn., John Wiley & Sons, Hoboken, ISBN-10: 1118104951. pp: 704
3. Srikrishnan, A. and B.J. Rabi, 2012. Digital simulation, design, comparative analysis of intelligent controllers in adjustable speed drives for PQ enhancement. *Am. J. Applied Sci.*, 9: 83-88. DOI: 10.3844/ajassp.2012.83.88
4. Chowdhury, B.H. and S. Chellapilla, 2006. Double-fed induction generation control for variable speed wind power generation. *Electric Power Syst. Res.*, 76: 786-800. DOI: 10.1016/j.epsr.2005.10.013
5. Yao, J., H. Li, Z. Chen, X. Xia and X. Chen et al., 2013. Enhanced control of a dfig-based wind-power generation system with series grid-side converter under unbalanced grid voltage conditions. *Power Electronics, IEEE Trans.*, 28: 3167-3181.
6. Hu, J., J. Zhu, Y. Zhang, G. Platt and Q. Ma et al., 2013. Predictive direct virtual torque and power control of doubly fed induction generators for fast and smooth grid synchronization and flexible power regulation. *Power Electronics, IEEE Trans.*, 28: 3182-3194.
7. Tapia, A., G. Tapia, J.X. Ostolaza and J.R. Saenz, 2003. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. *IEEE Trans. Energy Conversion*.
8. Mohseni, M., S. Islam and M.A.S. Masoum, 2011. Enhanced hysteresisbased current regulators in vector control of dfig wind turbines. *Power Electronics, IEEE Trans.*, 26: 223-234.
9. Xin-fang, Z., X. Da-ping and L. Yi-bing, 2004. Predictive functional control of a doubly fed induction generator for variable speed wind turbines. *IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 2004.
10. Morren, J. and S.W.H. de Haan, 2005. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 20: 435-441. DOI: 10.1109/TEC.2005.845526
11. Guo, J., X. Cai and Y. Gong, 2008. Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed induction generator. *Proceedings of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, (DRPT'08)*, pp: 2620-2625.
12. Filho, A.J.S., M.E.D.O. Filho and E.R. Filho, 2011. A predictive power control for wind energy. *IEEE Trans. Sustainable Energy*, 2: 97-105.
13. Filho, A.J.S. and E.R. Filho, 2012. Model-based predictive control applied to the doubly-fed induction generator direct power control. *Sustainable Energy, IEEE Trans.*, 3: 398-406.
14. da Costa, J.P., H. Pinheiro, T. Degner and G. Arnold, 2011. Robust controller for dfigs of grid-connected wind turbines. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 58: 100-105.
15. Anais "Guignard Validation fonctionnelle de contrôleurs logiques : contribution au test de conformité et à l'analyse en boucle fermée" thèse de doctorat Automatique / Robotique École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2014. Français.
16. François Bonne « Modélisation et contrôle des grands réfrigérateurs cryogéniques » thèse de doctorat Automatique / Robotique. Université de Grenoble, 2014. Français
17. Hans Øverseth RØstØen, Tore M. Undeland, Trje Gjengedal, "Doubly fed induction generator in a wind turbine".
18. Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, "Simulink implementation of induction machine model – A modular approach", *IEEE2003*.
19. Ion Serban, Frede Blaabjerg, Ion Bodea, Zhe Chen "A Study of the Doubly-Fed Wind Power Generator Under Power System faults", *EPE 2003 – Toulouse*, ISBN : 90-75815-07-7.
20. A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza, J.J. Molina, J.R. Saenz, "Wind farm modeling and performance

- simulation ".
21. J.Rösner, H. p. Beck, C. Sourkourmis, " Wind Energy Converter with Asynchronous Machines and Three-Phase AC Controller in Generator Mode ", *ETEP* Vol. 10, No. 4, July/august 2000.
 22. J.R. Saenz, A. Tapia, X. Ostolaza, I. Albizu, F. Pérez-Hidalgo, M. Irizar, "Reactive Power Regulation in Wind Farms: control Strategies", *EPE 2001- Graz*.
 23. S.E. Ben Elghali, " Modélisation et Commande d'une Hydrolienne Equipée d'une Génératrice Asynchrone Double Alimentation " *JCGE'o8 LYON*, 16 et 17 décembre 2008.
 24. Armand Boyette, Shahrokh Saadate, " Éolienne avec génératrice à double alimentation et unité de stockage d'énergie pour production d'électricité ", *EPF juillet 2006 Grenoble (CD rom S7-2)*.
 25. Ph. Degobert, X. Guilaud et D. Loriol "Commande d'un onduleur de tension à laide d'un processeur de signal et un F.P.G.A ", *Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille (L2EP) Groupe E.N.S.AM*.
 26. Cordón, O. , *A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems, International Journal of Approximate Reasoning, Volume 52, Issue 6, September 2011, Pages 894-913*
 27. Armand Boyette, Philips and SharokhSaadat: *direct and Indirect control of a doubly Fed Induction Generator Wind Turbine Including a storage unit, IECON'o6, Paris (CD ROM ISBN 1-4544-0136-4). November, 2006.*
 28. L. A Zadeh,. *Fuzzy sets as a basis for a theory of a possibility, Fuzzy Sets and Systems , vol.1,1978, pp. 2-28.*
 29. L. A. Zadeh, *Calculus of fuzzy restrictions, in L. A. Zadeh, K.-S. Fu, K. Tanaka & M. Shimura (eds), Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes, Academic Press, New York, 1975, pp. 1-39. [*
 30. L. A. Zadeh, *A theory of approximate reasoning, Machine Intelligence, John Wiley & Sons, New York, 1979, pp. 149-194.*
 31. A.Al Nabulsi, R.Dhaouadi, *Efficiency Optimization of a DSP-Based StandalonePV System UsingFuzzy Logic and Dual-MPPT Control, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 8, no.3, 2012, pp.573-584*
 32. M.Jeet. Kaur, M. Uddin, H. K. Verma, *Analysis of Decision Making Operation in Cognitive radio using Fuzzy Logic System, International Journal of Computer Applications, vol. 4, no.10, 2010, pp.35-39.*
 33. M.Farhat, O.Barambones, L.Sbita, *Efficiency Optimization of a DSP-Based Standalone PV System using a stable single input Fuzzy Logic controller, Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 49, 2015, pp. 907-920*
 34. L.D. cluckie, A.Moghaddamnia, D. Han, *Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological delovelments in water application,Using an adaptive neuro-fuzzy nterference system in the development of a real-time expert systel for flood forecasting, 2008 Speinger publisher, chapter.*

Chapitre IV Techniques du contrôle de la tension du bus continu

Dans cette partie, nous évaluons une topologie d'un redresseur à modulation de largeur d'impulsion *MLI* commandé en sortie, alimentant l'onduleur triphasé associé à une génératrice asynchrone à double alimentation (*GADA*) d'une chaîne de conversion éolienne, afin d'améliorer la qualité d'énergie et assurer la participation maximale de l'éolienne aux services systèmes. Les résultats des différentes simulations de toute la chaîne de conversion, réalisé sous l'environnement MATLAB/Simulink, ont permis de comparer les performances de la commande proposée.

Dans ce papier on va évaluer une topologie de configuration du bus continu. L'effet de l'alimentation à l'entrée de l'onduleur (bus continu) sur les performances du contrôle des puissances de la chaîne de production.

1. Description du système éolien à évaluer

Le système éolien dont le schéma du principe est présenté en figure 51 a fait l'objet de notre étude. Il comprend *GADA*, une turbine, qui via un multiplicateur, entraîne la *GADA*, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator où elle est également connectée au travers de convertisseurs statiques triphasés au système bagues/balais du rotor de la machine.

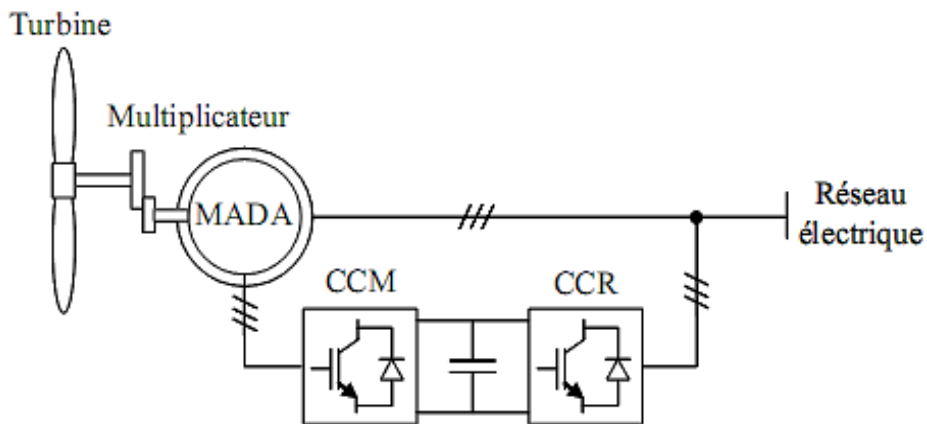


Figure 51. Système éolien à vitesse variable.

Ce système fonctionne à vitesse variable en hypo et hyper synchrone [1]. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor[2].

2. MODELISATION DE LA GADA

Le modèle sera établi de même manière que celui de la machine asynchrone à cage sauf que les tensions rotorique seront non nulles [3]. Dans un repère biphasé, les équations des tensions et des flux, de la génératrice s'écrivent comme suit [4].

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \dot{\theta}_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \dot{\theta}_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \dot{\theta}_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rq} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rd} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

Où,

$$L_s = I_s - M_s; L_r = I_r - M_r; M = 3/2 M_{sr} \quad (3)$$

Et, l'équation mécanique et celle du couple de la machine sont données respectivement par les expressions suivantes :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \cdot \Omega \quad (4)$$

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rq} \phi_{sd} - I_{rd} \phi_{sq}) \quad (5)$$

En considérant que :

$$\phi_{sd} = \phi_s \quad \text{et} \quad \phi_{sq} = 0 \quad (6)$$

L'expression du couple (5) devient :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} I_{rq} \phi_{sd} \quad (7)$$

Et de l'équation (2), on déduit :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rq} \\ 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (8)$$

Par ailleurs, en supposant que ϕ_s est constant, on déduit selon (7) que le couple électromagnétique C_{em} est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature (I_{rq}). De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques [5], les équations des tensions statoriques (4) de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (9)$$

ω_s : pulsation électrique des gradateurs statoriques.

D'où, pour un flux statorique constant, on déduit de (9) que :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (10)$$

De (8), on déduit :

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (11)$$

Les puissances actives et réactives statoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q = V_{sq} I_{sd} + V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (12)$$

Sachant de (10) que $V_{sd} = 0$, l'expression (12) se simplifie à forme suivante :

$$\begin{cases} P = V_s I_{sq} \\ Q = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (13)$$

En substituant les expressions (10) des composants courants statoriques dans (13), on obtient :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ Q = V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} + V_s \frac{\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (14)$$

A partir de (9) et (10), on détermine l'expression suivante :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (15)$$

L'expression des puissances (13) peut alors réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (16)$$

Si, l'on considère l'inductance magnétique (M) constante, on remarque de (16) que la puissance active statorique (P) est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature I_{rq} , à un constant pré $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ [6].

Cependant, pour assurer un contrôle correct de la machine, on doit établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques à appliqués à la machine [7]. À cet effet, on remplace d'abord dans l'équation (5) les courants statoriques par l'expression (11). On obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = (L_r - M^2)I_{rd} + \frac{MV_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s})I_{rd} \end{cases} \quad (17)$$

Puis, les expressions des flux rotoriques obtenues précédemment par leurs expressions dans l'équation (3), on obtient, alors:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + (L_r - M^2) \frac{dI_{rd}}{dt} - \\ \quad g \omega_s (L_r - M^2) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{dI_{rq}}{dt} + \\ \quad g \omega_s (L_r - M^2) I_{rq} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (18)$$

Où, g est le glissement de la machine asynchrone.

3. Simulations Et Discussions

Pour procéder à la simulation du system d'alimentation du bus continu nous considérons trois cas d'alimentation que nous exposons dans ce qui suit

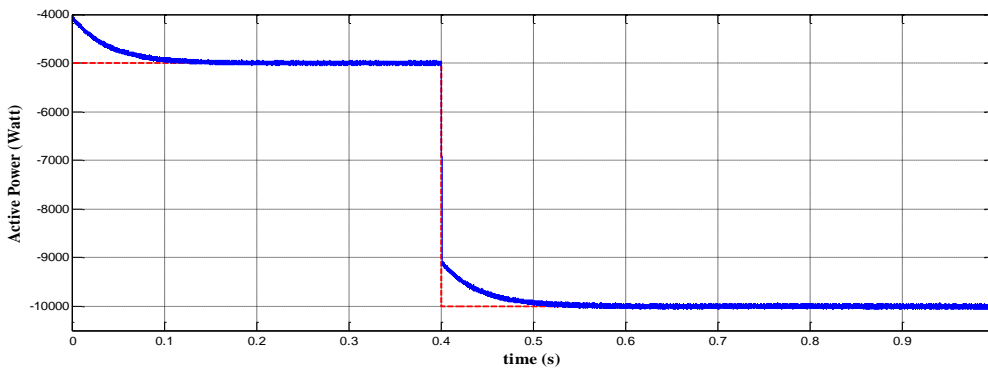
3.1. Cas Idéal

On considère la tension du bus continu comme étant parfaitement continu et invariable dans le temps. On l'applique à l'entrée du variateur de vitesse (onduleur de tension) pour alimenter la génératrice coté rotor (figure 51).

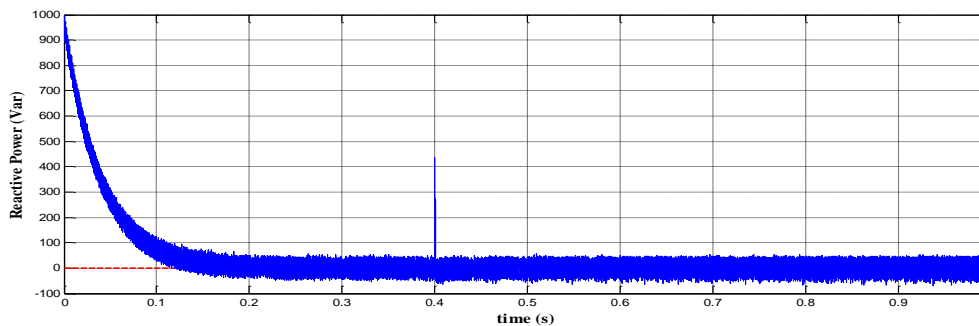
Les résultats de la simulation sont les suivants (figure.52.a.b.c.d)

On remarque que la variation de la puissance active, n'influe pas sur la puissance réactive qui reste nulle.

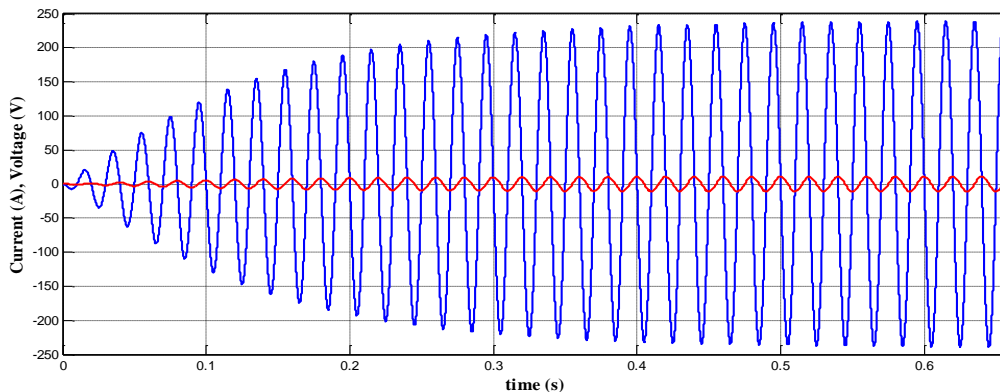
(a)



(b)



(c)



(d)

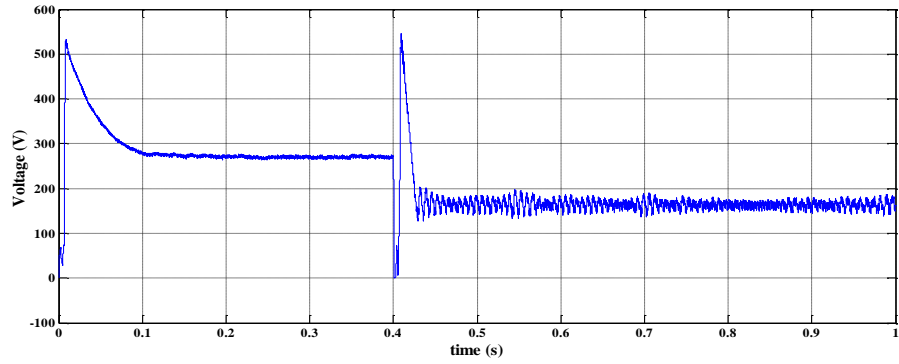
Figure 52. Tension bus continu(a), puissance active (b), puissance réactive (c), courant (rouge) et tension statorique (bleu) dans la phase A (d).

3.2. Cas d'un convertisseur non commandé

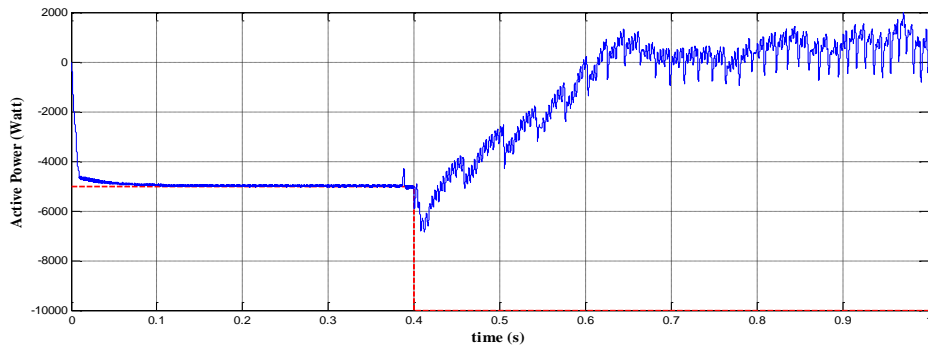
Cette fois, on considère un redresseur non commandé alimenté par le réseau et qui permet l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs donnant une tension continue à l'entrée de l'onduleur qui alimente le rotor de la GADA.

Les résultats de la simulation sont les suivants (figure.53.a.b.c.d)

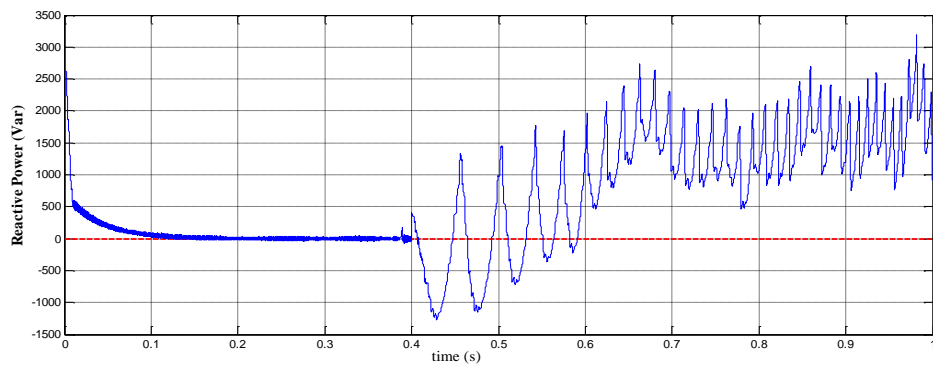
Dans ce cas, on remarque d'abord que la tension d'alimentation présente une allure oscillatoire. En plus, si la puissance active varie, le découplage entre a puissance active et réactive devient difficile à maintenir (leurs références ne seront plus maintenues).



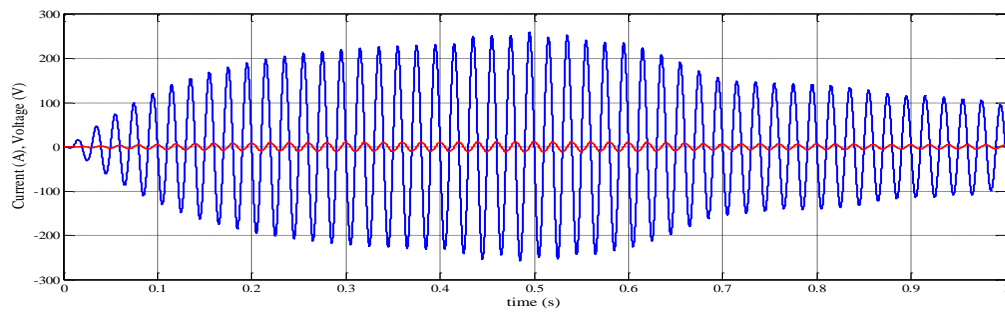
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 53. Tension bus continu(a), puissance active (b), puissance réactive (c), courant (rouge) et tension statorique (bleu) dans la phase A (d).

3.3. Cas d'un redresseur commande en MLI

Nous allons commander les six interrupteurs par une commande MLI synchronisée sur les tensions du réseau [8]. À partir des trois tensions, nous obtenons trois sinusoïdes qui vont nous servir de références. Partant de ces trois références, nous pouvons les moduler avec un signal triangulaire à haute fréquence afin d'établir les ordres de commande des interrupteurs.

De cette manière, les interrupteurs sont commandés afin que le courant dans chaque phase suive l'évolution du fondamental de la tension. Sur chaque bras de l'onduleur, un interrupteur permet de faire croître le courant et l'autre permet de le diminuer. La modulation des sinusoïdes de références permet de garder les courants dans des enveloppes sinusoïdales.

Afin de régler la valeur moyenne de la tension continue, on fait varier l'amplitude du signal modulant ce qui fait varier l'indice de modulation m [9], défini par :

$$m = \frac{\text{amplitude sinus}}{\text{amplitude triangle}} \quad (19)$$

Et, les tensions sont exprimées alors par :

$$U_{dc} = \frac{\sqrt{2}V_{eff}}{m} \quad (20)$$

Comme l'indice de modulation est inférieur à 1 afin que le signal triangulaire puisse couper le signal sinusoïdal, nous avons appliqué grâce à un redresseur élévateur de tension une tension continue supérieure à la tension simple maximale $\sqrt{2}V_{eff}$. Pour la commande du redresseur, ces tensions de référence sont comparées avec un signal de modulation triangulaire haute fréquence permettant de générer les signaux de commande MLI des différents interrupteurs. La valeur de la tension du bus continu est contrôlée grâce à l'amplitude du signal modulant. Cette amplitude est établie à travers un régulateur PI en fonction de l'erreur entre la valeur de consigne de la tension continue et sa valeur mesurée aux bornes de la capacité connectée au redresseur.

Le schéma block de la figure 54, résume le principe de commande d'un tel redresseur.

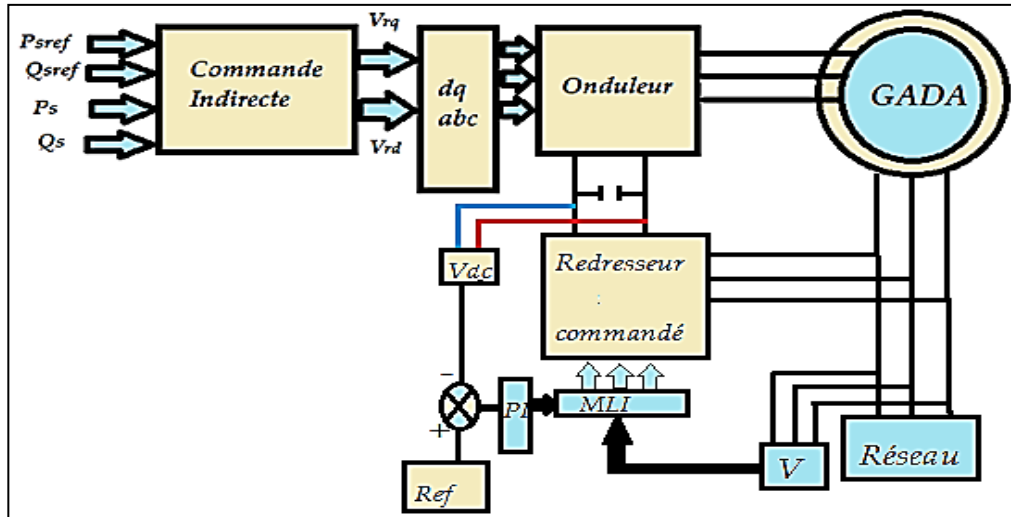


Figure 54. Schéma bloc d'un redresseur MLI intégré dans un système éolien.

Pour s'assurer de la constance de la tension redressée à l'entrée de l'onduleur on prévoit une boucle comprenant un capteur de tension, un régulateur PI auquel on impose une valeur de consigne [9].

Comme résultat de la simulation on constate que la tension ainsi que les puissances active et réactive suivent parfaitement les valeurs de consignes respectives (figure 55).

Aussi, es puissances active et réactive suivent parfaitement leurs valeurs de consignes respectives.

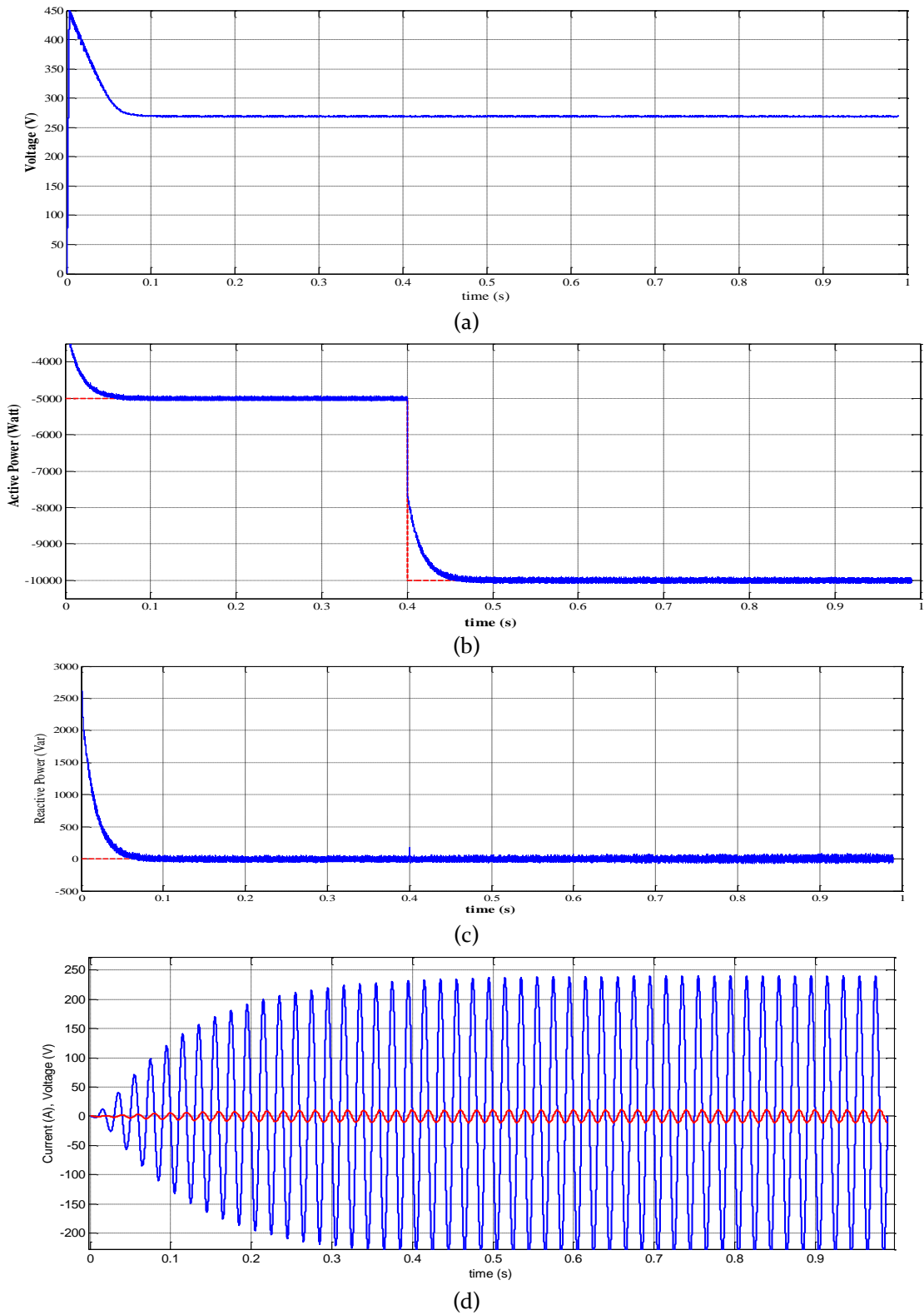


Figure 55. Tension (a), puissance active (b), puissance réactive (c), courant (rouge) et tension statorique (bleu) dans la phase A (d).

Conclusion

A l'issue de ces expériences nous avons considéré trois cas d'alimentation, une tension idéale continue, un deuxième à la sortie d'un redresseur non commandé et finalement la dernière à la sortie d'un redresseur commandé à la tension où la tension sortie est assurée grâce à une valeur de référence. On remarque que le dernier cas donne les performances désirées, par contre, pour un redresseur non commandé les performances se dégradent avec la perte de découplage des puissances active et réactive. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés.

Références bibliographique chapitre IV

1. T. Tafticht, K. Agbossou and A. Chériti " DC Bus Control of Variable Speed Wind Turbine Using a Buck-Boost Converter "2006 IEEE.
2. D. Q Dang, Y. Wang, and W. Cai, " A Multi-objective Optimal Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbine ", 2009 IEEE International Conference on Control and Automation Christchurch, New Zealand, December 9-11, 2009.
3. Janaka B. Elkanayake, Lee Holdsworth, XueGuang Wu, and Nicholas Jenkins, " Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, NO. 2, May 2003.
4. J. Morren¹, S.W.h. of Haan¹, P. Bauer¹, J.T.G. Pierik², J. Bozelie³), "Comparison of Complete and Reduced Models of a wind turbine with Doubly-Fed Induction Generator", Toulouse, ISBN: 90-75815-07-7. FIE 2003.
5. T.Mesbahi, T. Ghennam, E.M.Berkouk, M.Meradji, A.Benidder "Modeling and Control of a Stand-Alone Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Based Wind Energy Conversion System", Ecological vehicles and renewable energies international conference and exhibition , Ever Monaco 2011.
6. F. Poitiers "Control of a doubly fed induction generator for wind energy conversion systems", (POWERENG 2009 GE44-LARGE, Saint Nazaire, France.
7. T. Bahi, A. Dekhane, H. Merabet, Y. Soufi, " Modeling and control of a doubly fed induction generator ", Ecological vehicles and renewable energies international conference and exhibition , Ever Monaco 2011.
8. D. D. Banham-Hall, G. A. Taylor, C. A. Smith, M. R. Irving, "Grid Connection Oriented Modelling of Wind Turbines with Full Converters", '2009 IEEE.
9. A. GaillardA "system based on wind DFIM: contribution to the study of electric power quality and continuity of service " , Ph.D. dissertation, University of Henri Poincaré Nancy-I: 2010.

Conclusion Générale

L'objectif principal de cette thèse est l'étude d'une chaîne éolienne de conversion de l'énergie à axe horizontale basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation et la maîtrise du contrôle des paramètres.

On a commencé l'étude par la présentation du développement et de l'exploitation des différentes formes des énergies renouvelables.

Notre recherche a permis de réaliser une étude complète d'une chaîne de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne. On a passé en revue les différentes technologies utilisées dans la génération éolienne et leurs capacités d'influencer sur les réseaux.

Pour la partie mécanique, on a fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de la turbine.

A l'issue de notre investigation, on a conclu, que les chaînes éoliennes sont généralement dotées de génératrices asynchrones. Ces dernières présentent le composant principale de la chaîne, pour lequel nous avons fait une étude comparative du contrôle indépendant des puissances actives et réactives par les deux modes de commande directe et indirecte. La simulation de la chaîne entière est présentée avec le maintien du l'MPPT.

Les résultats de simulations illustrés dans les divers chapitres, confirment le choix des modèles retenus et la validité des résultats obtenus.

Étant donné, l'actualité du sujet et l'importance de développement technologique dans le domaine de l'éolien, nous avons apporté une contribution modeste en ce qui concerne la commande de la GADA en élargissant le domaine de la recherche et les solutions pratiques à la maîtrise du fonctionnement de ces systèmes.

Annexe A (Notations)

$[V_s], [V_r]$: Vecteur de tension respectivement du stator et rotor
$[I_s], [I_r]$: Vecteur de courant respectivement du stator et rotor
$[\Phi_s], [\Phi_r]$: Vecteur de flux respectivement du stator et rotor
R_s, R_r : Matrice de la résistance respectivement statorique et rotorique
J_t : Inertie totale ramenée à l'arbre du moteur
Ω : Vitesse de rotation de la machine
I : Vecteur courant de la machine
f_v : Couple de frottement visqueux
C_{em}, T_{em} : Couple électromagnétique respectivement de la MARB et de la GADA
C_r : Couple résistant appliqué à la machine
θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator
L_{ss} : Matrice spécifique au stator
L_{rr} : Matrice spécifique au rotor
L_s : Inductance propre d'un enroulement statorique
M_s : Inductance mutuelle entre deux enroulements statoriques
L_r : Inductance propre d'un enroulement rotorique
M_r : Inductance mutuelle entre deux enroulements rotoriques
L_{sr} : Inductance mutuelle entre l'enroulement statorique et rotorique
p : Nombre de paire de pole de la machine asynchrone
R_o : Valeur de la résistance R à la température ambiante $T_o = 25^\circ\text{C}$
α : Coefficient de température de la résistance
ΔT : Variation de la température
P_{res} : Puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau
P_s : Puissance transitant par le stator
P_r : Puissance transitant par le rotor
P_{Mec} : Puissance mécanique
$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$: Courant statorique sur les phases alpha et beta de la génératrice
$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$: Courant rotorique sur les phases alpha et beta de la génératrice
$u_{\alpha s}, u_{\beta s}$: Tensions statoriques sur les phases alpha et beta de la GADA
$u_{\alpha r}, u_{\beta r}$: Tensions rotoriques sur les phases alpha et beta de la GADA
ω_m : Vitesse de rotation de la GADA

Liste des abréviations et acronymes

MARB :	Moteur Asynchrone à Rotor Bobiné
MACE :	Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil
MADA :	Machine Asynchrone Doublement Alimenté
GADA :	Génératrice Asynchrone Doublement Alimenté

Paramètres de la turbine :

$R=44$	Rayant des pales
$C_1=0.5176$	Coefficient pour calcul de C_p
$C_2=116$	
$C_3=0.4$	
$C_4=5$	
$C_5=21$	
$C_6=0.0068$	
$f=0.0007$	Coefficient de frottements visqueux
$J=50$	Inertie totale des parties tournantes
$G=42$	Rapport de multiplication

Paramètres de la GADA :

$V_s=230;$	<i>Tension efficace</i>
$R_s = 0.455;$	<i>Résistance rotorique</i>
$L_s = 0.07;$	<i>Inductance statorique</i>
$R_r = 0.19;$	<i>Résistance statorique</i>
$L_r = 0.0213;$	<i>Inductance rotorique</i>
$M = 0.034;$	<i>La mutuel</i>
$f = 50;$	<i>La fréquence</i>
$p=2;$	<i>Nombres de paires de pôles</i>
$\omega_s=2 \cdot \pi \cdot f;$	<i>Vitesse statorique</i>

Paramètres des régulateurs :

<i>Pour la commande directe</i>	
$k_p = 0.5$	
$k_i = 0.2$	
<i>Pour la commande indirecte sans boucle de puissance</i>	
$k_p = 10$	
$k_i = 10$	
<i>Pour la commande indirecte avec boucle de puissance</i>	
Puissance	$k_p = 1$
	$k_i = 125$
Courant	$k_p = 7.32$
	$k_i = 10$

Caractéristiques des sites et stations :

N°	Nom	V (m/s)
1	Adrar *	5.9
2	Alger	3.2
3	Annaba *	2.4
4	Batna *	4.2
5	Béchar *	3.6
6	Béjaia *	4.2
7	Beni Abbès	1.7
8	Ben Saf *	2.8
9	Biskra *	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	3.4
11	Chlef	2.8
12	Constantine	2.6
13	Djanet	2.3
14	Djelfa	2.7
15	El Bayadh	3.9
16	El Goléa	3.0
17	El Kheiter *	4.6
18	El Oued	3.7
19	Ghardaïa *	4.6
20	Guelma	1.8
21	Hassi Massoud *	4.1
22	In Amenas	4.3
23	In Oussera	3.0
24	In Salah	4.4
25	In Sefra	3.0
26	Ksar El Chellala	3.4
27	Maghnia *	2.7
28	Mascara	2.4
29	Mechria	3.8
30	Miliana	2.6
31	Mostaganem *	1.0
32	M'Sila *	4.1
33	Oran	4.1
34	Oum El Bouaghi	2.1
35	Saida *	2.6
36	Sétif	3.1
37	Skikda	2.9
38	Tamanrasset *	2.9
39	Tébessa	2.8
40	Tiaret	4.7
41	Timimoune *	5.1
42	Tindouf *	4.6
43	Tlemcen	2.3
44	Touggourt *	3.3

Annexe B

Travaux Réalisés :

Communications Internationales

1. First international conference on renewable Energies and Vehicular Technologies 2012, Hammamet, Tunisia. «DFIG Modeling and Control in a Wind Energy Conversion System» **A. Dekhane**, S. Lekhchine, T. Bahi, S. Ghoudelbourg , H. Merabet.
2. Ecological vehicles and renewable energies international conference and exhibition , Ever Monaco 2011«Modeling and control of a doubly fed induction generator »
T. Bahi, **A. Dekhane**, H. Merabet, Y. Soufi.
3. International Conference On Mechanical Engineering. « Commande du Bus Continu d'un Entraînement à Vitesse Variable ». S. Lekhchine, T. Bahi , Y. Soufi , **A. Dekhane** , A. Metatla.
4. Terragreen12 International Conference, Beirut-Lebanon. « control of Energy By the technical Hysterisis fixed band ». Y. Soufi, S. Lekhchine, T. Bahi, **A. Dekhane**, S. Ghoudelbourk.
5. 3rd International Science Technology and Engineering Conference (ISTE-C 2012) December 13-15, Dubai, UAE. «Converters Control of Wind Turbine Chain Based on Doubly Fed Induction Generator» **A. Dekhane**, A. Abderrezak.
6. 4th International Renewable Energy Congress (IREC)December 20-22 Sousse, Tunisia. «Wind Turbine Powers Control Using Fuzzy Logic Controllers »
A. Dekhane, A. Abderrezak.
7. 1st International Conference on. Electrical Energy and Systems. ICEES'13. October 22-24, 2013, Annaba, Algeria «Study and Control of the DC Bus Effect For Adjusting Wind Turbine Power » **Dekhane**, A. Abderrezak.
8. 4ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER-2014) Monastir Tunisie 20 Décembre 2014«Comparative studies between wind turbine active/reactive power». **Dekhane**, A. Abderrezak.

Communications Nationales

1. Journée d'étude sur la sécurité industrielle, « JESI 2011 ». « Etude sur le bruit et la Nuisance d'une Eolienne ». **A. Dekhane**, S. Lekhchine, T. Bahi
2. Journée d'étude sur la sécurité industrielle, « JESI 2011 ».« Commande de l'Eolien pour pallier aux nuisances ».S. Lekhchine , **A. Dekhane**, T. Bahi
3. 2ème Conférence Nationale sur les Systèmes d'Ordre Fractionnaire et leurs Application« Analyse de la qualité de l'énergie délivrée par une éolienne au réseau ».S. Ghoudelbourk, T. Bahi. S. Lekhchine. **A. Dekhane**

4. 1ère Journée sur les signaux et Systèmes JSS'12 « Modélisation et Contrôle d'une Génératrice Asynchrone ». **A. Dekhane**, T. Bahi, H. Merabet et s. Ghodelbourk
5. Seminaire national sur la securite industrielle SNSIND'12 «Impact des nuisances indutrielle sur l'environement et l'opérateur» S. Lekhchine, **A. Dekhane**, T. Bahi, Y. Soufi.

Publications

1. Y. Soufi, S. Lekhchine, T. Bahi, **A. Dekhane**, S. Ghodelbourk « Control of Energy by the Technical Hysteresis fixed band», Energy Procedia, Volume 18, 2012, Pages 458-467
2. **Azzeddine Dekhane** and Abdallah Abderrezak «Deadbeat Current Digital Controller For Decoupled Power Control Of Doubly Fed Induction Generators». American Journal Of Applied Sciences, AM. J. APPLIED SCI., 11: 1065-1078.
3. **Azzeddine Dekhane, Abdallah Abderrezak**« Comparative Studies on Wind Turbine Active/Reactive Power Control », Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho, Volume 5, 2017.