

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES
- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيات
الصناعية - عنابة -

ESIGELEC
irseem

Année / 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIÈRE

ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Commande d'une éolienne à base de la MADA pour éliminer le déséquilibre dans les réseaux électriques

Spécialité

Production Electrique et Energie Renouvelables

Par

Oussama MALAOU

Sous la direction de :

Yacine AZZOUZ

Hamza AFGHOUL

Grade

Enseignant chercheur

MCB

Établissement d'affiliation

ESIGELEC Rouen

ESTI Annaba

Devant le jury

Président :

Examineurs :

Remerciements

Mes sincères remerciements à Allah le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la volonté, et le courage pour concrétiser mon travail.

Dans le cadre de ce mémoire, le travail effectué a été une expérience intellectuellement épanouissante et humainement exaltante. Rien de cela n'aurait été possible sans ceux qui m'ont donné cette opportunité, ceux qui ont partagé avec moi leur savoir, qui m'ont soutenu dans mes efforts, et qui m'ont permis d'éviter les difficultés par leurs bons conseils.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein de l'Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués IRSEEM, laboratoire de recherche de l'École Supérieure d'Ingénieurs en Génie Electrique ESIGELEC. De ce fait j'exprime mes sincères remerciements à M. Moncef KADI, Responsable du pôle Electronique et Systèmes, pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire pendant les six mois du stage, financée par l'Ecole supérieure de technologies Industrielles Annaba ESTI, et l'ESIGELEC que je tiens également à les remercier tous. J'adresse aussi mes remerciements à M. Salah Eddine AZZOUZ Président du comité scientifique du département du second cycle à l'ESTI, Pour son soutien et ces conseils.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon encadreur M. Yacine AZZOUZ, Enseignant Chercheur de l'ESIGELEC, pour son encadrement, sa patience, ses judicieux conseils, et ces qualités humaines. J'ai beaucoup appris en travaillant avec lui.

J'adresse également mes remerciements à mon encadreur M. Hamza AFGHOUL, Enseignant chercheur à l'ESTI, et Mme Léa RIACHY, Ingénieure de recherche à l'ESIGELEC, pour le temps qu'ils ont consacré à m'aider, me conseiller et partager avec moi leur connaissances et expériences.

Je tiens à remercier le jury pour le temps consacré à lire et évaluer mon travail. Je vous remercie vivement pour l'honneur que vous me faites en siégeant à ce jury.

Dédicaces

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance envers mes très chers parents, à celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espairs, à la source d'amour incessible, à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ces prières ma mère. À mon support dans ma vie, qui m'a appris, m'a supporté et ma dirigé vers la gloire mon père. Merci mes très chers parents pour votre amour, tendresse, confiances, soutiens constants, encouragements, et sacrifices pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse réussir et devenir ce que je suis aujourd'hui.

Je remercie mes chères sœurs, mon cher frère et la personne qui a été à mes côtés tout le temps, pour leurs encouragements permanents, leurs appuis, leur soutien moral, et leur aide précieuse. Aucun mot peut exprimer la gratitude, le respect, la reconnaissance et tout l'amour que j'ai pour vous.

À mes chers petits neveux, votre joie et votre gaité me comblent de bonheur, je vous aime énormément.

À mes deux meilleurs amis, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Puisse Allah, le Très Haut, vous protège tous, vous garde et vous accorder de la santé, je vous souhaite une merveilleuse vie pleine de bonheur et de succès.

Je vous aime tous.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire, consiste à l'étude d'un système de production d'énergie éolienne, basé sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA), vis à vis l'injection de la puissance maximale disponible tout en assurant l'élimination du déséquilibre au réseau électrique. De ce fait la commande vectorielle basé sur la théorie pq a été utilisée afin de modéliser notre MADA, et le convertisseur DC/AC qui permet l'injection des puissances du côté rotorique. Pour l'extraction de la puissance maximale du vent, la stratégie MPPT a été introduite.

Les correcteurs PI ont assurés le contrôle du bus continu, des convertisseurs du côté machine et côté réseau, en premier lieu on a utilisé un onduleur MLI à deux niveaux, mais les limites de cet onduleur à faire le suivi lors des changements brusque des paramètres, nous a exigé l'introduction de l'onduleur NPC à trois niveaux qui est plus performant et qui réponds à nous exigence.

Une introduction à la commande prédictive a été développée sans être appliquée à notre convertisseur NPC. Les résultats obtenus affirment la robustesse et la performance de notre système éolien à éliminer le déséquilibre dans le réseau dans plusieurs cas de changement brusque des paramètres. De plus, le convertisseur NPC il a pu assurer un meilleur suivi des références, en minimisent l'erreur, et le dépassement.

Mots Clés : Energie éolienne, Déséquilibre du réseau électrique, MADA, Onduleur à deux niveaux, NPC à trois niveaux, Commande MLI, Commande Vectorielle, Théorie pq , Commande MPPT, Commande Prédictive.

Abstract

The work presented in this dissertation, consists in the study of a wind power production system, based on a doubly fed induction generator (DFIG), with respect to the injection of the maximum power available while ensuring the elimination of the imbalance in the electricity network. Therefore vector control based on the pq theory was used to model our DFIG, and the DC / AC converter which allows the injection of powers on the rotor side. For the extraction of the maximum wind power, the MPPT strategy was introduced.

The PI correctors ensured the control of the DC bus, the converters on the machine side and the network side, in the first place we used a two-level PWM inverter, but the limits of this inverter to follow up during sudden changes in parameters, required us the introduction of the three levels NPC inverter which is more efficient and which meet our requirements.

An introduction to predictive control has been developed without being applied to our NPC converter. The results obtained confirm the robustness and performance of our wind system in eliminating the imbalance in the network in several cases of sudden change of parameters. In addition, the NPC converter was able to ensure better reference tracking, minimize error, and overshoot.

Keywords : Wind energy, Grid imbalance, DFIG, Two-levels inverter, Three levels NPC, PWM control, Vector control, Theory pq, MPPT control, Predictive control.

Table des matières

Remerciements	1
Dédicaces	1
Résumé	1
Abstract	1
Introduction Générale	1
1 Généralités sur l'énergie éolienne	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités	4
1.3 Principaux types d'éoliennes	5
1.3.1 Éoliennes à axe vertical	5
1.3.2 Éoliennes à axe horizontal	7
1.4 Composants des éoliennes	8
1.5 Différentes technologies d'éoliennes	10
1.5.1 Éolienne à vitesse fixe	11
1.5.2 Éolienne à vitesse variable	11
1.6 Conditions de raccordement des éoliennes au réseau	14
1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	14
1.8 Capacité des éoliennes installées	16
1.9 Déséquilibre du réseau	19
1.10 Régulation de la tension dans le réseau électrique	19
1.11 Conclusion	20
2 Conversion de l'énergie éolienne	21
2.1 Introduction	21
2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	21
2.3 Modélisation de la turbine	24
2.4 Modélisation du multiplicateur de vitesse	26
2.5 Modélisation de l'arbre mécanique	26
2.6 Stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse	27

2.7	Structure de la MADA	29
2.7.1	Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	29
2.7.2	Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer	29
2.7.3	Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scher- bius avec cycloconvertisseur	30
2.7.4	Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scher- bius avec convertisseurs MLI	30
2.8	Modes de fonctionnement de la MADA	31
2.8.1	Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	31
2.8.2	Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	31
2.8.3	Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone	31
2.8.4	Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone	32
2.8.5	Avantages des éoliennes à base de la MADA	32
2.9	Modélisation de la MADA	32
2.10	Commande vectorielle de la MADA	34
2.11	Modélisation du convertisseur côté réseau, du filtre et du réseau	37
2.12	Modélisation du convertisseur côté machine et du bus continu	38
2.13	Convertisseur DC/AC Onduleur à deux niveaux	40
2.14	Commande MLI appliqué à un onduleur triphasé a deux niveaux	42
2.15	Calcul des puissances nécessaires à la compensation du déséquilibre dans le réseau	44
2.16	Conclusion	44
3	Le contrôle des convertisseurs et du bus continu	45
3.1	Introduction	45
3.2	Contrôle du convertisseur côté machine	45
3.3	Contrôle du convertisseur côté réseau	46
3.4	Synthèse du correcteur PI	48
3.4.1	Synthèse des correcteurs pour la commande des courants du CCM	49
3.4.2	Synthèse des correcteurs pour la commande des courants du CCR	51
3.5	Simulation	51
3.5.1	Elimination du déséquilibre à l'aide de notre éolienne pour une charge faiblement déséquilibré	53
3.5.2	Elimination du déséquilibre avec un changement brusque de la charge	56
3.5.3	Elimination du déséquilibre avec un changement brusque de la vitesse du vent	58
3.5.4	Elimination du déséquilibre avec un changement brusque de l'angle des pales β	60
3.5.5	Elimination du déséquilibre pour une charge fortement déséquilibré	62
3.5.6	Efficacité de la MPPT	63
3.6	Conclusion	67

Conclusion Générale	68
A TRANSFORMATIONS DES SYSTÈMES TRIPHASÉS	i
Références	i

Table des figures

1.1 Éolienne Savonius	6
1.2 Éolienne Darrieus	6
1.3 Éolienne multipales	7
1.4 Éolienne tripales	7
1.5 Schéma représentative des composantes d'une éolienne raccordé au réseau	10
1.6 Éolienne à vitesse fixe	11
1.7 Éolienne à vitesse variable type 1	12
1.8 Éolienne à vitesse variable type 2	12
1.9 Éolienne à vitesse variable type 3	13
1.10 Caractéristique des éoliennes à vitesses variables en fonction de la vitesse du vent	13
1.11 La capacité des éoliennes cumulées installées dans le monde	17
1.12 La capacité des éoliennes annuelles installées dans le monde	17
1.13 La puissance totale installé des éoliennes dans les dix premiers pays au monde	17
1.14 La nouvelle puissance installée des éoliennes dans les dix premiers pays au monde	18
2.1 Schéma fonctionnel du système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	22
2.2 Tube de courant autour d'une éolienne	22
2.3 Courbes caractéristiques de la puissance d'une éolienne par rapport à la vitesse du vent	24
2.4 Schéma d'une turbine éolienne	24
2.5 Courbe du coefficient de performance en fonction de la vitesse et de l'angle β	25
2.6 Schéma fonctionnel de l'arbre mécanique	27
2.7 Courbe de puissance d'une éolienne pour différents vitesse du vent	27
2.8 Schéma bloc de la stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse	28
2.9 MADA à énergie rotorique dissipée	29
2.10 Structure Kramer	30
2.11 Structure Scherbius avec cycloconvertisseur	30
2.12 Structure Scherbius avec convertisseur MLI	31

2.13 Bilan de puissance de la MADA dans les différents modes de fonctionnement	32
2.14 Les enroulements statoriques et rotoriques de la MADA	33
2.15 Circuit équivalent d'un enroulement statorique et rotorique	33
2.16 Modèle du convertisseur coté réseau, filtre et le réseau	37
2.17 Modèle équivalent d'une phase	38
2.18 Modèle du convertisseur coté machine	39
2.19 Modèle du bus continu	39
2.20 Schéma d'un onduleur triphasé à deux niveaux	41
2.21 Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux	41
2.22 Principe de la commande MLI et les tensions de sortie du convertisseur	43
3.1 Schéma de commande du convertisseur coté réseau	46
3.2 Schéma de commande du convertisseur coté machine	48
3.3 Schéma bloc d'un régulateur PI	48
3.4 Schéma simplifié de la régulation des courants rotoriques	50
3.5 Schéma simplifié de la régulation des courants du convertisseur coté réseau	51
3.6 Schéma du système éolien raccordé au réseau	52
3.7 Courbes des courants de source et de charge	53
3.8 Courbes des courants statoriques et rotoriques	54
3.9 Courbes des vitesses angulaires mécaniques et rotoriques	54
3.10 Courbes des puissances actives statorique, rotorique et de la puissance apparente	55
3.11 Courbes du suivi du courant de sortie de l'onduleur et de la tension de sortie du bus continu	55
3.12 Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors	56
3.13 Courbes des courants de charge et de source	56
3.14 Courbes des courants rotoriques, de la puissance apparente	57
3.15 Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors	57
3.16 Courbes de la vitesse du vent et des courants de source	58
3.17 Courbes des courants statoriques et des courants rotoriques	58
3.18 Courbes des vitesses angulaires mécanique et rotorique	59
3.19 Courbes des suivies du courant de sortie de l'onduleur	59
3.20 Courbes de la puissance apparente et de la puissance active rotorique	59
3.21 Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors	60
3.22 Courbes du changement de l'angle des pales et des courants de source	61
3.23 Courbes des courants statoriques et rotoriques	61
3.24 Courbes des vitesses angulaires mécanique et rotorique	61
3.25 Courbes des puissances active rotorique et apparente	62
3.26 Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors	62
3.27 Courbes des courants de charge et de source	63
3.28 Courbe du C_p pour une vitesse de vent constante	63
3.29 Erreur du C_p	64

3.30 Courbe du C_p pour un changement de vitesse avec un step	64
3.31 Erreur du C_p	64
3.32 Profil réel du vent	65
3.33 Courbe du C_p pour un profil réel du vent	65
3.34 Erreur du C_p	65
3.35 Courbes des courants statoriques injectés au réseau	66
3.36 Courbes des courants de sortie de l'onduleur injectés au réseau	66
A.1 Représentation du vecteur $\vec{x}$ dans le repère (abc)	ii
A.2 Représentation du vecteur $\vec{x}$ dans le repère ($\alpha\beta$)	ii
A.3 Passage du repère ($\alpha\beta$) au repère (dq)	iv

Liste des tableaux

2.1 Les états de commutations des interrupteurs	42
3.1 Paramètres de l'éolienne	51
3.2 Paramètres de la MADA	52
3.3 Paramètres du CCR	52

Introduction Générale

L'énergie éolienne, communément reconnue comme une ressource énergétique renouvelable propre et écologique pouvant réduire notre dépendance aux combustibles fossiles, s'est développée rapidement ces dernières années. L'énergie éolienne offre de nombreux avantages, sa technologie mature et son coût relativement faible la rendent prometteuse en tant que source d'énergie primaire importante pour l'avenir, ce qui explique pourquoi elle est l'une des sources d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide au monde.

Le principal inconvénient de l'énergie éolienne est la fluctuation de la vitesse du vent. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne étaient basés sur des générateurs directement connectés au réseau, la vitesse de ces systèmes était donc constante (avec des générateurs synchrones) ou quasi-constante (avec des générateurs asynchrones). L'évolution des semi-conducteurs de puissance a énormément contribué aux systèmes de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable en interférant la fréquence constante du réseau à la fréquence variable du générateur. Le fonctionnement à vitesse variable des éoliennes exige l'application de générateurs à vitesse variable fonctionnant sur la fréquence constante du réseau. Différents types de générateurs peuvent être utilisés, généralement des générateurs à induction (avec cage ou rotor bobiné) ou des générateurs synchrones (avec enroulement de champ ou aimants permanents), tous nécessitent l'utilisation d'un convertisseur électronique de puissance approprié. Dans notre cas, nous allons utiliser un générateur à induction à double alimentation (MADA) en raison de ses avantages que nous verrons en détail plus tard.

Il existe de nombreuses approches de contrôle dans la littérature pour la MADA dans les systèmes d'énergie éolienne connectés au réseau, la plupart d'entre elles étant basées sur la théorie de contrôle vectoriel qui est apparue comme une solution de contrôle efficace. C'est pourquoi notre recherche adopte la commande vectorielle, qui repose sur la théorie pq , afin de réaliser un contrôle plus efficace et plus performant de la MADA dans les systèmes d'énergie éolienne. Le stator de la MADA est directement connecté au réseau, tandis que le rotor est connecté au réseau à travers deux convertisseurs bidirectionnels reliés entre eux à par un bus continu. Pour cela, dans notre étude on va utiliser les convertisseurs à deux niveaux, en raison de leurs simplicités et efficacités.

Afin d'assurer le contrôle des convertisseurs, on trouve divers méthodes dans la littérature, sauf qu'il reste plus intéressant d'utiliser les correcteurs PI pour leurs avantages quand va citer après.

Dans le cas générale, l'introduction d'une éolienne dans un réseau électrique ce fait vis-à-vis la puissance active qu'elle peut injecter, alors que cette fois ci on essayera de prendre une autre approche, en s'intéressera a l'éolienne d'une part, par rapport à l'injection maximale de la puissance active disponible, donc on va adopter la stratégie de contrôle MPPT. D'autre part, pour faire participe l'éolienne a l'amélioration de la qualité d'énergie du réseau, assuré sa stabilité, et avoir une meilleur exploitation de notre réseau, on s'intéressera a l'élimination du déséquilibre dans le réseau électrique, d'où la nécessiter de développer l'idée du déséquilibre.

Chapitre 1

Généralités sur l'énergie éolienne

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie et la marémotrice se développent de façon spectaculaire ces dernières années, non seulement en raison des besoins humains qui ne cessent pas d'augmenter, mais aussi parce que le monde a commencé à prendre conscience des risques qui menacent la planète et du changement climatique en raison de la consommation croissante de combustibles fossiles. Les sources d'énergie renouvelables sont propres, abondantes, naturellement reconstituées, disponibles et n'ont presque pas d'impact sur l'environnement.

Les sources d'énergie renouvelables sont principalement utilisées pour la production d'électricité, le chauffage, les carburants de transport et l'approvisionnement énergétique des zones rurales. En 2017, environ 25% de la production mondiale d'énergie est générée par des ressources énergétiques renouvelables [1]. Selon l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), la capacité mondiale cumulée d'énergie éolienne a atteint 563 gigawatts (GW), ce qui représente environ 7% de la production mondiale d'électricité [1].

Les gens utilisaient déjà l'énergie éolienne pour propulser des bateaux le long du Nil en 5000 avant J.-C., de simples pompes à eau alimentées par le vent étaient utilisées en Chine, et des moulins à vent avec des pales en roseau tressé broyaient le grain en Perse et au Moyen-Orient [2]. De nouvelles façons d'utiliser l'énergie éolienne se sont finalement répandues dans le monde entier. Au 11ème siècle, les habitants du Moyen-Orient utilisaient déjà les pompes et les moulins à vent pour la production alimentaire. Les marchands et les Croisés ont apporté la technologie éolienne en Europe. Les Hollandais ont développé de grandes pompes éoliennes pour drainer les lacs et les marais dans le delta du Rhin. Les immigrants d'Europe ont finalement apporté la technologie de l'énergie éolienne dans l'hémisphère occidentale [3]. Les colons américains utilisaient des moulins à vent pour moudre le grain, pomper l'eau et couper le bois dans les scieries. Les colons et les éleveurs ont installé des milliers de pompes éoliennes au fur et à mesure

qu'ils s'installaient dans l'ouest des États-Unis. À la fin des années 1800 et au début des années 1900, les petites génératrices éoliennes (turbines) étaient également largement utilisées. Lorsque des lignes électriques ont été construites pour transmettre l'électricité aux zones rurales dans les années 1930, l'utilisation des pompes à vent et des petites turbines a commencé à décliner. Les petites turbines éoliennes redeviennent courantes, principalement pour fournir de l'électricité dans les zones rurales et éloignées [2][3][4].

Le premier moulin à vent pour la production d'électricité est construit en 1887 par le professeur James Blyth du collège Anderson de Glasgow (aujourd'hui l'université de Strathclyde). Le professeur expérimente trois modèles de turbines différents, dont la dernière aurait alimenté sa maison écossaise pendant 25 ans [3]. La même année, le professeur Charles F. Brush construit une éolienne de 12 kW pour charger 408 batteries stockées dans la cave de son manoir. L'éolienne, qui a fonctionné pendant 20 ans, avait un diamètre de rotor de 50 m et 144 pales [2]. En 1931, un précurseur de l'éolienne horizontale moderne est utilisé à Yalta, générant 100kW. La turbine a une tour de 30 m et un facteur de charge de 32%, ce qui signifie qu'elle fournit 32% de sa production potentielle d'énergie, ce qui est plutôt bon même selon les normes actuelles. Dix ans plus tard, la première éolienne au monde d'un mégawatt est construite et raccordée au réseau électrique à Castleton, dans le Vermont. L'éolienne a des pales de 75 pieds et pèse 240 tonnes [2][4]. En 1991, le premier parc éolien offshore est créé à Vindeby, dans la partie sud du Danemark. Le parc éolien se compose de 11 éoliennes d'une capacité de 450 kW chacune. La Vestas V164 est une éolienne offshore à trois pales, avec un diamètre de rotor de 164 mètres et une surface balayée de 21 124 mètres carrés. Chaque pale pèse entre 33 et 35 tonnes, produites par Vestas qui a révélé la conception de la V164 en 2011 avec la première unité prototype exploitée à Østerild dans le nord du Danemark en janvier 2014, cette turbine offshore a eu la plus grande capacité de production d'électricité, initialement appelée Vestas V164-7.0MW. Les premières unités industrielles ont été installées en 2016 à Burbo Bank, au large de la côte ouest du Royaume-Uni, la puissance a été portée à 8,0 MW, puis à 9,0 MW. En 2017, la capacité des turbines a été portée à 9,5 MW [2][3][4].

1.2 Généralités

Le vent est une forme d'énergie solaire, il se développe à partir du réchauffement inégal de la surface de la Terre par le soleil. Lorsque le soleil réchauffe la surface de la Terre, l'atmosphère se réchauffe également. La surface de la Terre absorbe le rayonnement solaire de façon inégale en raison de ses irrégularités, comme les diverses formations terrestres et aquatiques. Certaines parties de la Terre reçoivent des rayons directs du soleil, ce qui réchauffe le climat. D'autres endroits sont plus froids parce qu'ils reçoivent des rayons indirects. Ainsi, l'air chaud, qui pèse moins lourd que l'air froid, s'élève. Puis l'air froid se déplace et remplace l'air chaud ascendant. C'est ce mouvement de l'air qui fait souffler le vent. Les termes "énergie éolienne" et "force du vent" décrivent tous les

deux le processus par lequel le vent est utilisé pour produire de la puissance mécanique ou de l'électricité. Cette puissance mécanique peut être utilisée directement dans certaines tâches (pompage de l'eau ou broyage du grain) ou indirectement en utilisant un générateur pour convertir cette puissance mécanique en électricité, ce qui introduit le concept d'éolienne[2][4].

Les éoliennes sont un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Le principe de fonctionnement des éoliennes est assez simple : contrairement à un ventilateur, les éoliennes utilisent le vent pour produire de l'électricité. Les éoliennes ressemblent à des hélices d'avion qui tournent sur place mais qui ne vont nulle part. Le vent souffle vers les pales de l'éolienne qui ont une forme spéciale, similaire aux ailes d'un avion [5]. Lorsque le vent souffle sur les ailes d'un avion, il les déplace vers le haut avec une force que nous appelons la portance. Lorsqu'il passe sur les pales d'une turbine, la pression de l'air d'un côté de la pale diminue. La différence de pression d'air entre les deux côtés de la pale crée à la fois des forces de portance et de traînée. La force de portance est plus forte que la traînée, ce qui fait que le rotor tourne à la place. Le vent perd une partie de son énergie cinétique et la turbine en gagne tout autant. Comme on peut s'y attendre, la quantité d'énergie produite par une turbine est proportionnelle à la surface balayée par ses pales, en d'autres termes, plus les pales sont longues, plus la turbine produit d'énergie. Il est évident que des vents plus rapides aident aussi si le vent souffle deux fois plus vite, il y a potentiellement huit fois plus d'énergie disponible pour une turbine à récolter. C'est parce que l'énergie du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse. Le rotor est relié au générateur, soit directement (s'il s'agit d'une turbine à entraînement direct), soit par un arbre et une série d'engrenages (une boîte de vitesses) qui accélèrent la rotation et permettent d'obtenir un générateur physiquement plus petit. Cette transformation de la force aérodynamique en rotation d'un générateur crée de l'électricité [3][5].

1.3 Principaux types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées en deux grandes catégories en fonction de leur structure :

1.3.1 Éoliennes à axe vertical

Bien que les éoliennes à axe vertical existent depuis des siècles, elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité, paradoxalement en contradiction avec le moulin à vent traditionnel à axe horizontal. L'avantage des éoliennes à axe vertical est qu'elles peuvent être placées beaucoup plus près du sol et sont idéales pour les réseaux de toits. Elles sont donc faciles pour l'accès et l'entretien, elles sont également plus légères et plus faciles à introduire dans un environnement domestique, en ville ou en centre-ville. Il n'est pas nécessaire de les orienter en fonction de la direc-

tion du vent, le couple de démarrage est élevé, la construction est simple (en particulier la technologie Savonius) et elles fonctionnent à faible vitesse, donc avec un faible niveau de bruit. Pourtant, ils ne sont pas encore aussi courants que leurs homologues horizontaux. La principale raison en est qu'elles ne prennent pas l'avantage des vitesses du vent les plus élevées à des altitudes plus hautes au-dessus du sol, contrairement aux turbines à axe horizontal [6]. Elles se répartissent également en deux catégories :

Éolienne Savonius

Cette éolienne est à démarrage automatique, elle a la forme d'un "S" et fonctionne de la même manière qu'un anémomètre à coupelle. Le vent est capté dans ses courbes, ce qui fait bouger l'engin en cercle. La direction du vent n'a pas d'importance, car il y aura toujours plus de force exercée sur la tasse qui a sa face ouverte au vent, et cela poussera le rotor à tourner. Cette conception d'éolienne est donc idéale pour les régions où le vent est très turbulent. Malheureusement, les pales ont une vitesse de rotation extrêmement lente, et ne peuvent donc pas produire autant d'électricité que les autres turbines. Les éoliennes Savonius ne produisent pas de grande puissance et ont un rendement très faible, ne dépassant pas 50% de la limite de Betz. Par conséquent, elles ne sont pas très développées[6][7].



FIGURE 1.1 – Éolienne Savonius

Éolienne Darrieus

Contrairement à l'éolienne Savonius, l'éolienne Darrieus est de type élévateur. Elle possède deux à trois pales en forme de "C" qui captent le vent. Plutôt que de collecter le vent dans des coupelles qui traînent l'éolienne, elle utilise les forces de levage générées par le vent qui frappe les ailes pour créer une rotation. Même si cette conception est beaucoup plus petite, elle produit donc moins de bruit et nécessite beaucoup moins d'espace. Leur fonctionnement est néanmoins plus complexe et elles n'ont pas de couple considérable, même par vent fort. Elles ne s'auto-amorcent donc pas et nécessitent une énergie supplémentaire pour démarrer. Mais leur efficacité est comparable à celle des éoliennes horizontales rapides[6][8].



FIGURE 1.2 – Éolienne Darrieus

1.3.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont beaucoup plus utilisées, même si elles nécessitent un mécanisme pour orienter les pales. Ce type d'aérogénérateurs se caractérise par un rendement aérodynamique supérieur à celui de l'aérogénérateur vertical. De plus, il démarre de façon autonome et possède des éléments bas au niveau du sol. En fait, les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont composées de plusieurs pales de forme aérodynamique à la manière des ailes d'un avion. Dans ce cas, la force de levage n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol, mais pour générer un couple moteur afin d'entraîner la rotation. Le nombre de pales utilisées pour la production d'énergie électrique varie généralement entre 1 et 3. La technologie dominante aujourd'hui est celle des trois pales à axe horizontal, car il s'agit d'un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur de vent [8][9]. Ce type d'éolienne a pris le pas sur celles à axe vertical, car elles sont moins chères, moins exposées aux contraintes mécaniques et elles ont l'avantage d'avoir un rendement aérodynamique plus élevé, favorisé par la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol. En outre, ils sont démarrés de manière autonome et ont une faible empreinte au sol. Les turbines à axe horizontal sont également subdivisées en deux catégories :

Éoliennes à rotation lente

Les éoliennes à rotation lente "multipales" sont utilisées depuis des décennies dans les campagnes. Leur efficacité est médiocre et leur fonction presque exclusive est de pomper l'eau, on les trouve également dans la navigation de plaisance[6][8].

Éoliennes à rotation rapide

Les éoliennes à rotation rapide, à deux ou trois pales, constituent l'essentiel du marché, elles ont un bon rendement. Leur principale fonction étant de produire de l'électricité, elles sont appelées "aérogénérateurs" [8]. Au-delà d'une certaine puissance, ces éoliennes sont souvent équipées d'une hélice à pas variable, qui permet de modifier l'inclinaison des pales en fonction de la direction du vent.



FIGURE 1.3 – Éolienne multipales



FIGURE 1.4 – Éolienne tri-pales

Dans cette étude, nous examinerons le cas des éoliennes tripales à axe horizontal, pour les avantages énumérés précédemment.

1.4 Composants des éoliennes

La composition fondamentale d'une éolienne, est représentée ci-dessous dans la Figure (1.5). Les composants convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique d'une manière contrôlée, fiable et efficace. Les principales parties visibles sont la tour, la nacelle, les pales du rotor et le transformateur élévateur. Le reste des composants est logé à l'intérieur de l'éolienne[4][7]. Il existe trois catégories de composants d'une éolienne :

Composants mécaniques

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par les composants mécaniques, et transmise au générateur par le biais de la chaîne de transmission.

Composants électriques

L'énergie mécanique reçue par le générateur est transformée en énergie électrique et transmise à un transformateur élévateur.

Composantes de contrôle

Comprend les systèmes de contrôle mécaniques et électriques. Les systèmes de contrôle remplissent un grand nombre de fonctions en ce qui concerne les turbines, les générateurs et les convertisseurs de puissance, l'intégration au réseau, les normes de protection et le fonctionnement des parcs éoliens.

Une brève description de certains des principaux composants des éoliennes est donnée ci-dessous[4–8].

1. Rotor : Le rotor se compose de pales, d'un moyeu, de roulements, d'un cône de nez et d'un entraînement de pas.
 - (a) Pales du rotor : Pales de rotor en polymères renforcés de fibres, en plastiques renforcés de verre, ou en composites de fibres de carbone pour obtenir une faible inertie de rotation [3]. Les pales de rotor d'une éolienne fonctionnent selon le même principe que les ailes d'un avion. Un côté de la pale est incurvé tandis que l'autre est plat. Le vent s'écoule plus rapidement le long du bord incurvé, ce qui crée une différence de pression de chaque côté de la pale. Les pales sont "poussées" par l'air afin d'égaliser la différence de pression, ce qui fait tourner les pales. C'est ce qui fait que l'énergie cinétique du vent est convertie en premier lieu en énergie mécanique.

- (b) Moyeu et roulements du rotor : Un support mécanique est fourni aux pales du rotor et convertit le mouvement transversal des pales en un couple appliqué à la boîte de vitesse par le moyeu du rotor. Les roulements du rotor supportent l'accouplement entre le moyeu du rotor et l'arbre principal, ce qui favorise la rotation en douceur de ce dernier.
 - (c) Entraînements en pas et en lacet : Les entraînements en pas peuvent être mis en œuvre par des mécanismes hydrauliques ou électriques, mais ce dernier est couramment utilisé pour réduire la complexité et les coûts de maintenance et obtenir des taux de pas rapides de 7,5-8 °/s [5]. Un couple élevé est produit par l'entraînement en lacet pour déplacer les pales du rotor et la nacelle vers le vent afin d'extraire le maximum d'énergie possible. De plus, il est utilisé pour arrêter la turbine en la déplaçant hors du vent.
2. Chaîne de transmission : La chaîne de transmission comprend l'accouplement mécanique, les roulements, l'arbre principal à basse vitesse, l'arbre du générateur à haute vitesse, la boîte de vitesses et les freins mécaniques.
- (a) Arbre principal et frein mécanique : La transmission de l'énergie mécanique du moyeu du rotor à la boîte de vitesses est assurée par l'arbre principal (arbre à basse vitesse). Afin d'optimiser le transfert de charge, l'arbre principal est généralement fabriqué en acier forgé à haute teneur en carbone, en fonte ou en acier moulé. Des freins mécaniques sont appliqués après les entraînements en pas et en lacet et sont utilisés pour arrêter les éoliennes en cas d'urgence.
 - (b) Boîte de vitesses : Pour coupler l'arbre principal à l'arbre du générateur, on utilise une boîte de vitesses à plusieurs étages. Une boîte de vitesses à 3 étages contenant 1 étage planétaire et 2 étages hélicoïdaux. Avec un rapport de 60 à 120 et un rendement de 95% à 98%, un multiplicateur à 3 étages est généralement utilisé pour les générateurs à grande vitesse [8]. La boîte de vitesses nécessite des coûts de maintenance réguliers et élevés, en plus d'investissements initiaux énormes pour assurer une longue durée de vie. En outre, la boîte de vitesses produit un niveau élevé de bruit audible.
 - (c) Générateur éolien : Le générateur éolien convertit l'énergie mécanique rotative en énergie électrique. Plusieurs générateurs tels que le générateur à induction à cage d'écureuil, le générateur à induction à rotor bobiné, le générateur à induction double alimentation, le générateur synchrone à aimant permanent et le générateur synchrone à rotor bobiné ont été développés pour les éoliennes.
 - (d) Convertisseur de puissance : le convertisseur de puissance change la tension de sortie alternative du générateur en tension continue par convertisseur CA/CC, puis de nouveau en CA avec une amplitude de tension et une fréquence fixes par convertisseur CC/CA.

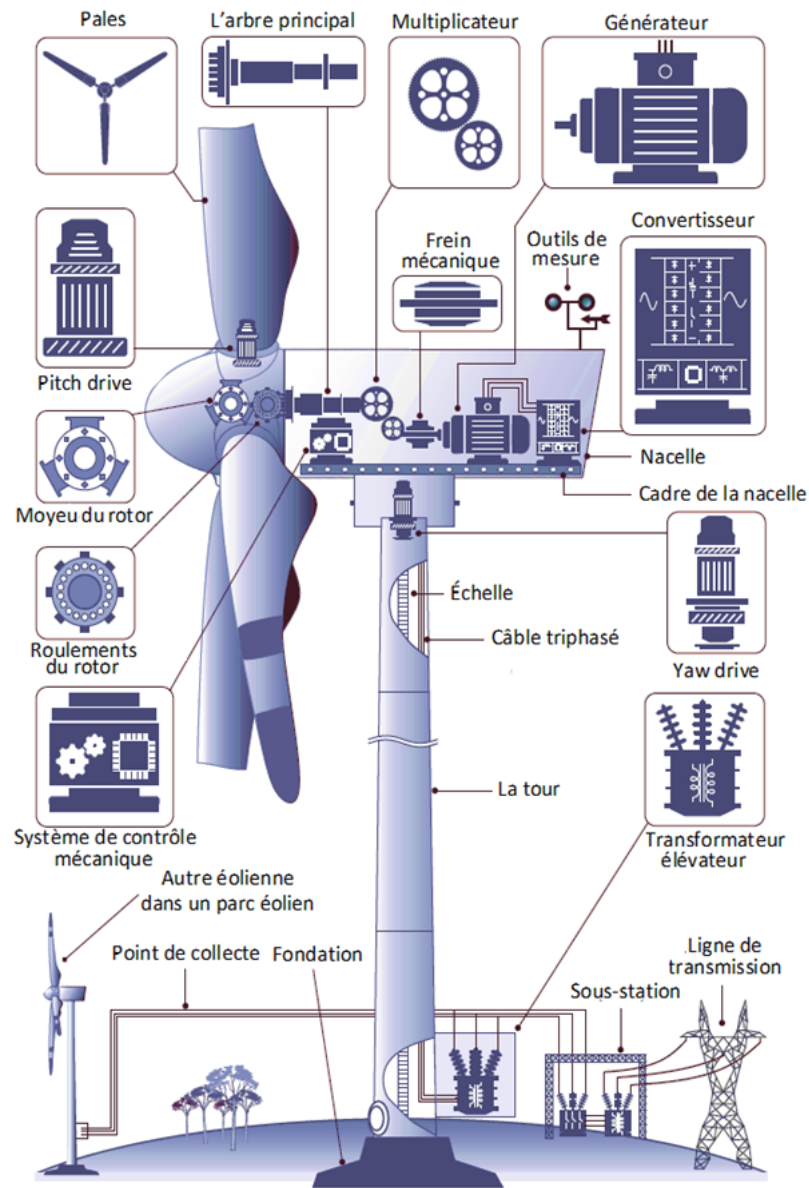


FIGURE 1.5 – Schéma représentative des composants d'une éolienne raccordé au réseau

1.5 Différentes technologies d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être aussi classées en deux grandes catégories en fonction de leur vitesse :

1.5.1 Éolienne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les plus anciennes sont basé sur la machine asynchrone à cage sans interface de convertisseur de puissance ("Concept Danois"). Leur vitesse mécanique est fixée et imposée par la fréquence du réseau et/ou par le nombre de pair de pôles de la génératrice [8]. Un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur est utilisé pour se rapproché de la vitesse du synchronisme et un multiplicateur de vitesse pour couplé la génératrice à l'arbre de la turbine, alors que le stator est directement raccordé au réseau. Pour magnétisé le rotor, la machine asynchrone à cage absorbe de la puissance réactive du réseau, pour cela des batteries de condensateurs sont généralement utilisées pour la compenser [9].

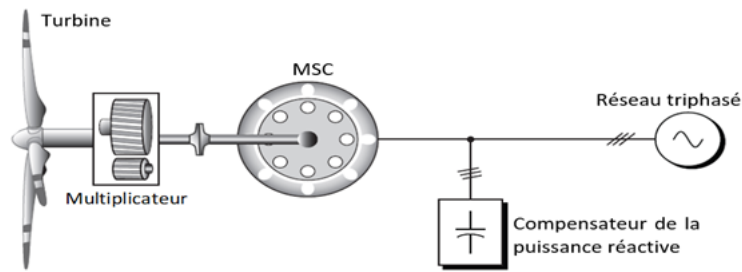


FIGURE 1.6 – Éolienne à vitesse fixe

Avantages

- (+) Structure simple de la conversion d'énergie.
- (+) Faibles coûts initiaux et de maintenance.
- (+) Pas de nécessité du convertisseur de puissance.

Inconvénients

- (−) Rendement de conversion de l'énergie éolienne faible.
- (−) Fréquence du réseau moins stable dû aux changements de vitesse du vent.
- (−) Bruit et variations des courants débité sur le réseau du a le multiplicateur.
- (−) L'impossibilité du réglage de la puissance générée.
- (−) Puissance extraite non optimisée.
- (−) Nécessité des batteries de condensateurs.

1.5.2 Éolienne à vitesse variable

Il existe trois types des éoliennes à vitesse variable [8–10] : Le premier type est celui avec des turbines qui utilisent un multiplicateur de vitesse pour couplé le rotor de la turbine avec le rotor de la génératrice. Deux convertisseurs de puissance sont

employés entre le stator de l'éolienne et le réseau électrique pour transiter toute la puissance électrique produite [9]. Les convertisseurs de puissance permettent d'obtenir une gamme de vitesses variables et le rendement énergétique de ces turbines est le plus élevé. La machine asynchrone à cage, la machine synchrone à aimants permanent et la machine synchrone à rotor bobiné sont tous utilisés. Mais il reste que la machine synchrone à aimants permanent est la plus populaire pour ce type d'éoliennes [10].

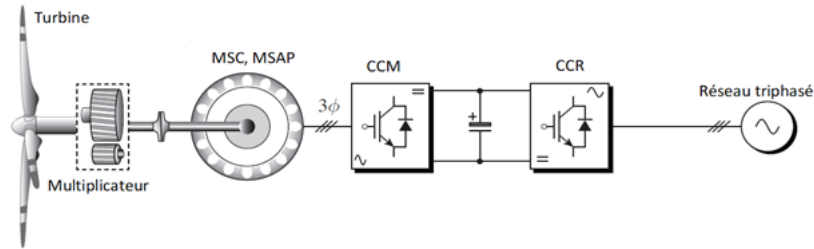


FIGURE 1.7 – Éolienne à vitesse variable type 1

Le deuxième type est marqué par l'absence du multiplicateur lors du raccordement du rotor de la génératrice et le rotor de la turbine.

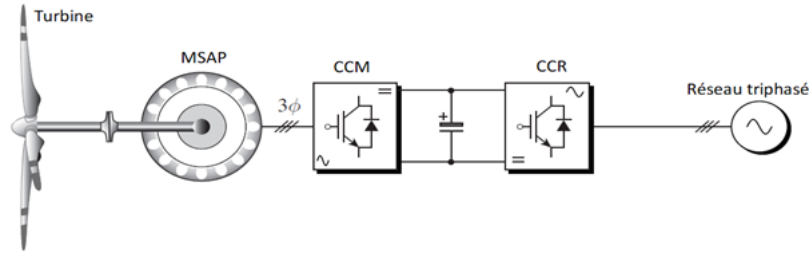


FIGURE 1.8 – Éolienne à vitesse variable type 2

Le troisième type repose sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation. Comme son nom l'indique, l'électricité provenant du générateur est injectée par les enroulements du stator raccordé directement au réseau, et du rotor par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance, qui assure la transition de la puissance du glissement [8][9].

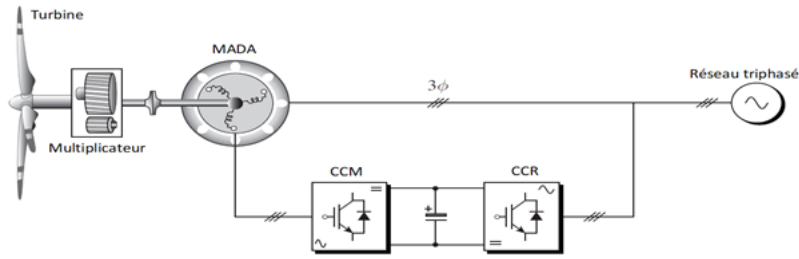


FIGURE 1.9 – Éolienne à vitesse variable type 3

Avantages des éoliennes à vitesse variable

- (+) Puissance extraite optimisée.
- (+) Amélioration du rendement de conversion énergétique.
- (+) Le contrôle indépendant de la puissance active et réactive transmis au réseau.
- (+) La présence du multiplicateur de vitesse n'est plus nécessaire.
- (+) Réduction du stress sur les composants mécaniques.
- (+) Meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.

Inconvénients des éoliennes à vitesse variable

- (-) Complexité des systèmes de contrôle et de commande.
- (-) Coûts initiaux plus élevé avec la présence des convertisseurs de puissance.
- (-) Pertes dans les convertisseurs de puissance.

Pour les avantages cités ci-dessus les éoliennes à vitesse variable sont bien favorisées par rapport celles à vitesse fixe.

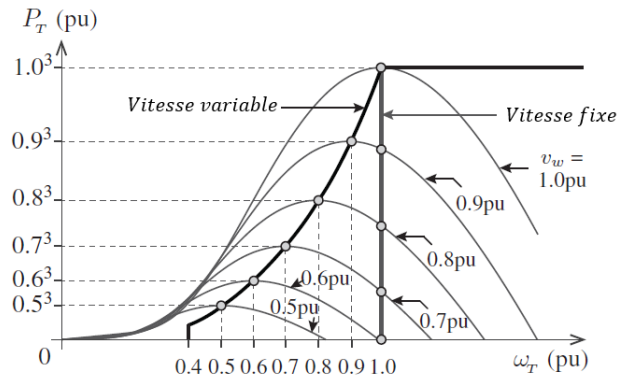


FIGURE 1.10 – Caractéristique des éoliennes à vitesses variables en fonction de la vitesse du vent

Comme le montre la figure ci-dessus, les éoliennes à vitesse variable peuvent extraire le maximum de puissance pour différentes vitesses du vent, alors que celles à vitesse fixe ne peuvent l'extraire que pour une seule vitesse du vent.

1.6 Conditions de raccordement des éoliennes au réseau

La pénétration importante des éoliennes dans le réseau électrique existant, a fait de sorte d'exiger des codes de raccordement de cette dernière, et cela pour assurer la stabilité du réseau et la qualité de l'électricité fournie[11–13].

Les principaux codes sont les suivants :

- ☐ Tolérance à la variation de la fréquence et à la variation de la tension.
- ☐ Contrôle de la puissance active et de la fréquence.
- ☐ Capacité de contrôle de la puissance réactive et de réglage de la tension.
- ☐ Résistance aux creux de tension.

Cette section sera plus détaillée dans le Master [14].

1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie présente également des inconvénients qui doivent être étudiés afin qu'ils ne deviennent pas un frein à son développement.

Avantages de l'énergie éolienne

Source de carburant propre et écologique : L'utilisation du vent comme source d'énergie ne polluera pas l'environnement. Par rapport aux combustibles fossiles, l'énergie éolienne est plus propre et facilement disponible. L'énergie éolienne réduit les émissions de carbone dans l'atmosphère qui sont à l'origine des pluies acides ou de l'effet de serre. La pollution sonore et visuelle est un facteur environnemental, mais elle n'a pas d'effet négatif sur la terre, l'eau ou la qualité de l'air. Elle est donc extrêmement verte et propre [2].

Renouvelable et durable : L'énergie éolienne est renouvelable, fiable et inépuisable. Nous ne pouvons donc pas en manquer, car sa cause est le réchauffement de l'atmosphère par le soleil, les irrégularités de la surface terrestre et la rotation de la terre. Tant que le soleil brille, le vent souffle, l'énergie produite peut être exploitée et elle ne s'épuisera jamais, contrairement aux réserves de combustibles fossiles de la terre [8][15].

Rentable : L'énergie éolienne est totalement gratuite, elle peut être utilisée par tout le monde et constitue l'une des technologies renouvelables les moins chères disponibles aujourd'hui. Le principal coût que nous associons à l'énergie éolienne est le coût de fabrication et d'installation. Une fois que les turbines ont été mises en place, les coûts d'exploitation sont moins élevés. Elles nécessitent un entretien mais, contrairement aux autres formes d'énergie, elles ne nécessitent pas de surveillance constante ni de main-d'œuvre pour continuer à fonctionner [7][16].

Installation industrielle et domestique : Bien que la plupart des gens dépendent de l'énergie que les centrales électriques produisent, dans de bonnes circonstances, les gens peuvent produire leur propre énergie éolienne. Les éoliennes sont disponibles en différentes tailles, ce qui signifie que de nombreuses personnes et entreprises peuvent en profiter pour produire de l'énergie pour leur propre usage ou la vendre à des services publics pour en tirer un certain profit. Les éoliennes peuvent être construites sur des fermes ou des ranchs existants où se trouvent la plupart des meilleurs sites éoliens. Bien entendu, à l'heure actuelle, ce n'est probablement pas une solution à 100% pour répondre aux besoins énergétiques des ménages. En période de vent faible, l'énergie doit généralement encore être tirée du réseau, mais le potentiel est là [2][5].

Une croissance rapide et un énorme potentiel : L'énergie éolienne a connu une croissance énorme au cours de la dernière décennie. C'est l'une des technologies d'énergie renouvelable qui connaît la plus forte croissance. La capacité mondiale de production d'énergie éolienne installée sur terre et en mer a été multipliée par près de 75 au cours des deux dernières décennies, passant de 7,5 gigawatts (GW) en 1997 à 564 GW en 2018, selon les dernières données de l'IRENA [1]. La production d'électricité éolienne a doublé entre 2009 et 2013, et en 2016, l'énergie éolienne représentait 16% de l'électricité produite par les énergies renouvelables [1].

Inconvénients de l'énergie éolienne

Incohérence entre le vent et les sites éoliens : L'énergie éolienne présente un inconvénient, elle est une source d'énergie imprévisible et intermittente. Cette fluctuation n'est pas adaptée pour répondre à la demande énergétique de base car la quantité d'électricité produite dépend de la vitesse et de la direction du vent, à moins qu'une forme de stockage d'énergie ne soit utilisée. Cela peut poser de sérieux problèmes aux concepteurs d'éoliennes qui consacreront beaucoup de temps et d'argent à étudier si un site particulier convient ou non à la production d'énergie éolienne. Pour qu'une éolienne soit efficace, le site où elle est construite doit disposer d'une alimentation adéquate en énergie du vent [15].

Le bruit : Les éoliennes ont tendance à produire beaucoup de bruit, ce qui peut être désagréable. Une seule éolienne peut être entendue à des centaines de mètres de distance [2]. Bien que des mesures soient souvent prises pour installer les éoliennes loin

des habitations.

Pollution esthétique : Les éoliennes génèrent une pollution visuelle. De nombreuses personnes sont préoccupées par les effets visuels que les éoliennes ont sur les beaux paysages de la nature. Ils pensent que les éoliennes géantes détournent l'attention des spectateurs de la beauté du paysage.

Il ne s'agit pas d'une utilisation rentable des terres : Les utilisations alternatives du sol pourraient être plus valorisées que la production d'électricité.

Menace pour la faune et la flore : Les éoliennes peuvent être dangereuses pour les animaux volants. De nombreux oiseaux et chauves-souris ont été tués par des pales d'éoliennes en rotation. Des experts mènent actuellement des recherches pour en savoir plus sur les effets des éoliennes sur les habitats marins. La plupart des problèmes peuvent être résolus ou fortement réduits grâce au développement technologique ou à une implantation adéquate des éoliennes.

1.8 Capacité des éoliennes installées

L'énergie éolienne a connu une forte croissance et c'est l'une des technologies d'énergie renouvelable qui connaît la plus forte progression, et qui continue de prospérer chaque année dans de nombreux pays. Les figures 1.11 et 1.12 présentent respectivement les capacités éoliennes cumulées et annuelles installées dans le monde. Les dix premiers pays en termes de capacités éoliennes cumulées et annuelles installées sont présentés dans les figures 1.13 et 1.14, respectivement. Les données sont présentées collectivement selon l'annuaire 2019 de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) et le rapport 2018 du Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), REN21 renewable global status report 2019[1][17][18].

Cumulative Installed Wind Power (GW)

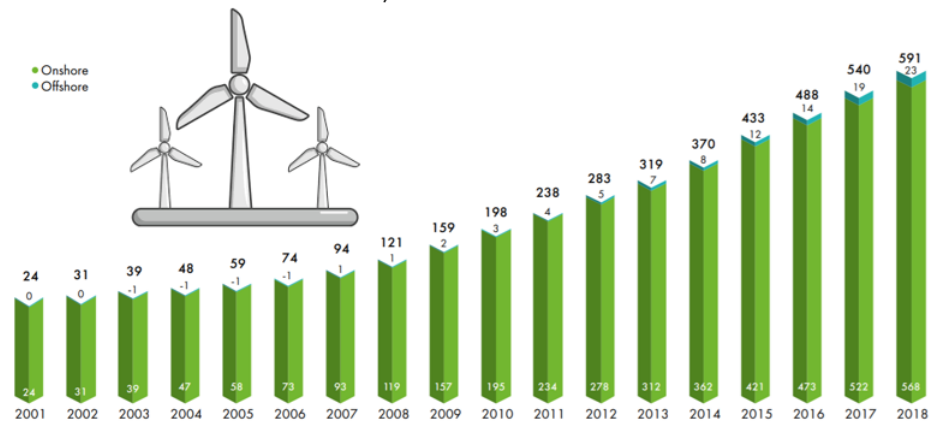


FIGURE 1.11 – La capacité des éoliennes cumulées installées dans le monde

Annual Installed Wind Power (GW)

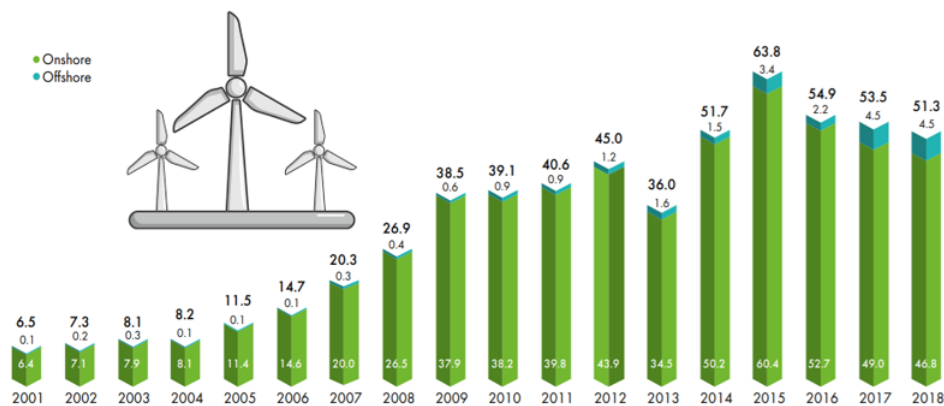
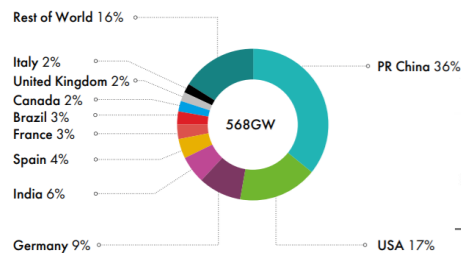


FIGURE 1.12 – La capacité des éoliennes annuelles installées dans le monde

Total installations onshore



Total installations offshore

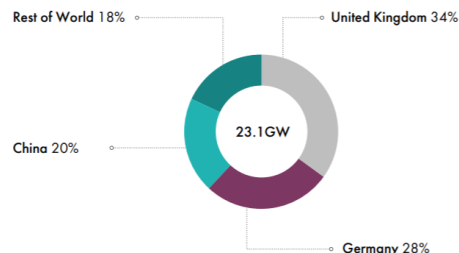


FIGURE 1.13 – La puissance totale installée des éoliennes dans les dix premiers pays au monde

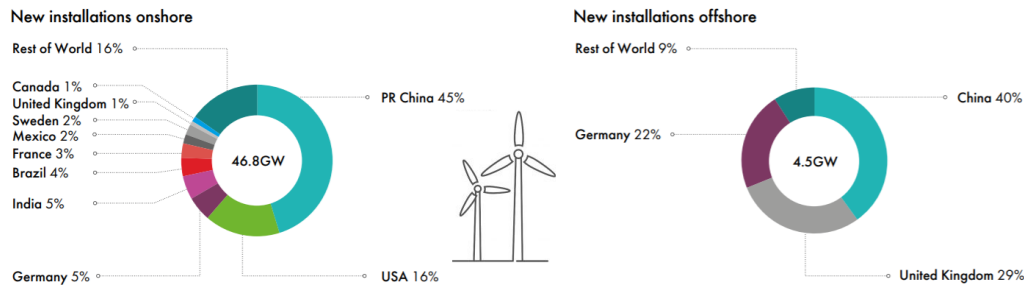


FIGURE 1.14 – La nouvelle puissance installée des éoliennes dans les dix premiers pays au monde

Les principales observations concernant les capacités éoliennes installées sont résumées ci-dessous :

- La capacité éolienne installée cumulée a augmenté de manière exponentielle, passant de 24 GW en 2001 à 591 GW en 2018.
- Sur la base de la tendance actuelle et du taux de croissance cumulé de 10%, la capacité éolienne cumulée devrait atteindre plus de 800 GW d'ici 2022.
- En 2018, la capacité annuelle mondiale installée d'énergie éolienne était de 51,3 GW, avec un nouvel investissement record de 131,5 milliards d'USD, ce qui représente une croissance de 1% par rapport à 2017. Pour la septième année consécutive, la Chine est en tête des investissements mondiaux, avec 32% de l'investissement total mondial.
- L'énergie éolienne est présente dans plus de 120 pays. Plus de 35 pays ont une capacité éolienne installée cumulée de plus de 1 GW : 18 en Europe, 8 en Asie, Eurasie et Océanie (Chine, Inde, Japon, République de Corée, Pakistan, Thaïlande, Turquie et Australie), 3 en Amérique du Nord (Canada, Mexique et États-Unis), 3 en Afrique (Égypte, Maroc, Afrique du Sud) et 3 en Amérique du Sud (Brésil, Chili, Uruguay).
- Dix pays ont plus de 10 GW de capacité installée cumulée, dont la Chine (209 GW), les États-Unis (96 GW), l'Allemagne (57 GW), l'Inde (34 GW), l'Espagne (23 GW), le Royaume-Uni (19 GW), la France (15,3 GW), le Brésil (14,5 GW), le Canada (12,8 GW) et l'Italie (10,1 GW). Ces pays représentent environ 74% de la capacité mondiale d'énergie éolienne.
- L'Asie et l'Europe sont des acteurs clés du secteur de l'énergie éolienne et accueillent respectivement 41,1% et 21,6% de la capacité éolienne mondiale.
- À la fin de l'année, la capacité éolienne était suffisante pour fournir environ 5,5% de la production mondiale d'électricité.
- La part de l'éolien dans la consommation totale d'électricité en 2018 était de 41% au Danemark, 30% en Irlande et 24,3% au Portugal.
- La Chine conserve sa position de leader en termes de puissance installée annuelle et cumulée au niveau mondial en doublant pratiquement sa capacité, qui passe de 114 GW en 2014 à 209 GW à la fin de 2018. La RP Chine a ajouté plus de 22,8 GW

de nouvelle capacité en 2018, ce qui représente près de 45% de la capacité annuelle installée mondiale.

- Les États-Unis est le deuxième plus grand pays en termes de capacité installée cumulative mondiale. Les États-Unis à ajouter 7,5 GW de nouvelle capacité en 2018.
- L'Allemagne conserve la troisième place avec environ 10% de la capacité éolienne installée, tandis que l'Inde est le quatrième plus grand pays avec une capacité éolienne installée cumulée de 34 GW, qui représente 10% de sa consommation d'électricité. L'Espagne et le Royaume-Uni occupent respectivement la cinquième et sixième place des pays les plus performants en matière d'énergie éolienne.
- La capacité éolienne installée cumulée de la France a augmenté régulièrement, passant de 9,7 GW en 2014 à 15,3 GW à la fin de 2018, ce qui en fait le septième pays pour l'énergie éolienne. En 2018, la France a ajouté 1,5 GW de nouvelle capacité installée et actuellement 5,5% de l'électricité en France est couverte par l'énergie éolienne.
- Les trois dernières places dans les dix premières listes sont occupées par le Brésil, le Canada et l'Italie.

1.9 Déséquilibre du réseau

Le déséquilibre apparaît si les conditions de phase et d'amplitude ne sont pas vérifiées. Généralement il dû à une charge déséquilibré, et qui conduit à la surchauffe et la dégradation des équipements raccordé au réseau.

Cette section sera plus détaillée dans le Master [14].

1.10 Régulation de la tension dans le réseau électrique

La tension est un paramètre local, qui change d'un nœud à un autre, donc la plage de variation de la tension doit être limitée en chaque point. On trouve dans la littérature, différents dispositifs de réglage de la puissance réactive permettant de conserver la tension dans les limites admissibles telle que les condensateurs série ou parallèle, les inductances shunt et les compensateurs synchrones, et les systèmes FACTS.

Cette section sera plus détaillée dans le Master [14].

1.11 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude bibliographique a été présentée qui concerne les différents types d'éoliennes et leurs principes de fonctionnements. Mais aussi les différentes technologies des éoliennes et de ce fait on a conclu que les éoliennes à vitesse variables offrent une large plage de variation de vitesse et du coup elles permettent une meilleure possibilité de réglage que celles des éolienne fixe.

On a constaté aussi que les avantages de l'énergie éoliennes la rend comme une source très prometteuse et que ces inconvénient on peut les surmonté. Ceci est justifier par la capacité de l'énergie éolienne et sa part dans la contribution à la production électrique qui ne cesse pas d'augmenter et qui évolue d'une manière très rapide lors de la dernière décennie.

Après il apparait nécessaire de connaître les principaux codes de raccordements des éoliennes dans le réseau électrique, d'où on a tiré qu'il est nécessaire de maintenir la tension en tout point du réseau dans un intervalle de tolérance ceci dans le but d'assurer le bon fonctionnement des installations raccordées au réseau électrique.

Puis on a introduit la notion du déséquilibre qui est généralement dû à une charge déséquilibré, et qui conduit à la surchauffe et la dégradation des équipements raccordé au réseau.

Chapitre 2

Conversion de l'énergie éolienne

2.1 Introduction

L'éolienne à base de la MADA offre des capacités qui pourraient lui faire permettre de participer aux réglages du réseau avec une commande bien adaptée. La MADA est un générateur à rotor bobiné où le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique et le rotor connecté au réseau à travers deux convertisseurs d'électroniques de puissance par le biais d'un bus continu. Afin d'obtenir des vitesses de rotation sous-synchrone et hyper-synchrone, les convertisseurs utilisés doivent être bidirectionnelle. Un filtre RL est mise en place entre le convertisseur côté réseau et le réseau pour filtrer les harmoniques. Notre éolienne est constituée d'une turbine à trois pales, un multiplicateur de vitesse et un arbre mécanique.

En raison des avantages que présente la MADA, elle sera l'objet d'étude dans ce chapitre. Nous allons en premier lieu, commencer par déterminer la chaîne de conversion éolienne, puis procéder à la modélisation de la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et l'arbre mécanique. Ensuite on verra les différentes structures de la MADA, ses modes de fonctionnement et effectuer sa modélisation. Le principe de contrôle vectoriel, et la stratégie de contrôle MPPT seront détaillés par la suite. Ainsi, on modélisera le réseau, le filtre, les convertisseurs côté machine et côté réseau avec le bus continu qui les relie. Enfin, on présentera le convertisseur DC/AC à deux niveaux avec sa commande MLI et on calculera les puissances nécessaires à la compensation du déséquilibre dans le réseau électrique.

2.2 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement qui traversent la surface active A de la voilure, en passant par un générateur, en énergie électrique [19].

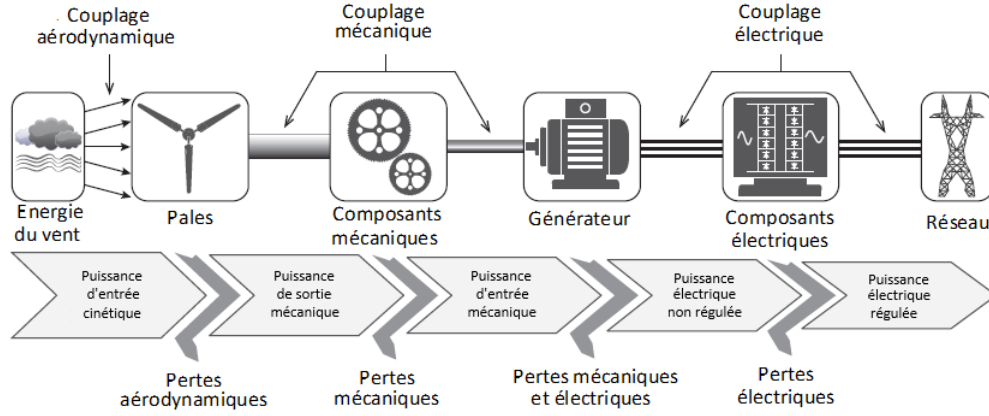


FIGURE 2.1 – Schéma fonctionnel du système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 2.2 sur lequel la vitesse V_1 en amont de l'éolienne et la vitesse V_2 en aval ont été tracées en supposant que la vitesse du vent passant à travers le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé devant l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , c'est-à-dire : $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ passant à travers la surface A des pales en une seconde est :

$$m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot (V_1 + V_2), \quad A = \pi \cdot R^2 \quad (2.1)$$

Où ρ est la densité de l'air (kg/m^3), A est la surface balayée par le rotor (m^2), R est le rayon de la pale (m) et V_1 est la vitesse du vent (m/s).

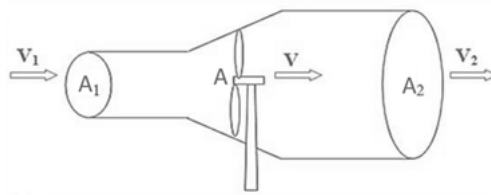


FIGURE 2.2 – Tube de courant autour d'une éolienne

Selon la deuxième loi de Newton, la puissance P_m extraite est exprimée par :

$$P_e = \frac{1}{2} m \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.2)$$

En remplaçant m par son expression :

$$P_e = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.3)$$

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface A sans réduction de vitesse, à la vitesse V_1 , la puissance correspondante P_e serait alors :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (2.4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible et ensuite :

$$\frac{P_e}{P_a} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right) \quad (2.5)$$

Le rapport $\frac{P_e}{P_a}$, également appelé coefficient de puissance C_p , a un maximum de $\frac{16}{27} = 0.59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance extractible maximale pour une vitesse de vent donnée [20][21].

Cette limite n'est jamais atteinte dans la réalité et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse des extrémités des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. Selon les limites de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{e_{max}} = C_{p_{max}} \cdot P_a = \frac{16}{27} P_a = 0.59 P_a \quad (2.6)$$

En remplaçant les équations P_a par son expression :

$$P_e = C_p \cdot P_a = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (2.7)$$

Où :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (2.8)$$

Ω_1 Vitesse de rotation avant le multiplicateur de vitesse.

Les caractéristiques de la vitesse de rotation des éoliennes sont représentées dans la figure ci-dessous. Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la valeur standard de la vitesse de démarrage ($3 - 5m/s$), ce qui est insuffisant pour démarrer l'éolienne, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro. Une fois que le vent atteint une vitesse minimale V_{min} il permettra le démarrage. Juste après le démarrage de l'éolienne, celle-ci fonctionnera pour extraire la puissance maximale disponible pour un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale V_{nom} (valeurs standard $10 - 15m/s$) correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_{nom} et de la rotation Ω_{nom} [22].

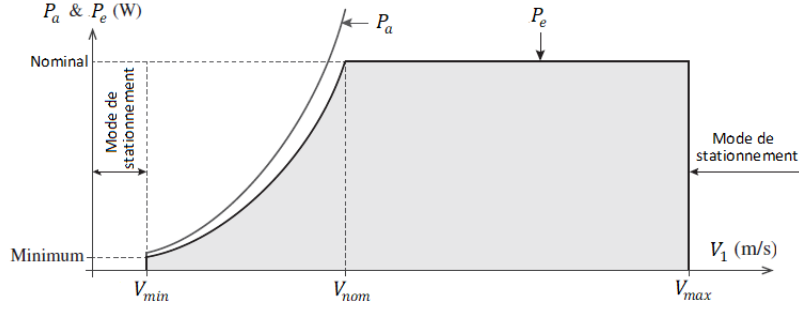


FIGURE 2.3 – Courbes caractéristiques de la puissance d’une éolienne par rapport à la vitesse du vent

Lorsque les vitesses du vent sont supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas endommager l’éolienne. Ces limitations peuvent être obtenues, par exemple, en orientant les pales de l’éolienne de manière à ce que le rendement de l’éolienne soit dégradé (en augmentant l’angle de pas des pales β). Dès que le vent atteint les valeurs typiques de vitesse de vent V_{max} ($25 - 30\text{m/s}$), une procédure d’arrêt est effectuée afin d’éviter toute destruction de l’éolienne, les pales de l’éolienne sont signalées ($\beta = 90^\circ$) [8][22].

2.3 Modélisation de la turbine

Le modèle de l’éolienne doit représenter tous les composants du système d’éoliennes (Figure 2.4). Les éoliennes installées sont généralement constituées de trois pales qui tournent sur leur axe selon un angle β , commandées par un système électromagnétique [23][24].

Le système étudié ici, consiste en une turbine éolienne avec des pales de longueur R entraînant un générateur par l’intermédiaire d’un multiplicateur de vitesse de gain G .

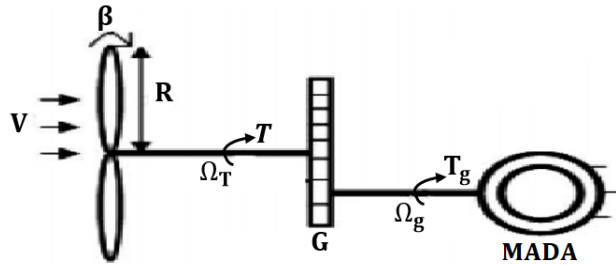


FIGURE 2.4 – Schéma d’une turbine éolienne

L’éolienne capte l’énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait

tourner les pales du rotor. Le couple aérodynamique donné par :

$$T = \frac{1}{2 \cdot \Omega_T} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.9)$$

Ω_T : est la vitesse de la turbine.

ρ : est la densité de l'air (environ $1,22 \text{ kg/m}^3$ à la pression atmosphérique à 15°C).

A : est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est la longueur de des pales.

V : est la vitesse du vent.

C_p : est le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend de la taille de la pale, du rapport de vitesse λ et de l'angle d'orientation de la pale β .

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. L'évolution du coefficient de puissance est spécifique à chaque éolienne. L'expression du coefficient de puissance utilisée dans cette étude a été approchée par l'équation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.46 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) \cdot e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (2.10)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.02 \cdot \beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \quad (2.11)$$

La figure montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs de β . Un coefficient de puissance maximum de 0,44 est obtenu pour un rapport de vitesse λ de 7,2 (λ_{opt}). En réglant respectivement β et λ à leurs valeurs optimales, le système d'énergie éolienne fournira une puissance électrique optimale [20][25].

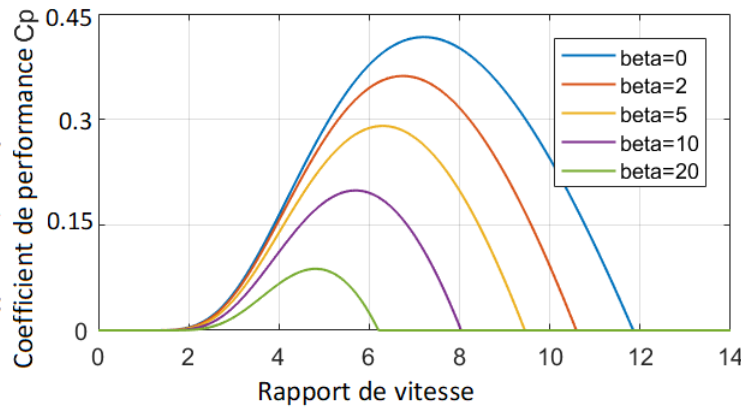


FIGURE 2.5 – Courbe du coefficient de performance en fonction de la vitesse et de l'angle β

2.4 Modélisation du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre mécanique de l'éolienne (basse vitesse Ω_T) en l'arbre mécanique du rotor du générateur (haute vitesse Ω) avec un rapport de vitesse G [23][26]. Ceci est mathématiquement traduit dans les équations :

$$\Omega = G.\Omega_T \quad (2.12)$$

$$T_g = G.T_{em} \quad (2.13)$$

2.5 Modélisation de l'arbre mécanique

La transmission de puissance est composée de l'inertie du rotor de la turbine et de l'inertie du générateur. Le modèle mécanique équivalent proposé intègre ces deux inerties [20][23].

$$\Omega = \frac{J_T}{G^2} + J_g \quad (2.14)$$

Il faut noter que l'inertie du rotor du générateur est très faible par rapport à l'inertie de la turbine portée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique (T_{mec}) appliqué au rotor :

$$J.\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_{mec} \quad (2.15)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor du générateur. Ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique T_{em} produit par le générateur, le couple de frottement visqueux T_f et le couple du multiplicateur de vitesse T_g .

$$T_{mec} = T_g - T_{em} - T_f \quad (2.16)$$

Où l'expression de T_f est :

$$T_f = f.\Omega_{mec} \quad (2.17)$$

f : est le coefficient de frottement équivalent de l'arbre égal à :

$$f = \frac{f_T}{G^2} + f_g \quad (2.18)$$

Où f_T et f_g sont les coefficients de frottement de la turbine et du générateur respectivement.

Le schéma fonctionnel correspondant à tous ces modèles est présenté à la figure (2.6).

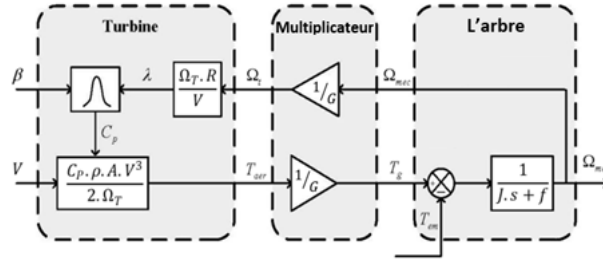


FIGURE 2.6 – Schéma fonctionnel de l'arbre mécanique

2.6 Stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse

La courbe caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est sous forme de cloche. Alors le système doit chercher la puissance maximale pour chaque vitesse de vent, ce qui est équivalent à trouver la vitesse de rotation optimale [28].

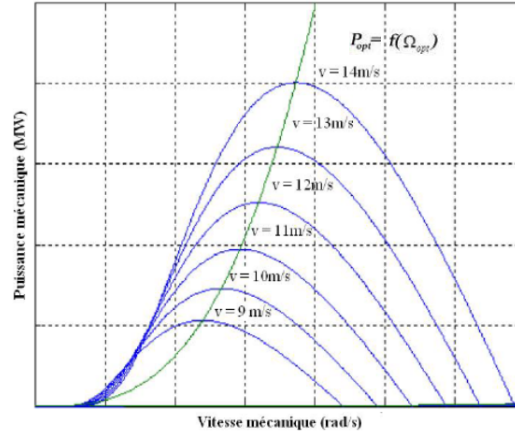


FIGURE 2.7 – Courbe de puissance d'une éolienne pour différents vitesses du vent

La figure ci-dessus représente les courbes caractéristiques de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse de rotation de la turbine. Pour chaque vitesse de vent donnée il y a une courbe caractéristique, et les sommets de ces courbes caractéristiques sont les points optimaux recherchés, ils définissent une courbe (en vert) dite la courbe de puissance optimale définie par l'équation [28][29] :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (2.19)$$

La commande Maximum Power Point Tracking (MPPT) est introduite ici pour faire le suivi de cette courbe. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée.

Par hypothèse, la vitesse du vent varie très peu en régime permanent, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul [29]. Dans ce cas, l'équation dynamique de la turbine devient :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = T_r - T_{em} - T_v = 0 \quad (2.20)$$

En négligeant l'effet du couple des frottements visqueux (T_v), le couple électromagnétique est égal au couple mécanique :

$$T_{em} = T_r = \frac{T_r}{N} \quad (2.21)$$

À partir d'une estimation du couple mécanique, le couple électromagnétique de référence en fonction du coefficient de puissance maximal s'exprime :

$$T_{em_{ref}} = \frac{T_{t_{estim}}}{N} = \frac{1}{2\Omega_{t_{estim}} \cdot N} C_{p_{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad (2.22)$$

La vitesse du vent V_v et la vitesse de rotation de la turbine éolienne $\Omega_{t_{estim}}$ peuvent être estimées à partir de la mesure de la vitesse de rotation du rotor de la MADA $\Omega_{r_{estim}}$:

$$\Omega_{t_{estim}} = \frac{\Omega_{r_{estim}}}{N} \quad (2.23)$$

$$V_v = \frac{R \cdot \Omega_{t_{estim}}}{\lambda_{opt}} \quad (2.24)$$

Le couple électromagnétique de référence aura pour expression :

$$T_{em_{ref}} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3 \cdot N^3} C_{p_{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{r_{mesure}}^2 \quad (2.25)$$

La figure suivante représente le schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite du vent sans asservissement de la vitesse :

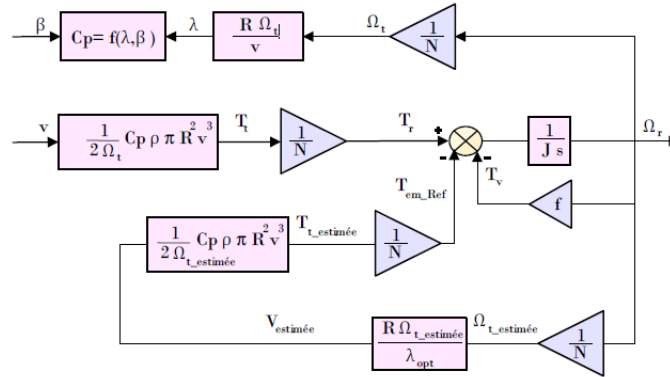


FIGURE 2.8 – Schéma bloc de la stratégie MPPT sans asservissement de la vitesse

2.7 Structure de la MADA

La machine asynchrone à rotor bobiné se compose d'un stator analogue à celui des machines triphasées classiques, constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles se trouvent les enroulements triphasés. Le rotor de cette machine est constitué de trois enroulements disposés de la même manière que les enroulements statoriques, connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par le biais des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais [30][31].

Comme son nom l'indique, cette machine permet d'être alimentée par deux sources différentes. Le stator est généralement raccordé au réseau alors que le couplage du rotor peut se faire de plusieurs manières [5][8][30][32] :

2.7.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Dans cette configuration le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur qui est couplé à une charge résistive par le biais d'un hacheur. Le hacheur permet le fonctionnement à vitesse variable varier, et le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Il reste que la puissance extraite du rotor est dissipée dans la résistance, ce qui abaisse le rendement du système.

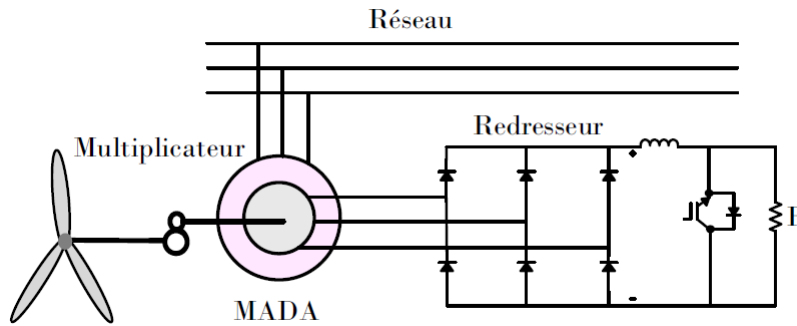


FIGURE 2.9 – MADA à énergie rotorique dissipée

2.7.2 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Pour remédier à l'inconvénient de la perte d'énergie, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur mais ça reste que le redresseur est unidirectionnel, donc il ne permet le transfert de l'énergie que du rotor vers le réseau et fonctionnent seulement en mode hyper-synchrone.

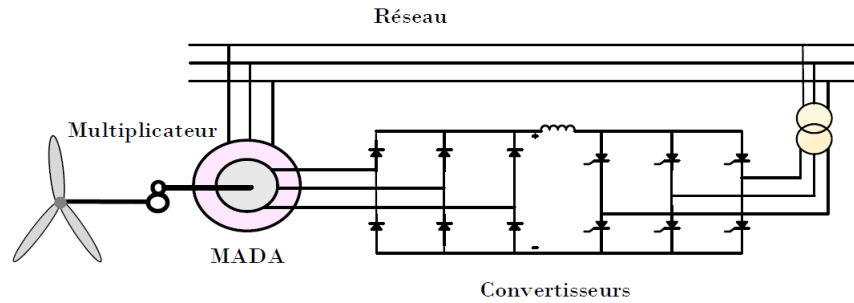


FIGURE 2.10 – Structure Kramer

2.7.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Le cycloconvertisseur dans cette structure a résolu le problème de l'irréversibilité d'échange d'énergie entre le rotor et le réseau, mais il a engendré des perturbations harmoniques importantes.

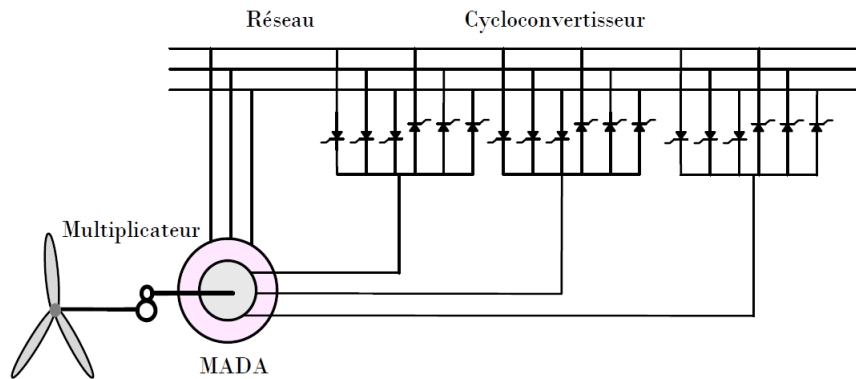


FIGURE 2.11 – Structure Scherbius avec cycloconvertisseur

2.7.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration repose sur l'introduction de deux convertisseurs de puissance commandé en MLI, et reliés entre eux par l'intermédiaire d'une capacité formant ainsi le bus continu. Les perturbations harmoniques sont réduites et les convertisseurs peuvent transiter que la puissance de glissement.

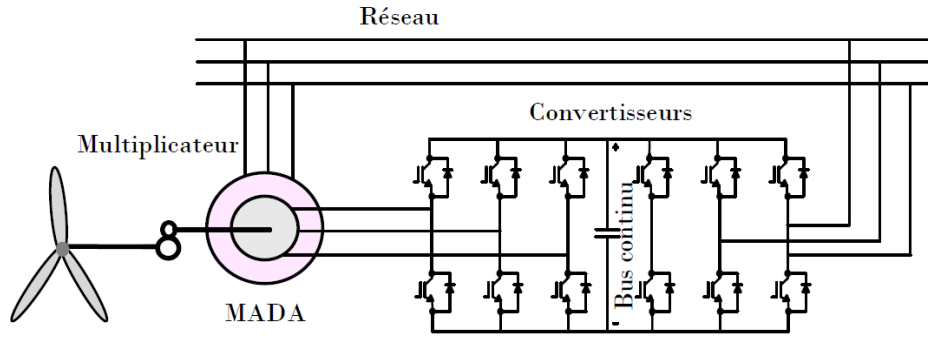


FIGURE 2.12 – Structure Scherbius avec convertisseur MLI

2.8 Modes de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique, elle fonctionne en mode moteur si la vitesse de rotation est en dessous de la vitesse de synchronisme, alors qu'elle fonctionne en mode génératrice si elle est en dessus de celle-ci. Contrairement, la MADA fonctionne en mode moteur ou génératrice indépendamment de la vitesse de rotation. La commande des tensions rotorique est assuré par le champ magnétique de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en mode moteur et génératrice hypo ou hyper synchrone. En mode moteur, la puissance est fournie au stator de la MADA par le réseau, alors qu'en mode générateur la puissance est fournie par la turbine éolienne [8][20][33].

2.8.1 Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

Dans ce mode de fonctionnement la puissance de glissement est réinjecter au réseau par les convertisseurs connectés au rotor.

2.8.2 Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Durant ce mode de fonctionnement, la puissance de glissement est fournie par le réseau au rotor de la machine via les convertisseurs pour la convertir en puissance mécanique entraînant ainsi le moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

2.8.3 Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone

La puissance est fournie au réseau par le stator, de même pour la puissance de glissement. Alor que une partie de la puissance fournie par l'éolienne est absorbée par le rotor.

2.8.4 Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone

Ici toute la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près, la puissance fournie au réseau à travers le stator et la puissance de glissement par le rotor.

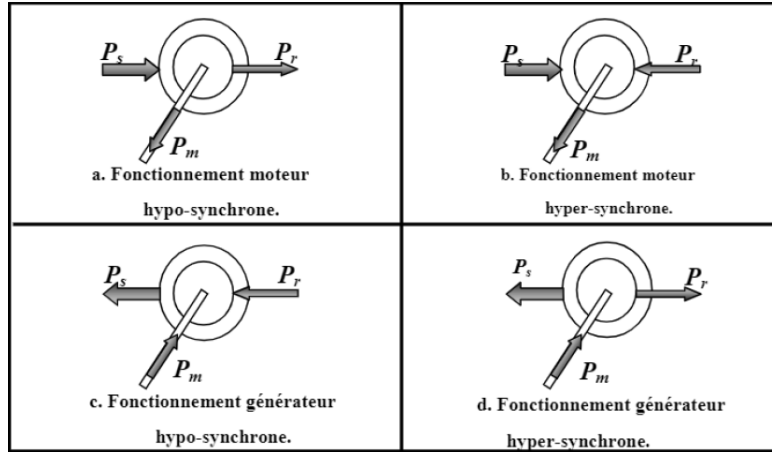


FIGURE 2.13 – Bilan de puissance de la MADA dans les différents modes de fonctionnement

2.8.5 Avantages des éoliennes à base de la MADA

- (+) Réduction du volume et du coût des convertisseurs.
- (+) Réduction des pertes à travers les convertisseurs.
- (+) Amélioration du rendement du système.
- (+) Contrôle indépendant de la puissance active et réactive.

2.9 Modélisation de la MADA

Pour simplifier la représentation de la MADA, on représente le stator et le rotor par trois enroulements statorique et rotorique décalé de 120° l'un par rapport à l'autre [8][34][35][36].

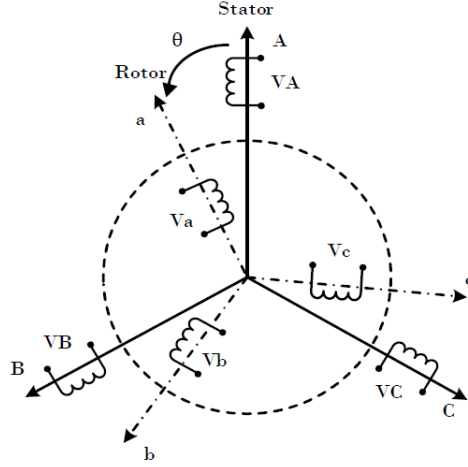


FIGURE 2.14 – Les enroulements statoriques et rotoriques de la MADA

La relation entre le flux magnétique Φ et la force électromotrice e développée au niveau d'un bobinage est donnée par la loi de Faraday :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.26)$$

En se basant sur le circuit électrique équivalent représenté ci-dessous :

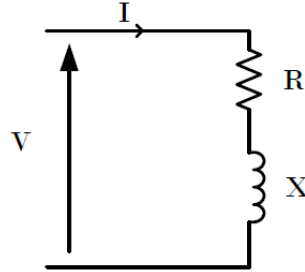


FIGURE 2.15 – Circuit équivalent d'un enroulement statorique et rotorique

En appliquant la loi des mailles on trouve :

$$-e = \frac{d\Phi}{dt} = V - R \cdot I \quad (2.27)$$

En appliquant cette loi aux enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, nous obtenons, dans un repère triphasé, les équations générales de la machine :

$$\frac{d}{dt}[\Phi_s] = [V_s]_3 - R_s \cdot [I_s]_3 \quad (2.28)$$

$$\frac{d}{dt}[\Phi_r] = [V_r]_3 - R_r \cdot [I_r]_3 \quad (2.29)$$

Tel que :

Φ_s, V_s, I_s et R_s représentent respectivement : le flux, la tension et le courant et la résistance du stator.

Φ_r, V_r, I_r et R_r représentent respectivement : le flux, la tension, le courant et la résistance du rotor.

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants comme suit :

$$[\Phi_s]_3 = L_s \cdot [I_s]_3 - L_m \cdot [I_r]_3 \quad (2.30)$$

$$[\Phi_r]_3 = L_m \cdot [I_s]_3 - L_r \cdot [I_r]_3 \quad (2.31)$$

Avec

$$L_s = l_s - M_s \quad (2.32)$$

$$L_r = l_r - M_r \quad (2.33)$$

$$L_m = \frac{3}{2} M_s r \quad (2.34)$$

l_s, M_s , et L_s sont : les inductances propres, mutuelles entre deux phases et cycliques statoriques.

l_r, M_r , et L_r sont : les inductances propres, mutuelles entre deux phases et cycliques rotoriques.

$M_s r$ est l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

L_m représente l'inductance magnétisante exprimée en fonction de l'inductance mutuelle.

2.10 Commande vectorielle de la MADA

Le contrôle vectoriel basé sur l'orientation du flux du stator permet de contrôler de manière indépendante le couple électromagnétique par le convertisseur de puissance du coté rotor et la puissance réactive [37]. Les courants sont asservis par deux correcteurs qui déterminent les références des tensions à appliquer $v_{rd_{ref}}, v_{rq_{ref}}$. Le courant dans l'axe en quadrature permet de contrôler le couple électromagnétique. Celui dans l'axe direct est utilisé pour contrôler la puissance réactive.

Le modèle électrique général de la MADA obtenu par la transformation de Park (Annexe A) est donné par les équations suivantes [38][39] :

Tension du stator et rotor :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (2.35)$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \quad (2.36)$$

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \Phi_{rq} \quad (2.37)$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \Phi_{rd} \quad (2.38)$$

Flux statorique et rotorique :

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \quad (2.39)$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \quad (2.40)$$

$$\Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \quad (2.41)$$

$$\Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \quad (2.42)$$

Le couple électromagnétique :

$$T_{em} = p(\Phi_{sd} \cdot i_{sq} - \Phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (2.43)$$

d et q représente l'axe d et q respectivement.

La transformé de Park fait de sorte que le flux soit orienté seulement selon l'axe d :

$$\Phi_{sd} = \Phi_s \quad (2.44)$$

$$\Phi_{sq} = 0 \quad (2.45)$$

De cette hypothèse on peut écrire :

$$\Phi_s = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \quad (2.46)$$

$$0 = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \quad (2.47)$$

Par hypothèse la résistance statorique R_s est négligeable, alors que les tensions imposées par le réseau sont sinusoïdales et de fréquence constante, donc on peut dire que la variation du flux statorique Φ_s est nulle :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_s}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} = 0 \quad (2.48)$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_s = \omega_s \cdot \Phi_s \quad (2.49)$$

À partir des équations (2.46) et (2.47), nous obtenons :

$$i_{sd} = \frac{\Phi_s}{L_s} + \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \quad (2.50)$$

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (2.51)$$

En remplaçant les équations (2.50) et (51) dans les équations (2.41) et (2.42) nous trouverons :

$$\Phi_{rd} = L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) \cdot i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_s = L_r \cdot \sigma \cdot i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_s \quad (2.52)$$

$$\Phi_{rq} = L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right) \cdot i_{rq} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{rq} \quad (2.53)$$

Avec $\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r} \right)$ est le coefficient de dispersion.

Ainsi, les tensions rotorique deviennent :

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + L_r \cdot \sigma \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot L_r \cdot \sigma \cdot i_{rq} \quad (2.54)$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + L_r \cdot \sigma \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot L_r \cdot i_{rd} + \omega_r \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot \Phi_s \quad (2.55)$$

Le couple électromagnétique devient :

$$T_{em} = -p \cdot \Phi_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (2.56)$$

Les forces électromotrice sont données par :

$$e_d = L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{rq} \quad (2.57)$$

$$e_q = -L_r \cdot \omega_r \cdot \sigma \cdot i_{rd} \quad (2.58)$$

$$e_\Phi = \frac{L_m}{L_s} \cdot \omega_r \cdot \Phi_s \quad (2.59)$$

Les expressions des puissances actives et réactives sont :

$$P_s = v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq} \quad (2.60)$$

$$Q_s = v_{sq} \cdot i_{sd} - v_{sd} \cdot i_{sq} \quad (2.61)$$

Sachant que dans le repère de Park le flux est orienté selon le flux statorique et en remplaçant les équations (50) et (51) dans (2.60) et (2.61) :

$$P_s = -v_s \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rq} \quad (2.62)$$

$$Q_s = v_s \left(\frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rd} \right) \quad (2.63)$$

Donc pour contrôler la puissance active et réactive du stator on doit agir sur les courants rotorique.

D'après les équations établies, si on a un réseau stable connecté au stator de la MADA le flux Φ_{sd} reste constant, donc le couple électromagnétique produit et la puissance active statorique dans le repère d-q seront proportionnelle au courant rotorique selon l'axe q. Tandis que la puissance réactive elle n'est pas proportionnelle au courant rotorique d'axe q mais plutôt d'axe d. De ce fait les puissances statorique peuvent être contrôlées indépendamment l'une de l'autre. Ainsi, un contrôle des courants rotoriques peut être mis en place de façon que les courants soient commandés indépendamment avec deux régulateurs différents [38].

2.11 Modélisation du convertisseur côté réseau, du filtre et du réseau

La figure suivante représente le CCR, filtre et le réseau. Étant donné que le réseau est équilibré on retrouve le système matriciel suivant [8] :

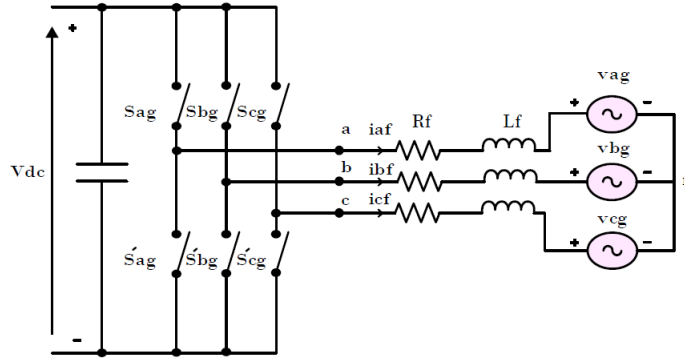


FIGURE 2.16 – Modèle du convertisseur côté réseau, filtre et le réseau

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ag} \\ S_{bg} \\ S_{cg} \end{bmatrix}$$

Avec v_{an}, v_{bn} et v_{cn} sont les tensions entre chaque phase du convertisseur et le point neutre n . V_{dc} est la tension du bus continu. Les variables S_{ag}, S_{bg} et S_{cg} prennent la valeur 1 si l'interrupteur est fermé ou 0 s'il est ouvert.

Le modèle simplifier de ce système est représenté dans la figure ci-dessous :

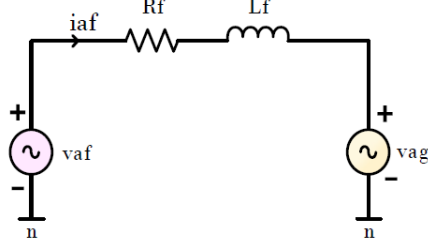


FIGURE 2.17 – Modèle équivalent d'une phase

Ce système peut être représenté sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{af} \\ v_{bf} \\ v_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{af} \\ i_{bf} \\ i_{cf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_{af}/dt \\ di_{bf}/dt \\ di_{cf}/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix}$$

Avec : R_f et L_f sont respectivement la résistance et l'inductance du filtre.

i_{af}, i_{bf} et i_{cf} sont les courants de sortie de l'onduleur.

v_{ag}, v_{bg} et v_{cg} sont les tensions du réseau.

2.12 Modélisation du convertisseur côté machine et du bus continu

La CCM est représenté sur la figure ci-dessous. De même que la modélisation du CCR, on retrouvera un système matriciel identique à celui-ci [23] :

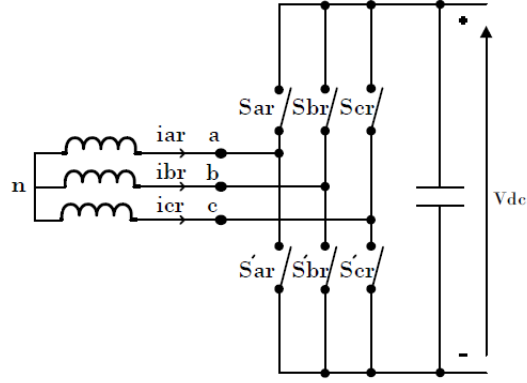


FIGURE 2.18 – Modèle du convertisseur coté machine

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ar} \\ S_{br} \\ S_{cr} \end{bmatrix}$$

La représentation du bus continu est donnée par le schéma suivant :

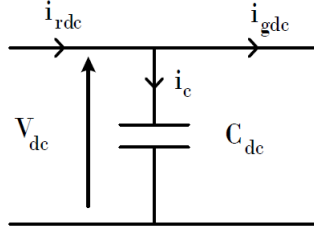


FIGURE 2.19 – Modèle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int i_c dt \quad (2.64)$$

Avec

$$i_c = i_{rdc} - i_{gdc} \quad (2.65)$$

Tel que :

i_{rdc} est le courant qui circule du CCM vers le bus continu.

i_{gdc} est le courant qui circule du le bus continu vers le CCR.

$$i_{rdc} = S_{ar} \cdot i_{ar} + S_{br} \cdot i_{br} + S_{cr} \cdot i_{cr} \quad (2.66)$$

$$i_{gdc} = S_{ag} \cdot i_{af} + S_{bg} \cdot i_{bf} + S_{cg} \cdot i_{cf} \quad (2.67)$$

2.13 Convertisseur DC/AC Onduleur à deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux, l'onduleur est un montage d'électronique de puissance qui convertit une puissance continue en une puissance alternative à la tension et à la fréquence de sortie souhaitées. La tension de sortie en courant alternatif peut être à fréquence fixe ou variable. Ce dispositif est constitué des interrupteurs qui peuvent être réalisés par des IGBT commandé à l'ouverture et à la fermeture en forte puissance. Afin de permettre une réversibilité en courant, il faut ajouter aux IGBT des diodes antiparallèle [40].

Pour régler l'amplitude et la fréquence de la tension statorique de la MADA, il faut agir simultanément sur la fréquence de la tension rotorique [8]. L'entrée continue de l'onduleur est fournie à travers un redresseur à diode, puis à sa sortie il génère une tension périodique proche d'une sinusoïde avec la fréquence désirée, l'onduleur étudié dans notre cas est constitué de trois cellules de commutation dont les commandes sont décalées entre elles d'un tiers de période permettent de reconstituer un système triphasé de tensions et de courants. Chaque cellule est composée de deux interrupteurs, tel que la commande des interrupteurs de la même branche doit être complémentaire pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit.

Les pertes dans ces dispositifs à semi-conducteurs sont très faibles et, par conséquent, ils ont un rendement plus élevé avec une capacité de traitement de puissance beaucoup plus importante. Il existe trois configurations de base pour les onduleurs triphasés à ondes carrées : la configuration à charge centrale, la configuration à alimentation centrale et la configuration en pont [20].

En les allumant et en les éteignant de manière séquentielle, la tension aux bornes de la charge change de polarité de manière cyclique et produit une tension/courant alternatif. Le principal inconvénient de la configuration à prise centrale est qu'elle nécessite un transformateur/alimentation à prise centrale et des transistors à tension nominale plus élevée. Cette limitation peut être surmontée par des onduleurs de type pont. Dans les onduleurs en pont, il y a six transistors pour un fonctionnement triphasé au lieu de trois comme dans les onduleurs à prise centrale [8][41]. La figure suivante illustre un onduleur triphasé monté en pont :

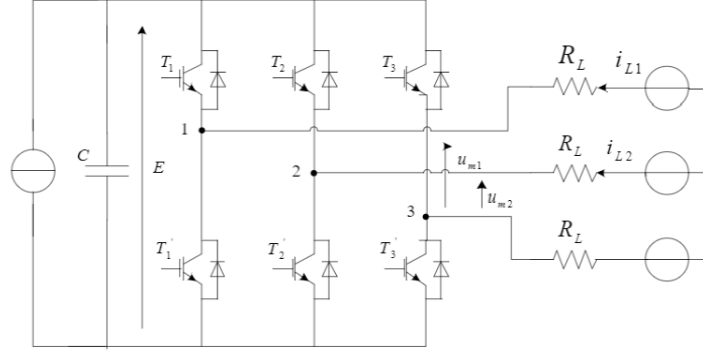


FIGURE 2.20 – Schéma d'un onduleur triphasé à deux niveaux

Le schéma simplifier est représenté ci-dessous :

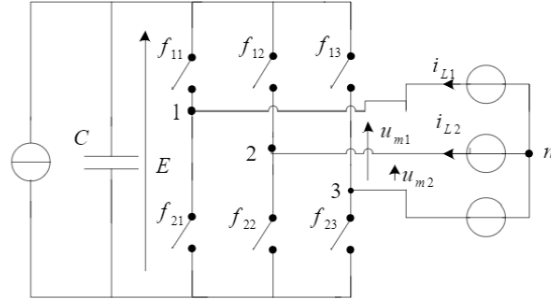


FIGURE 2.21 – Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Les tensions modulées U_{m1} et U_{m2} sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$U_{m1} = U_{31} = m_1 \cdot E \quad (2.68)$$

$$U_{m2} = U_{23} = m_2 \cdot E \quad (2.69)$$

m_1 et m_2 sont les fonction de conversions et défini par :

$$m_1 = f_{11} - f_{13} \quad (2.70)$$

$$m_2 = f_{12} - f_{13} \quad (2.71)$$

Les tensions simples sont déduites à partir des tensions modulées comme suit :

$$U_{1n} = \frac{2}{3}U_{31} - \frac{1}{3}U_{23} \quad (2.72)$$

$$U_{2n} = \frac{2}{3}U_{23} - \frac{1}{3}U_{31} \quad (2.73)$$

Les huit états de commutation des interrupteurs du convertisseur et les tensions modulées correspondantes sont illustrés dans le tableau suivant :

f_{11}	f_{12}	f_{13}	m_1	m_2	U_{m_1}	U_{m_2}	$\vec{U}$
0	0	0	0	0	0	0	$\vec{U}_0$
0	1	0	0	1	0	E	$\vec{U}_1$
1	1	0	1	1	E	E	$\vec{U}_2$
1	0	0	1	0	E	0	$\vec{U}_3$
1	0	1	0	-1	0	-E	$\vec{U}_4$
0	0	1	-1	-1	-E	-E	$\vec{U}_5$
0	1	1	-1	0	-E	0	$\vec{U}_6$
1	1	1	0	0	0	0	$\vec{U}_8$

TABLE 2.1 – Les états de commutations des interrupteurs

2.14 Commande MLI appliqué à un onduleur triphasé a deux niveaux

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est une technique qui se caractérise par la génération d'une impulsion d'amplitude constante en modulant la durée de l'impulsion par la modulation du rapport cyclique [5]. Le contrôle de la MLI nécessite la génération de signaux de référence et de signaux porteurs qui sont introduits dans le comparateur et, sur la base d'une sortie logique, la sortie finale est générée. Le signal de référence est le signal de sortie souhaité, qu'il soit sinusoïdal ou carré, tandis que le signal porteur est une onde en dents de scie ou triangulaire à une fréquence nettement supérieure à celle de la référence [20].

Les formes d'onde de tension des onduleurs pratiques sont cependant non sinusoïdales et contiennent certaines harmoniques. Les tensions d'ondes carrées ou quasi carrées sont acceptables pour les applications de faible et moyenne puissance, et pour les applications de forte puissance, des formes d'ondes sinusoïdales faibles et déformées sont nécessaires. La fréquence de sortie de l'onduleur est déterminée par la vitesse à laquelle les dispositifs à semi-conducteurs sont commandés à l'ouverture et à la fermeture et par conséquent, une sortie courant alternative à fréquence réglable est facilement fournie [5].

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire utilisée dans cette commande, basée sur la comparaison des tensions de références avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixes.

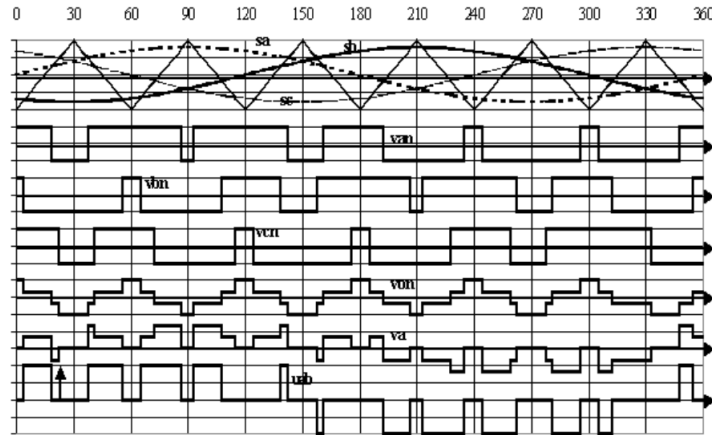


FIGURE 2.22 – Principe de la commande MLI et les tensions de sortie du convertisseur

Le principal intérêt de la technique MLI est de limiter la chauffe des composants électroniques [8]. La commande d'actionneurs de puissance par MLI est très liée à la notion de fréquence. Pour que l'impression d'une valeur moyenne constante d'allumage apparaisse, il faut que l'alternance d'allumage/extinction soit suffisamment rapide pour qu'elle ne se remarque pas [5]. Selon les utilisations la fréquence du MLI va de 100 Hz à 200 kHz. Un exemple d'une lampe de 20 Watts allumée au maximum consomme 20 W. Si par une commande de gradation elle est allumée au quart de sa puissance, elle consomme 5 W. Le composant analogique devrait alors dissiper 15 W, ce qui implique un énorme radiateur. En MLI, la puissance fournie est soit maximale, soit nulle. Lorsqu'elle est maximale, pendant un quart du temps par exemple, il n'y a pas besoin de dissiper de puissance résiduelle. Lorsqu'elle est nulle, il n'y a pas besoin de dissiper non plus de puissance, car elle n'est pas fournie du tout.

Un autre intérêt des onduleurs MLI, c'est qu'ils sont capables de produire des tensions alternatives d'amplitude variable ainsi que de fréquence variable [20]. La qualité de la tension de sortie peut également être grandement améliorée, par rapport à celle des onduleurs à ondes carrées. Les onduleurs MLI sont très couramment utilisés dans les charges d'entraînement de moteurs à courant alternatif à vitesse réglable, où l'on doit alimenter le moteur avec une tension variable, une alimentation à fréquence variable.

Pour une grande variation de la vitesse d'entraînement, la fréquence de la tension alternative appliquée doit être variée sur une large gamme. La tension appliquée doit également varier de façon presque linéaire avec la fréquence. Les variateurs MLI peuvent être de type monophasé ou triphasé. Les onduleurs MLI sont très couramment utilisés dans les charges d'entraînement de moteurs à courant alternatif à vitesse réglable, où il faut alimenter le moteur avec une tension variable, une alimentation à fréquence variable.

2.15 Calcul des puissances nécessaires à la compensation du déséquilibre dans le réseau

La théorie $p-q$ est basée sur un ensemble des puissances instantanées définies dans le domaine temporel. En utilisant la théorie $p-q$ instantanée qui se base sur l'application de la transformée de Clarke des tensions et courants de charges, pour faire le passage du repère (abc) au repère $(\alpha - \beta)$ (Annexe A). On calcule les valeurs des composante active, réactive et du déséquilibre [41][42][43].

Cette section sera plus détaillée dans le Master [14].

2.16 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents composants du système éolien. Nous avons commencé par la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie du système éolien. Ensuite, nous avons développé le modèle de la MADA, tel que son rotor est raccordé au réseau par un filtre RL à travers des convertisseurs contrôlés en MLI et reliés par un bus continu, que nous avons tous les modélisés.

Un modèle mathématique de la MADA a été établi en se basant principalement sur les équations électriques de la machine. Le modèle développé est basé sur la théorie $p-q$ qui repose sur la transformation de Park. Les expressions du flux de puissance et du couple électromagnétique de la machine ont été établies. Et on a déduit à partir des bilans de puissances les relations entre les puissances actives et réactives, statoriques et rotoriques.

La technique de la MPPT consiste à extraire le maximum de la puissance du vent disponible au niveau des pales de la turbine éolienne en maximisant le coefficient de puissance qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine et qui est défini comme étant le rapport de la puissance de l'éolienne divisée par la puissance du vent.

Sachant que la puissance du déséquilibre peut être fournie dans les limites constructives de la MADA et du CCR. Et afin de faire participer l'éolienne à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique du réseau, on a opté pour l'injection de la puissance active maximale, tout en prenant compte de la puissance nécessaire à l'élimination du déséquilibre dans le réseau électrique.

Chapitre 3

Le contrôle des convertisseurs et du bus continu

3.1 Introduction

Le contrôle des puissances actives et réactives du système éolien peut se faire de façon indépendante l'une par rapport à l'autre. La stratégie de la commande vectorielle à flux orienté qu'elle a été appliquée à la MADA, elle nous a permis d'obtenir le mode de fonctionnement recherché. Partant de l'hypothèse où le flux est maintenu constant, la puissance active dépendra uniquement du courant rotorique selon l'axe q .

La simplicité et la rapidité à mettre en œuvre tout en offrant de bonnes performances, sont des avantages de la régulation Proportionnel Intégral (PI), de ce fait il apparaît judicieux d'utiliser une telle régulation dans la commande de notre MADA. Quatre régulateurs PI ont été utilisés. Dans ce chapitre, on va détailler le contrôle des convertisseurs côté réseau, et côté machine. Puis, on fera une synthèse des correcteurs PI utilisés dans la commande des courants du CCM, CCR.

Enfin, des simulations à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK seront effectuées, afin d'évaluer la possibilité d'éliminer le déséquilibre dans le réseau électrique par notre système dans différentes conditions (une charge faiblement déséquilibrée, changement brusque de charge, de l'angle β , de la vitesse du vent et pour une charge fortement déséquilibrée). Des simulations seront faites pour juger l'efficacité de la MPPT à extraire la puissance maximale disponible dans plusieurs cas de changement de vitesse du vent.

3.2 Contrôle du convertisseur côté machine

Le réseau électrique raccordé au stator de notre éolienne est supposé être stable et de forte puissance, donc v_s sera considérée comme constante. Sachant que pour contrôler les puissances statoriques de la MADA, il faut agir sur les composantes du courant

rotorique, selon l'axe q pour la puissance active et selon l'axe d pour la puissance réactive [8][20].

Pour générer les courants rotorique de référence dans le repère (dq), il faut avoir une puissance active et réactive statorique de référence. Des équations des puissances active et réactive (2.62) et (2.63), on peut définir les courants rotorique de référence comme suit :

$$i_{rq_ref} = -\frac{L_s}{L_m \cdot v_s} \cdot P_{s_ref} \quad (3.1)$$

$$i_{rd_ref} = -\frac{L_s}{L_m \cdot v_s} \cdot Q_{s_ref} + \frac{\Phi_s}{L_m} \quad (3.2)$$

La simplicité et la rapidité à mettre en œuvre tout en offrant de bonnes performances, sont des avantages de la régulation Proportionnel Intégral (PI), de ce fait il apparaît judicieux d'utiliser une telle régulation dans la commande de notre MADA [51]. Deux régulateurs PI sont utilisés afin d'assurer le contrôle des courants rotoriques. On note que le contrôle du système doit prendre en considération les termes de couplage $\tilde{e}_d, \tilde{e}_q$ et $\tilde{e}_\phi$ la force électromotrice $\tilde{e}_\phi$ étant dépendante de la vitesse de rotation dans les équations sont respectivement (2.57), (2.58) et (2.59) [44].

La figure ci-dessous représente la commande du CCM :

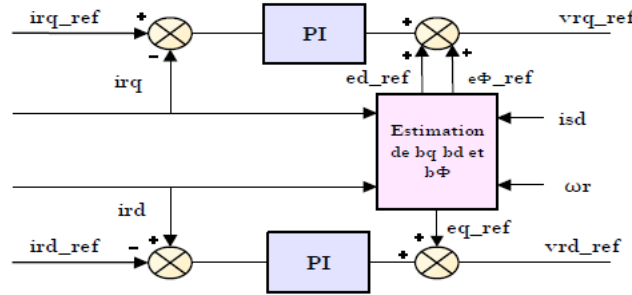


FIGURE 3.1 – Schéma de commande du convertisseur côté réseau

Une fois les tensions de référence du convertisseur calculées dans le repère (dq), la transformée de Park inverse est appliquée pour obtenir les tensions de références triphasées. Le principe de la MLI est d'appliquer ici, et qui consiste à comparer ces tensions à une porteuse afin de générer les ordres de commande pour les interrupteurs.

3.3 Contrôle du convertisseur côté réseau

En appliquant la transformée de Park au système matriciel modélisant le CCR, le filtre et le réseau, et que le repère de Park soit orienté selon le vecteur tension du réseau de manière à ce que sa composante en quadrature soit nulle [45][46] :

$$v_{gd} = v_s \quad (3.3)$$

$$v_{gq} = 0 \quad (3.4)$$

Il est possible de représenter ce système matriciel par des équations dans le repère (dq) tournant à une vitesse angulaire $\omega_s(rad/s)$:

$$v_{fd} = R_f \cdot i_{fd} + L_f \frac{di_{fd}}{dt} - \omega_s \cdot L_f \cdot i_{fq} + v_s \quad (3.5)$$

$$v_{fq} = R_f \cdot i_{fq} + L_f \frac{di_{fq}}{dt} + \omega_s \cdot L_f \cdot i_{fd} \quad (3.6)$$

Les puissances active et réactive qui transitent à travers ce convertisseur seront exprimées par les équations suivantes :

$$P_f = v_{fd} \cdot i_{fd} + v_{fq} \cdot i_{fq} \quad (3.7)$$

$$Q_f = v_{fq} \cdot i_{fd} - v_{fd} \cdot i_{fq} \quad (3.8)$$

Ce contrôle vectoriel permet un contrôle découplé indépendant de la puissance active et réactive circulant entre le réseau et le convertisseur [55]. La relation entre la composante directe du courant du CCR et la puissance active, et celle entre la composante en quadrature du courant du CCR et la puissance réactive sont [20] :

$$P_f = v_s \cdot i_{fd} \quad (3.9)$$

$$Q_f = -v_s \cdot i_{fq} \quad (3.10)$$

Les courants de références i_{fd_ref} et i_{fq_ref} peuvent être obtenues à partir des puissances de références active P_{f_ref} et réactive Q_{f_ref} :

$$i_{fd_ref} = \frac{P_{f_ref}}{v_s} \quad (3.11)$$

$$i_{fq_ref} = -\frac{Q_{f_ref}}{v_s} \quad (3.12)$$

Le courant d'axe en quadrature est utilisé pour réguler la tension du bus continu et celui d'axe direct pour réguler la puissance réactive.

Les courants sont asservis par deux correcteurs (PI), les correcteurs reçoivent à leur entrée l'erreur entre la composante directe (ou en quadrature) du courant mesuré et sa référence, et qui génèrent à leur sortie des tensions références à appliquer v_{fd_ref} et v_{fq_ref} . Puis en utilisant la transformée de Park inverse on passe au repère triphasé pour comparer ces tensions à une porteuse afin de générer les commandes des interrupteurs. La Figure suivante illustre le schéma de commande adopté :

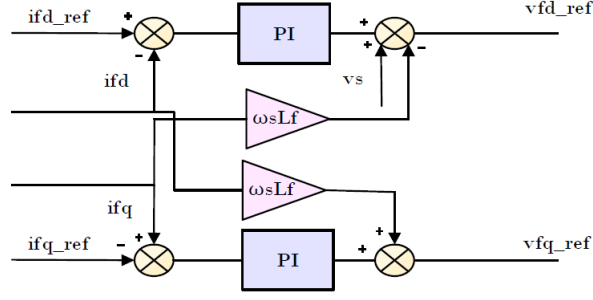


FIGURE 3.2 – Schéma de commande du convertisseur côté machine

3.4 Synthèse du correcteur PI

La régulation Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour la commande vectorielle du système éolien, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. Ces correcteurs sont calculés pour ne pas créer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs tout en assurent les performances suivantes [44][47] :

- ▷ Erreur statique nulle
- ▷ Stabilité
- ▷ Temps de réponse

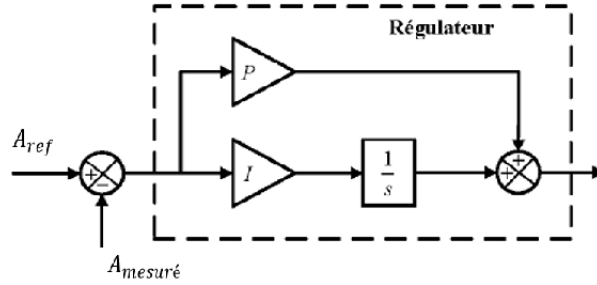


FIGURE 3.3 – Schéma bloc d'un régulateur PI

La forme du correcteur est la suivante :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.13)$$

Tel que :

K_p Le gain proportionnel du régulateur.

K_i Le gain intégral du régulateur.

Pour une fonction de transfert d'un processus associée à ce correcteur :

$$H(s) = \frac{K}{1 + \tau \cdot s} \quad (3.14)$$

La fonction de transfert en boucle ouvert s'écrit :

$$FTBO = \frac{K \cdot (K_p + \frac{K_i}{s})}{1 + \tau \cdot s} = K \cdot K_i \frac{1 + \frac{K_p \cdot s}{K_i}}{s \cdot (1 + \tau \cdot s)} \quad (3.15)$$

La méthode de compensation de pôles avec le zéro est adoptée pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Soit : $\tau = \frac{K_p}{K_i}$ La fonction de transfert en boucle ouvert devient :

$$FTBO = \frac{K \cdot K_i}{s} \quad (3.16)$$

Et en boucle fermée devient :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{1}{K \cdot K_i} s} \quad (3.17)$$

Le temps de réponse du système pour atteindre 95% de la consigne vaut :

$$t_r = \frac{3\tau}{K_p \cdot K} \quad (3.18)$$

On peut calculer les gains proportionnelle et intégral de ces relations :

$$K_p = \frac{3\tau}{t_r \cdot K} \quad (3.19)$$

$$K_i = \frac{3}{t_r \cdot K} \quad (3.20)$$

3.4.1 Synthèse des correcteurs pour la commande des courants du CCM

Pour ce cas, la variable A_{ref} à contrôler est remplacée par $i_{rd}eti_{rq}$. Nous avons modélisé le convertisseur par un gain qui est considéré comme un gain unitaire. Les termes de compensation e_{rd} et e_{rq} compensent les perturbations afin de pouvoir découpler les deux axes (d) et (q). Cela permet de contrôler la puissance active et réactive statorique indépendamment [8][20]. En considérons que les perturbations sont bien compensées, le schéma bloc simplifiés et représentés dans la Figure suivante :

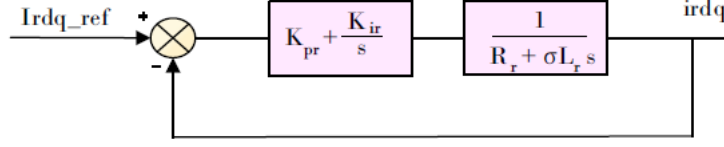


FIGURE 3.4 – Schéma simplifié de la régulation des courants rotoriques

La fonction de transfert en boucle ouverte du système est :

$$FTBO = \left(K_{pr} + \frac{K_{ir}}{S} \right) \left(\frac{1}{R_r + \sigma.L_r.S} \right) \quad (3.21)$$

La méthode de compensation de pôles avec le zéro est adoptée pour la synthèse du régulateur, donc la FTBO devient :

$$FTBO = K_{ir} \left(\frac{1 + \frac{K_{pr}}{K_{ir}}S}{S} \right) \left(\frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \frac{\sigma.L_r}{R_r}S} \right) \quad (3.22)$$

Afin d'éliminer le zéro de la FTBO, il faut que :

$$\frac{K_{pr}}{K_{ir}} = \frac{\sigma.L_r}{R_r} \quad (3.23)$$

Donc la FTBO devient après la compensation du zéro :

$$FTBO = \frac{K_{ir}}{R_r.S} \quad (3.24)$$

La fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{R_r}{K_{ir}}S} \quad (3.25)$$

Nous pouvons exprimer les coefficients des correcteurs PI en fonction du temps de réponse t_r du système pour atteindre 95% de la référence, et des paramètres de la MADA :

$$K_{pr} = \frac{3.\sigma.L_r}{t_r} \quad (3.26)$$

$$K_{ir} = \frac{3.R_r}{t_r} \quad (3.27)$$

3.4.2 Synthèse des correcteurs pour la commande des courants du CCR

Cette fois-ci, la variable A_{ref} à contrôler est remplacée par $i_{fdeti_{fq}}$. Nous avons modélisé l'onduleur par un gain unitaire et les termes $(e_{fd}ete_{fq})$ sont les termes de compensation et de découplage des deux axes (d) et (q). Le même raisonnement est utilisé afin de calculer les coefficients des correcteurs pour la commande des courants du CCR [20].

En considérons que les perturbations sont bien compensées, le schéma bloc simplifié est le suivant :

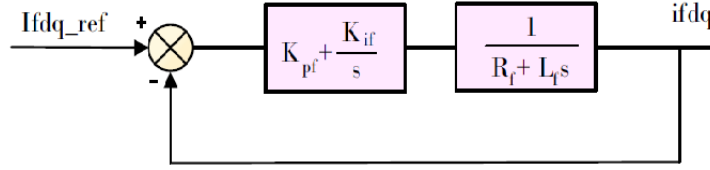


FIGURE 3.5 – Schéma simplifié de la régulation des courants du convertisseur côté réseau

Les mêmes démarches de calcul que dans le cas du CCM sont effectuées, et nous obtenons les coefficients des correcteurs exprimés en fonction du temps de réponse du système et des paramètres du filtre raccordant le convertisseur au réseau :

$$K_{pf} = \frac{3.L_f}{t_r} \quad (3.28)$$

$$K_{if} = \frac{3.R_f}{t_r} \quad (3.29)$$

3.5 Simulation

Pour concrétiser notre travail de recherche on a fait des simulations sous le logiciel Matlab/Simulink pour un système Eolien-MADA dont les paramètres sont les suivantes :

Paramètre	Valeur
Puissance mécanique nominale	2.4 MW
Diamètre du rotor	42 m
Plage de la vitesse du vent	3.5-12.1 m/s
Multiplicateur de vitesse	80
$C_{p_{max}}$	0.5
$\lambda_{C_{p_{max}}}$	9.15

TABLE 3.1 – Paramètres de l'éolienne

Paramètre	Valeur
Puissance statorique nominale	2 MW
Tension nominale d'une phase statorique	398.4 V (rms)
Courant statorique nominale	1760 A (rms)
Courant rotorique nominale	1823 A (rms)
Tension nominale d'une phase rotorique	488 V (rms)
Fréquence nominale du stator	50 Hz
Intervalle de la vitesse nominale du rotor	900-1800 rpm
Nombre de paires de pôles	2
Résistance de l'enroulement statorique	$2.6 \text{ m}\Omega$
Résistance de l'enroulement rotorique	$2.9 \text{ m}\Omega$
Inductance statorique	$87 \text{ }\mu\text{H}$
Inductance rotorique	$87 \text{ }\mu\text{H}$
Inductance de magnétisation	2.5 mH

TABLE 3.2 – Paramètres de la MADA

Paramètre	Valeur
Capacité du bus continu	$38000 \text{ }\mu\text{F}$
Tension de référence du bus continu	1200 V
Puissance apparente nominale	40% de la puissance apparente de la MADA
Inductance	0.6 mH
Résistance	$6 \text{ m}\Omega$

TABLE 3.3 – Paramètres du CCR

La figure ci-dessous représente notre système qui est composé d'une source de tension triphasé alimentant trois charges déséquilibrées, le stator de notre éolienne et le CCR sont raccordé au réseau triphasé :

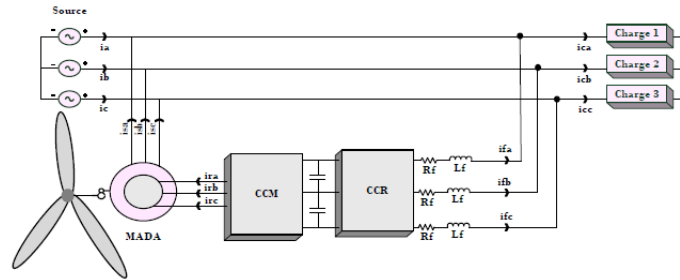


FIGURE 3.6 – Schéma du système éolien raccordé au réseau

La commande vectorielle utilisée dans le chapitre précédent nous a permis de contrôler indépendamment les puissances active et réactive échangées entre le réseau et le

système éolien, la stratégie de contrôle vectorielle avec orientation du flux statorique pour la MADA et à orientation avec la tension du réseau pour le CCR, a été appliquée en utilisant des correcteurs PI.

Pour évaluer les performances de la méthode MPPT à éliminer le déséquilibre tout en injectant la puissance active maximale disponible, une étude comparative relative aux courants du réseau, de la charge, du stator et du CCR a été réalisée pour cinq cas différents :

1. Charges faiblement déséquilibré.
2. Changement brusque de la charge.
3. Changement brutale de la vitesse du vent.
4. Changement rapide de l'angle des pales.
5. Charge fortement déséquilibré.

3.5.1 Elimination du déséquilibre à l'aide de notre éolienne pour une charge faiblement déséquilibré

Dans la première simulation, on a simulé un réseau électrique triphasé composé d'une source triphasées qui alimente des charge faiblement déséquilibrées, puis le système éolien établi il essaye d'éliminer ce déséquilibre, afin d'établir des comparaisons entre les différent simulations effectuer on prend ces courbe comme référence :

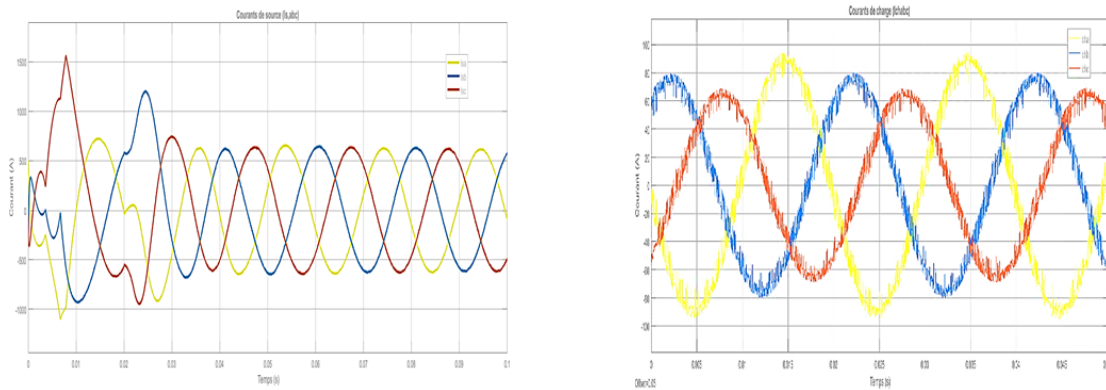


FIGURE 3.7 – Courbes des courants de source et de charge

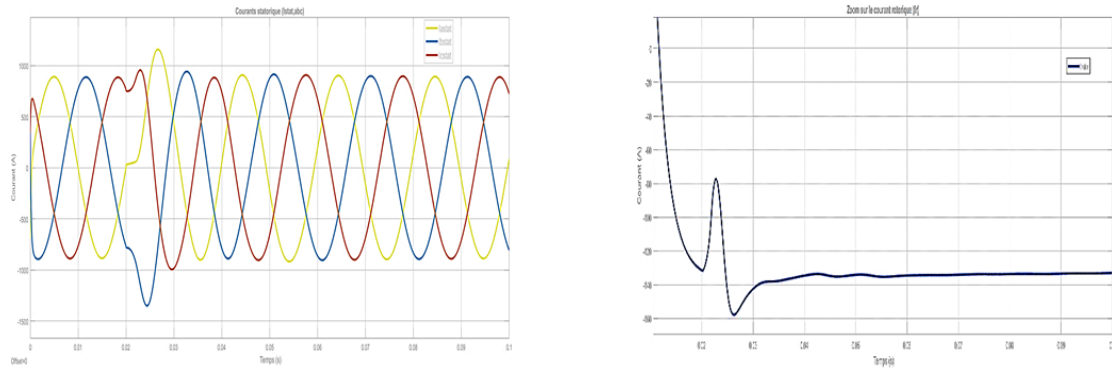


FIGURE 3.8 – Courbes des courants statoriques et rotoriques

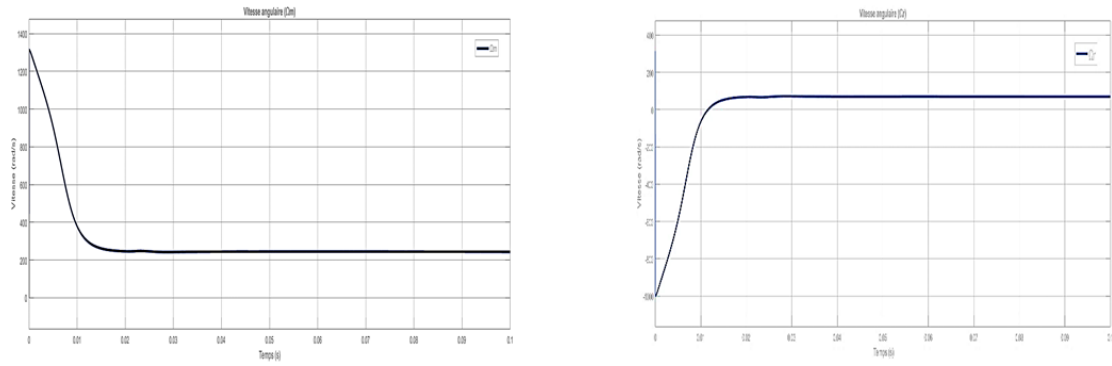


FIGURE 3.9 – Courbes des vitesses angulaires mécaniques et rotoriques

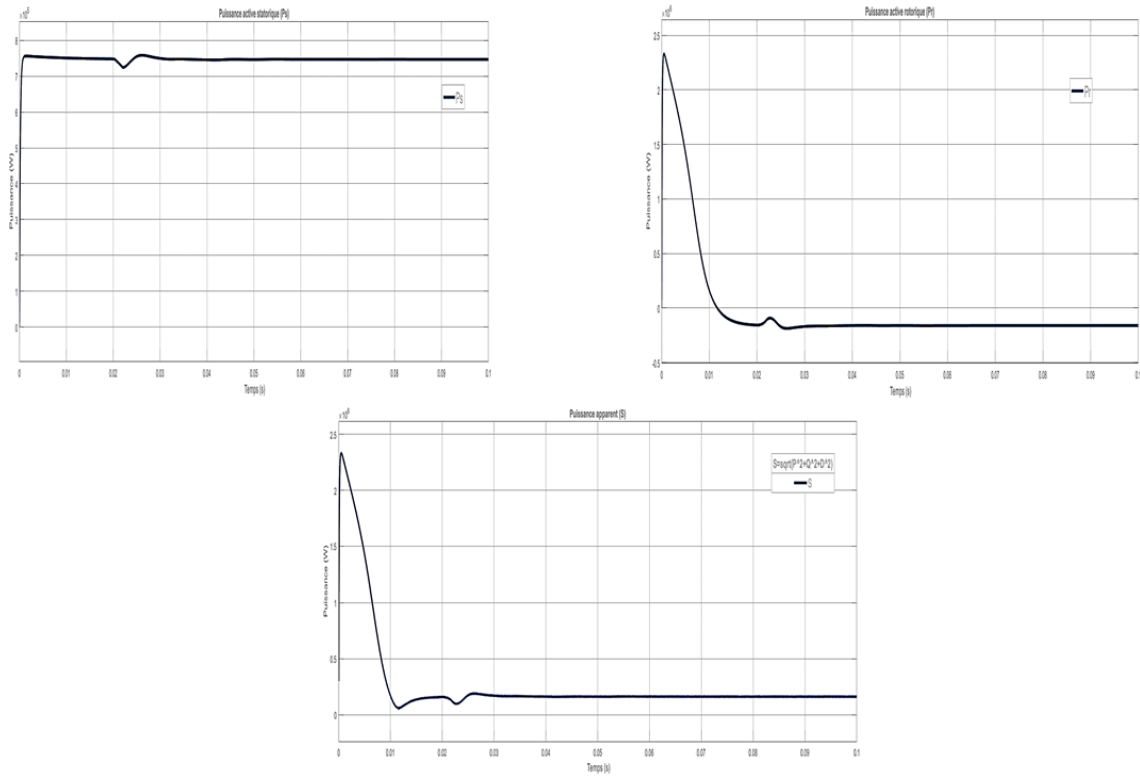


FIGURE 3.10 – Courbes des puissances actives statorique, rotorique et de la puissance apparente

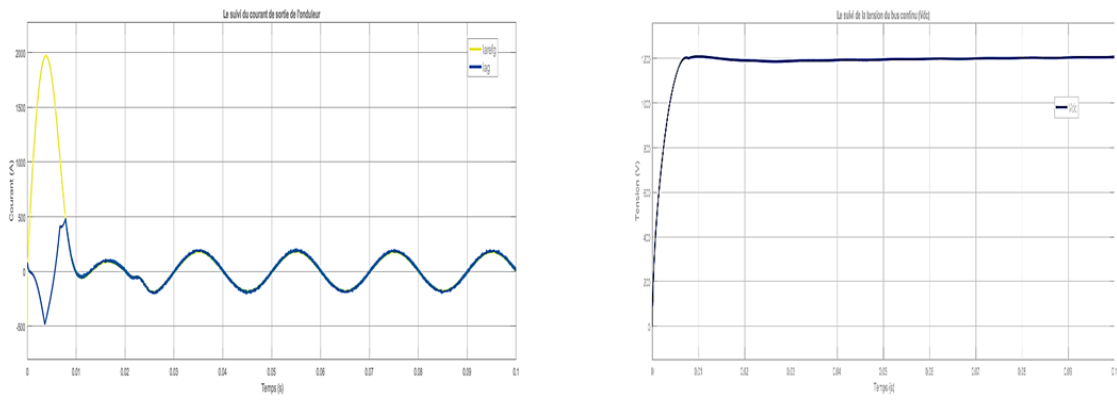


FIGURE 3.11 – Courbes du suivi du courant de sortie de l'onduleur et de la tension de sortie du bus continu

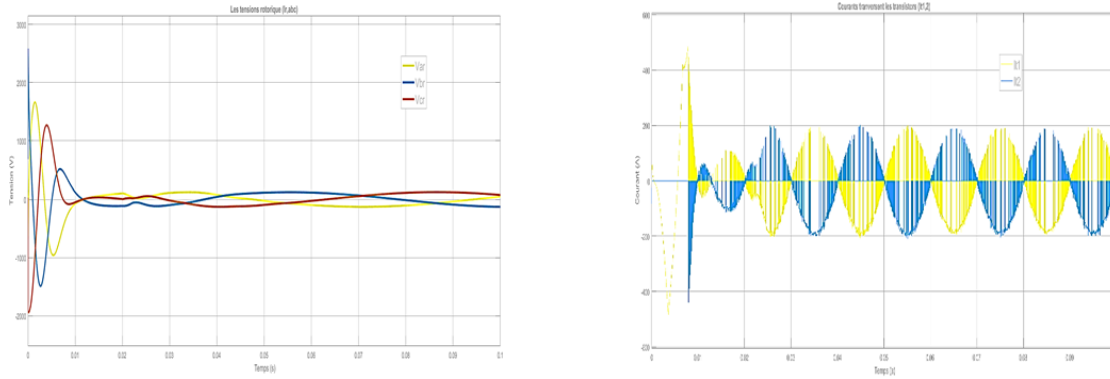


FIGURE 3.12 – Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors

3.5.2 Elimination du déséquilibre avec un changement brusque de la charge

Lors de cette simulation, après une période de temps on augment brusquement la charge et on observe les changements suivants :

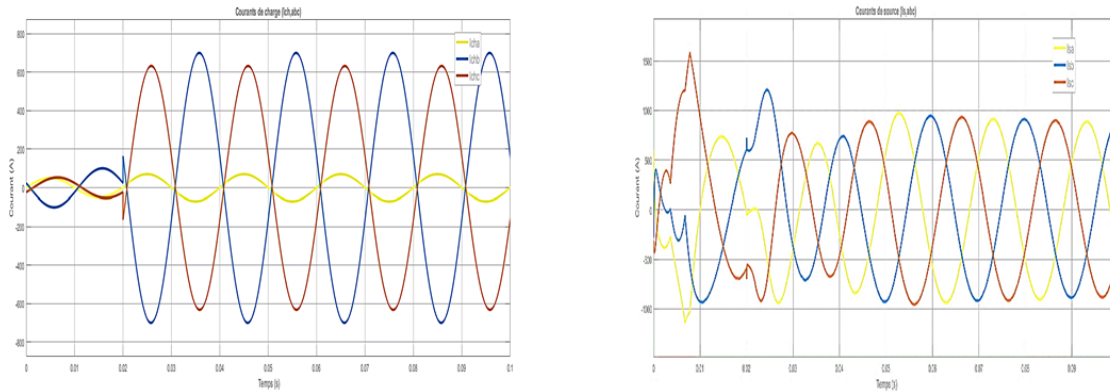


FIGURE 3.13 – Courbes des courants de charge et de source

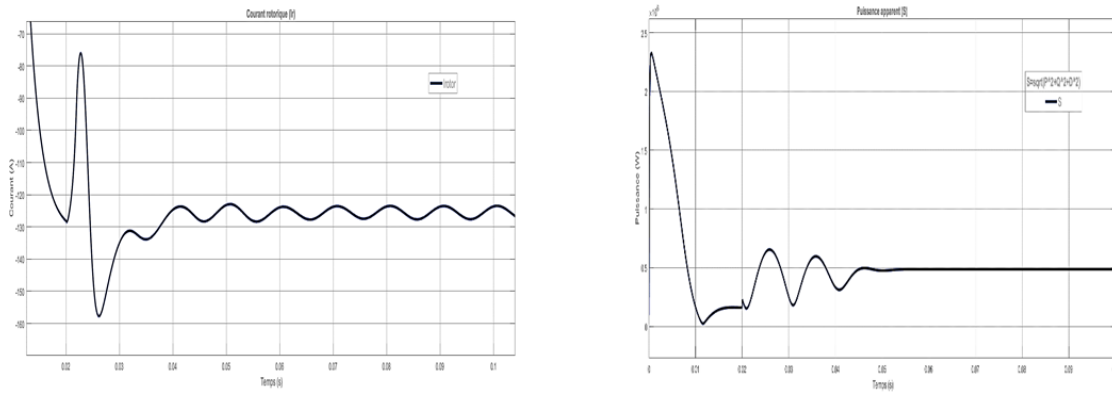


FIGURE 3.14 – Courbes des courants rotoriques, de la puissance apparente

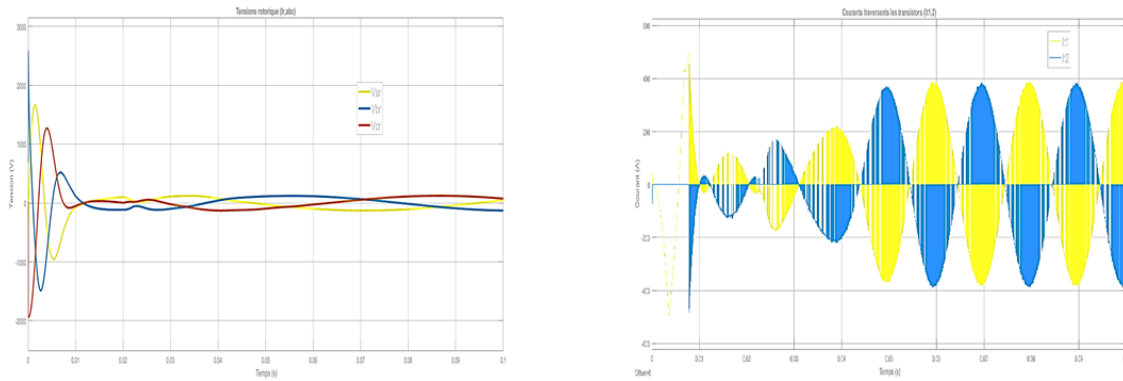


FIGURE 3.15 – Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors

De ces courbes là on peut tirer quelque remarque importante :

- ⇒ Le déséquilibre des charges est devenu plus grande.
- ⇒ Les courants de charge ont augmenté.
- ⇒ Le système prend plus de temps à éliminer le déséquilibre.
- ⇒ L'augmentation des courants de source.
- ⇒ Le courant rotorique diminue et devient plus ondulé.
- ⇒ Les pics de tension sont trop élevés dans le rotor.
- ⇒ La puissance apparente a augmenté du fait que le déséquilibre a augmenté aussi.
- ⇒ Les courants traversent les transistors ont doublé, et les pics sont inchangé mais ils restent élevé.

3.5.3 Elimination du déséquilibre avec un changement brusque de la vitesse du vent

Cette fois ci, on a essayé de changer brusquement la vitesse du vent pour passer d'une valeur de 7 m/s a une valeur de 10 m/s après une période de temps et nous avons observé les changements suivants :

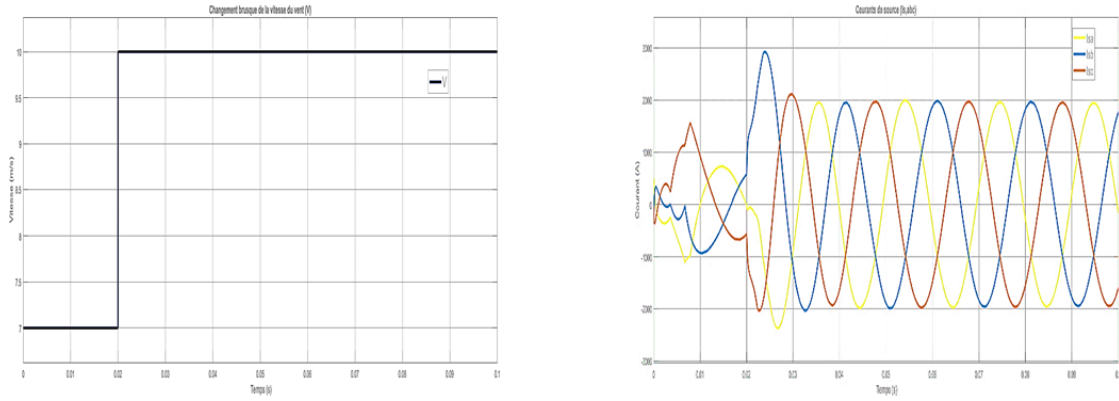


FIGURE 3.16 – Courbes de la vitesse du vent et des courants de source

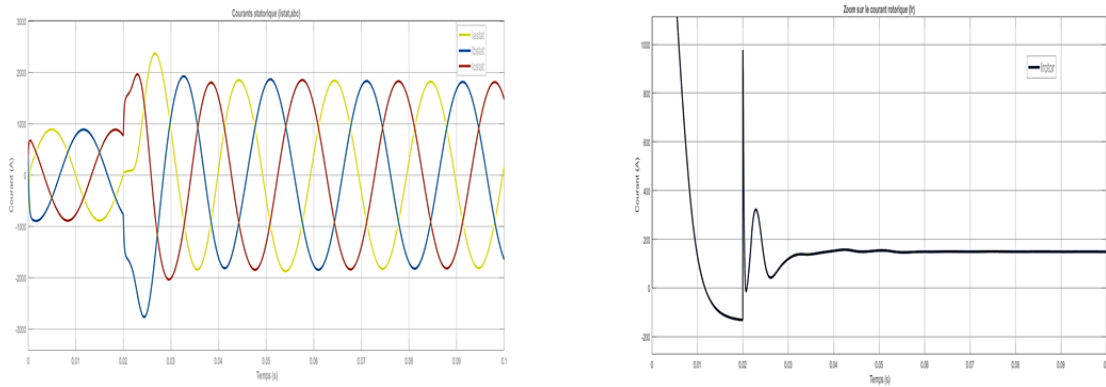


FIGURE 3.17 – Courbes des courants statoriques et des courants rotoriques

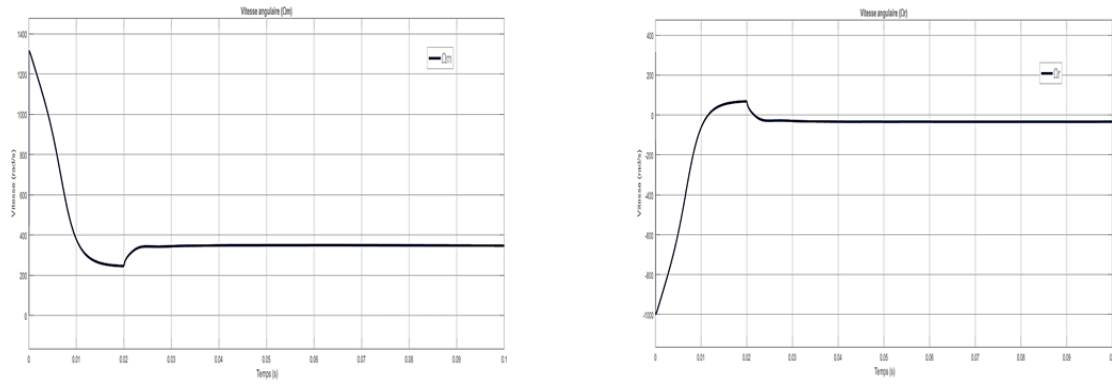


FIGURE 3.18 – Courbes des vitesses angulaires mécanique et rotorique

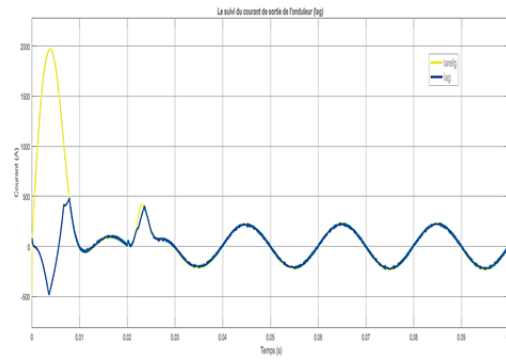


FIGURE 3.19 – Courbes des suivies du courant de sortie de l'onduleur

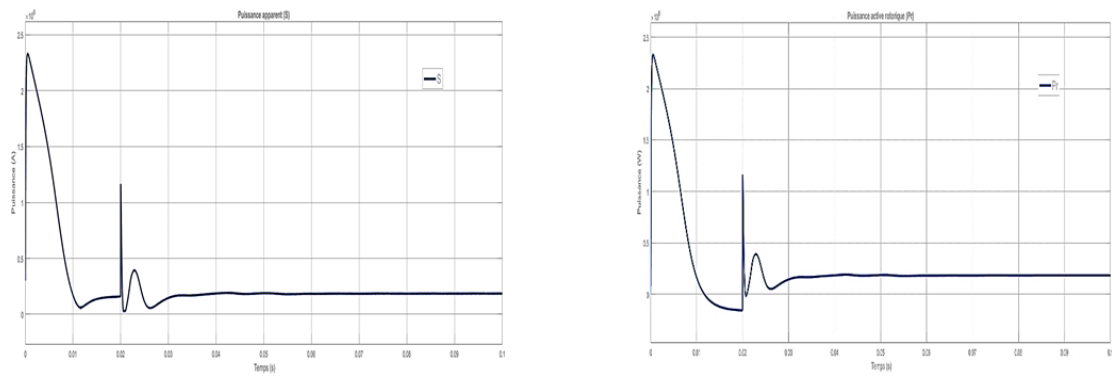


FIGURE 3.20 – Courbes de la puissance apparente et de la puissance active rotorique

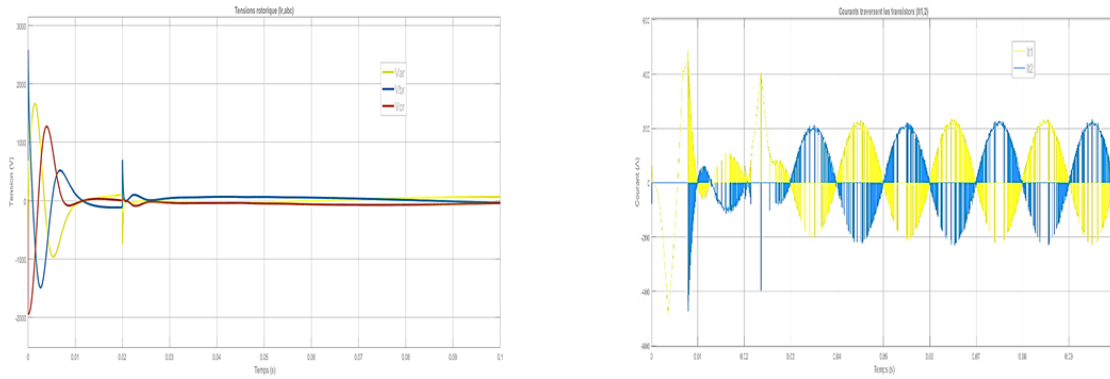


FIGURE 3.21 – Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors

Les remarques les plus importantes sont les suivantes :

- ⇒ Les courants de source ont augmenté rapidement avec des pics plus élevés.
- ⇒ Les courants statorique ont quasiment doublé avec des pics plus importants.
- ⇒ Le courant rotorique augmente très rapidement et change de signe.
- ⇒ Apparition de nouveaux pics lors du changement brusque de la charge mais avec une intensité moins élevée qu'au départ.
- ⇒ La vitesse de rotation de l'arbre mécanique de la génératrice a augmenté alors que la vitesse de rotation du rotor a diminué et changé de signe.
- ⇒ Le suivi des courants de références est perdu lors du changement brusque de la vitesse du vent mais il se rétablit assez rapidement.
- ⇒ La puissance apparente reste la même sauf qu'il y a une apparition d'un pic lors du changement brusque, alors que la puissance rotorique elle change de signe.
- ⇒ Au moment du changement brusque de la charge, des nouveaux pics apparaissent dans les transistors et la tension rotorique avec des fortes intensités, puis ils se stabilisent avec l'élimination du déséquilibre à des valeurs presque les mêmes que dans le cas de référence.

3.5.4 Elimination du déséquilibre avec un changement brusque de l'angle des pales β

Le paramètre modifier lors de cette simulation est l'angle des pales β qui passe de 2° à 20° après une période de temps :

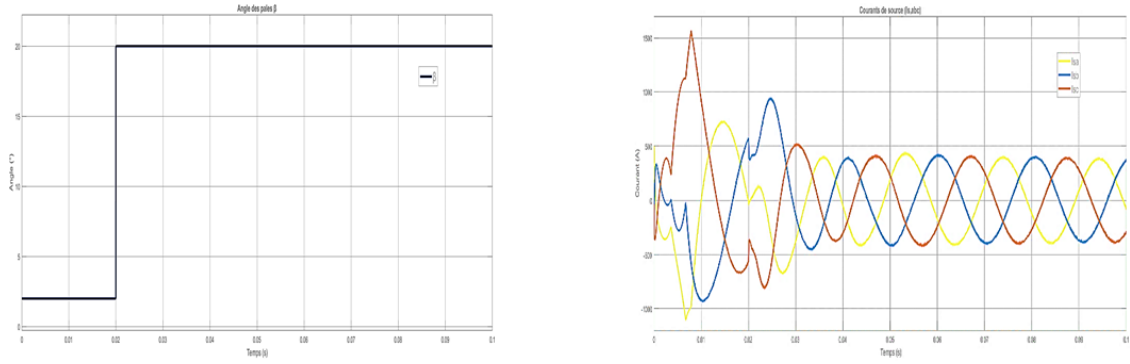


FIGURE 3.22 – Courbes du changement de l'angle des pales et des courants de source

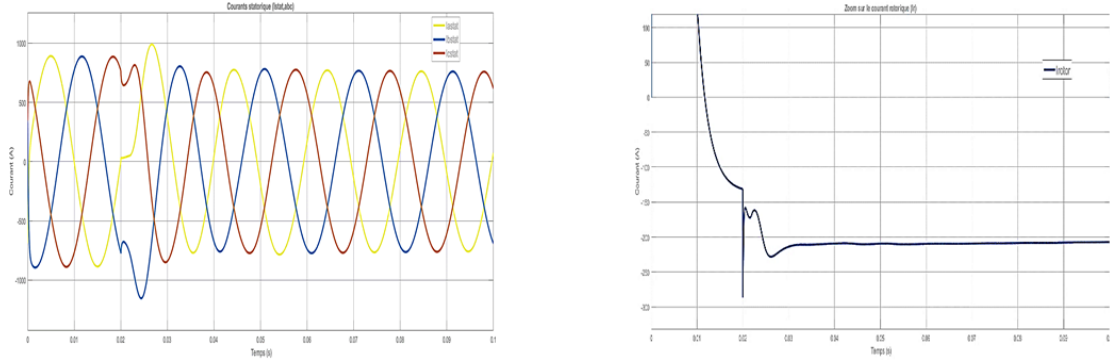


FIGURE 3.23 – Courbes des courants statoriques et rotoriques

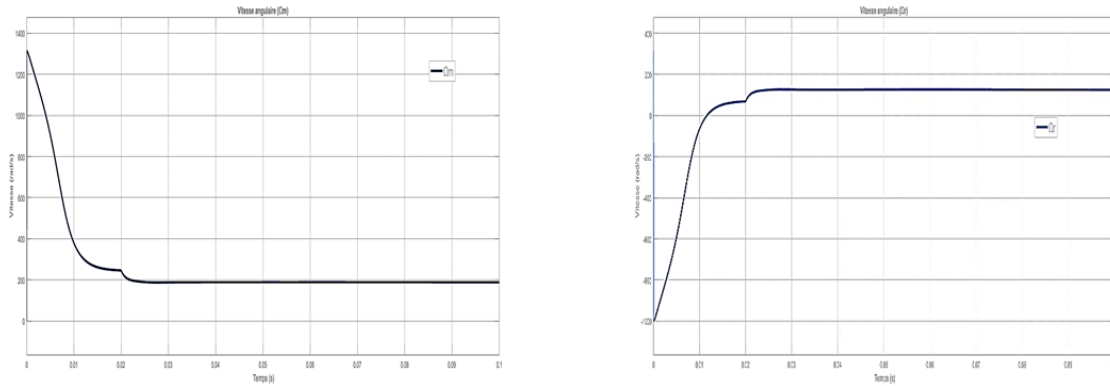


FIGURE 3.24 – Courbes des vitesses angulaires mécanique et rotorique

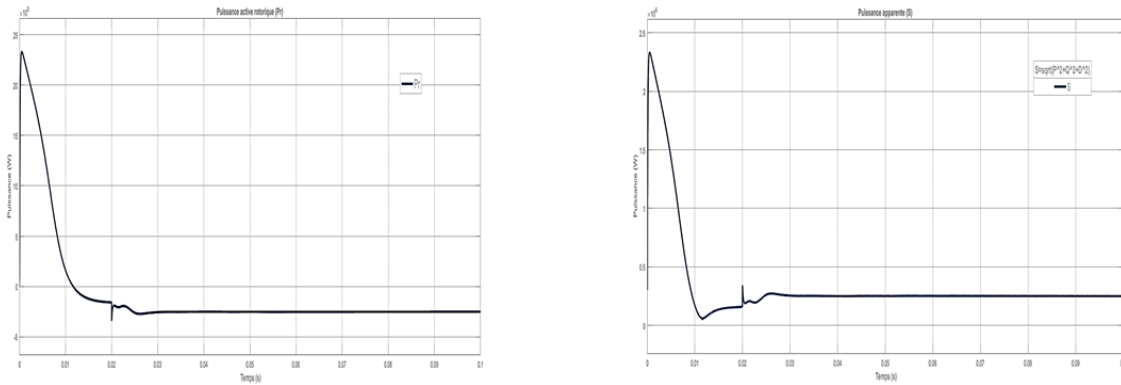


FIGURE 3.25 – Courbes des puissances active rotorique et apparente

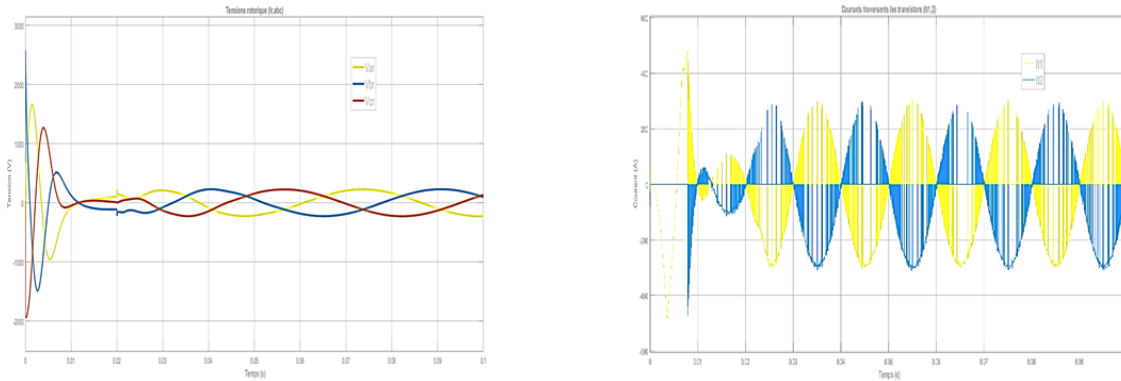


FIGURE 3.26 – Courbes des tensions rotoriques et des courants traversent les transistors

Les remarques les plus importantes sont les suivantes :

- ⇒ Les courants de source et les courants statorique ont diminué avec des piques moins intenses.
- ⇒ Le courant rotorique augmente avec un pique plus élevé.
- ⇒ La tension rotorique a quasiment doublé mais sans que les piques change.
- ⇒ La vitesse de rotation de l'arbre mécanique de la génératrice a diminué alors que la vitesse de rotation du rotor a augmenté.
- ⇒ La puissance statorique a diminué alors que la puissance rotorique a augmenté et il y a une apparition d'un pique lors du changement brusque.
- ⇒ Augmentation dans les courants traversent les transistors, mais les piques restent les mêmes.

3.5.5 Elimination du déséquilibre pour une charge fortement déséquilibré

Pour cette simulation on a essayé de changer brusquement les charges après une période de temps de façon qu'ils deviennent fortement déséquilibré pour voir si la méthode

du MPPT classique peut éliminer ce déséquilibre :

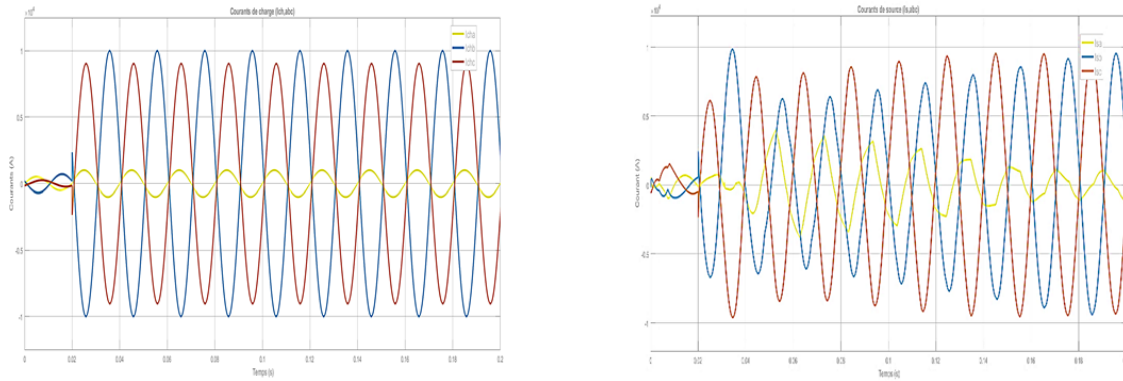


FIGURE 3.27 – Courbes des courants de charge et de source

Il est clair que cette fois-ci la méthode du MPPT n'a pas pu éliminer le déséquilibre, mais plutôt le déséquilibre a pu se propager et agrandi.

3.5.6 Efficacité de la MPPT

Pour évaluer l'efficacité de la méthode MPPT à extraire la puissance active maximale disponible, une simulation du coefficient de performance a été faite dans plusieurs cas. Les courants statoriques injectés dans le réseau et les courants de sortie de l'onduleur ont été visualisés à l'aide d'un profil de vent réel.

Vitesse constante

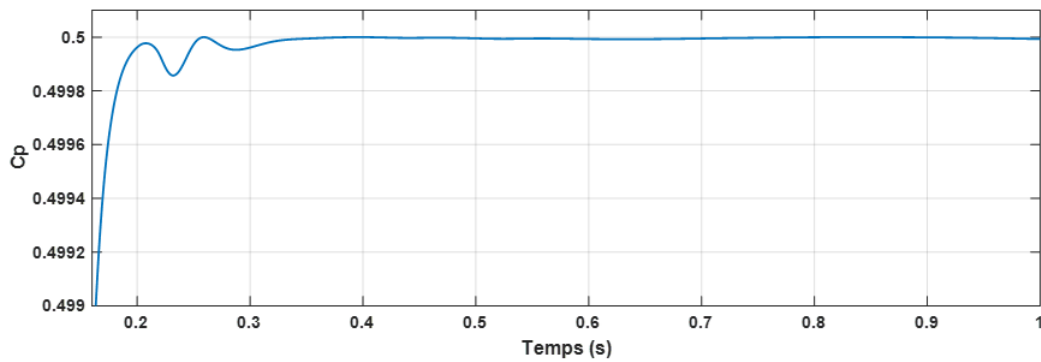


FIGURE 3.28 – Courbe du C_p pour une vitesse de vent constante

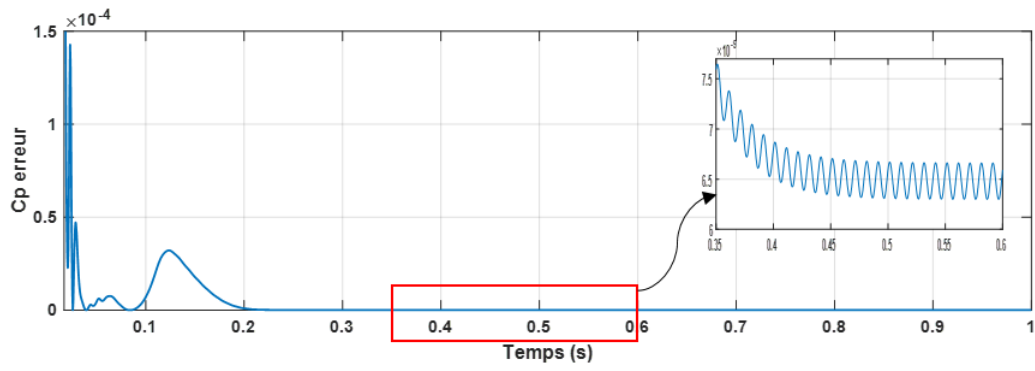


FIGURE 3.29 – Erreur du C_p

Changement de vitesse par échelon

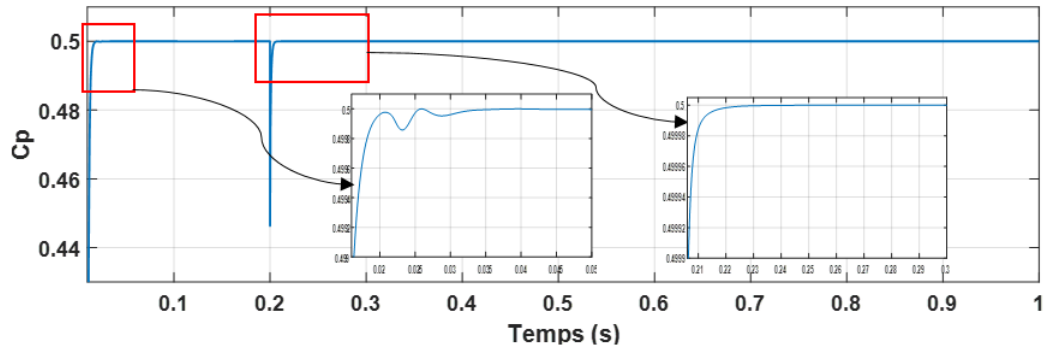


FIGURE 3.30 – Courbe du C_p pour un changement de vitesse avec un step

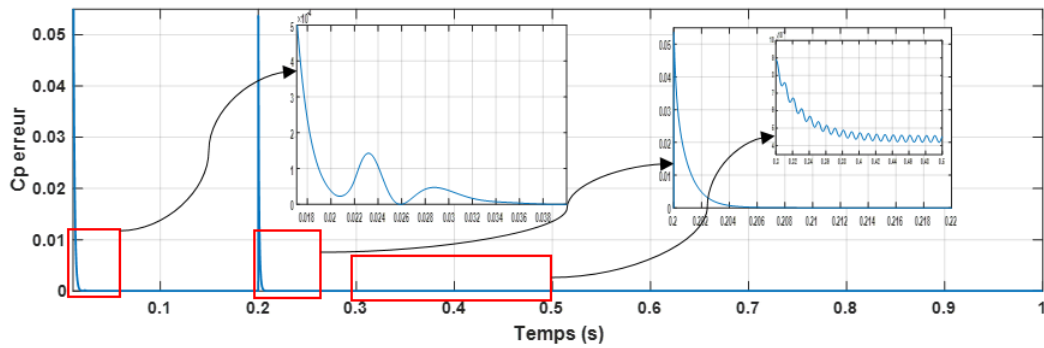


FIGURE 3.31 – Erreur du C_p

Profil réel du vent

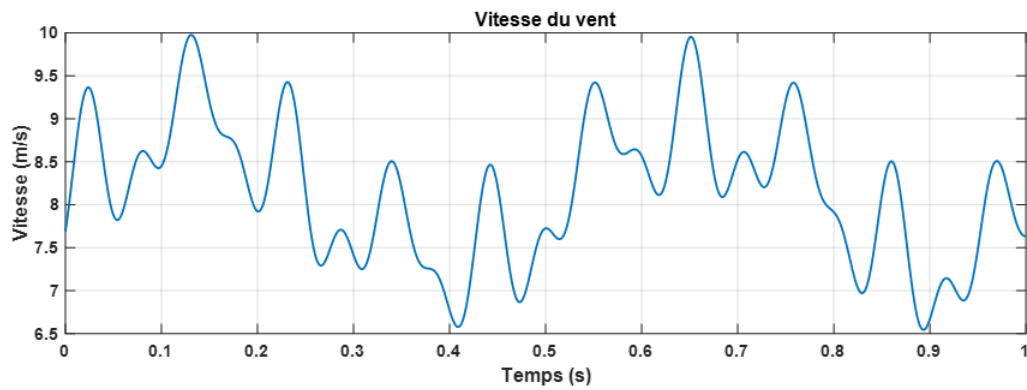


FIGURE 3.32 – Profil réel du vent

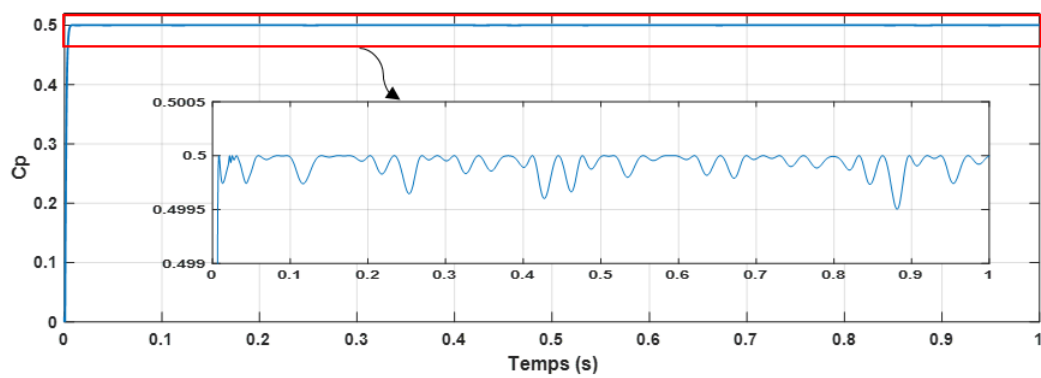


FIGURE 3.33 – Courbe du C_p pour un profil réel du vent

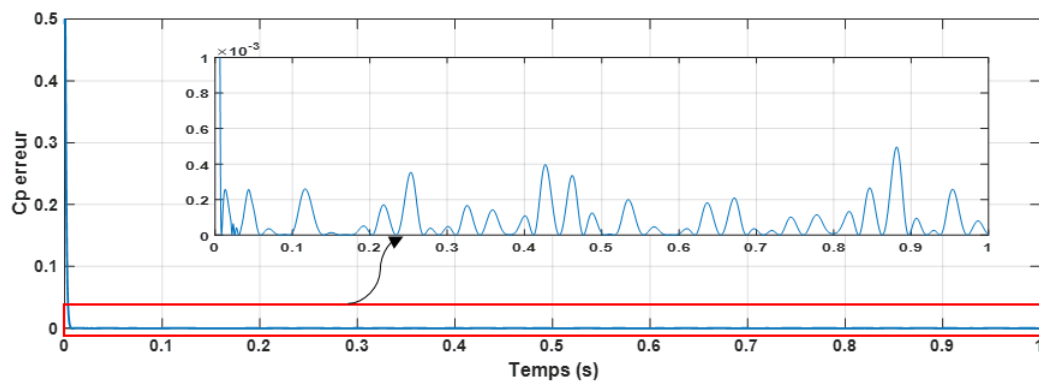


FIGURE 3.34 – Erreur du C_p

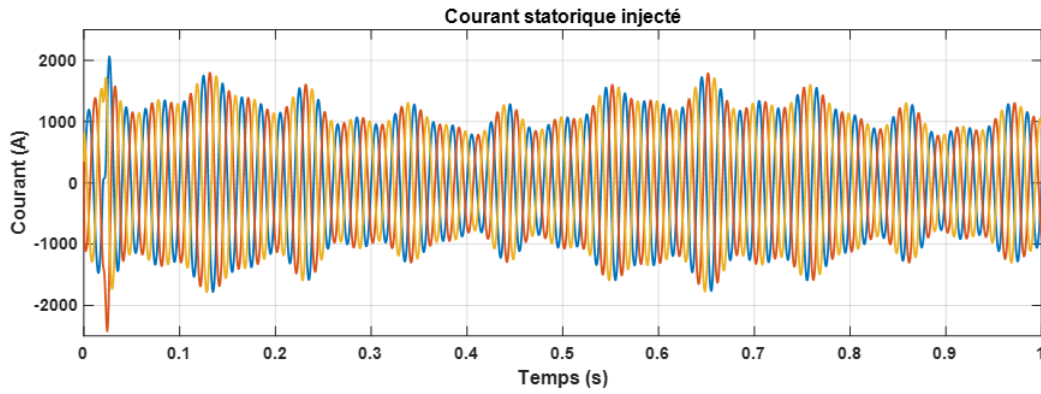


FIGURE 3.35 – Courbes des courants statoriques injectés au réseau

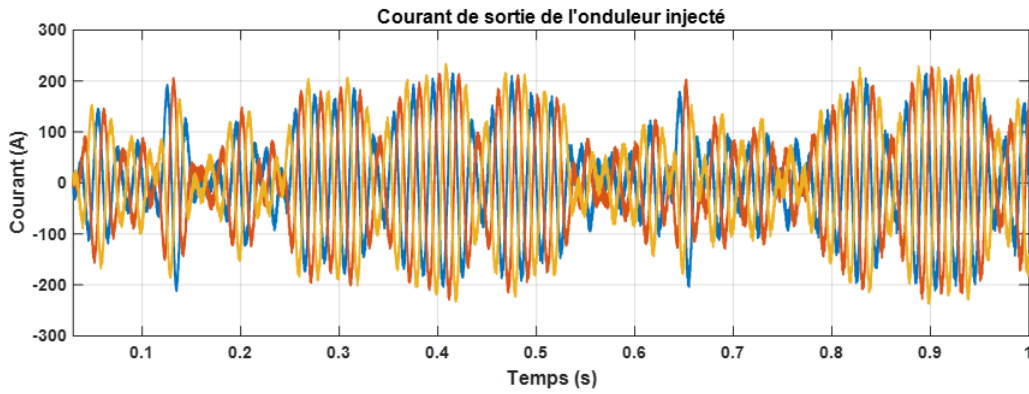


FIGURE 3.36 – Courbes des courants de sortie de l'onduleur injectés au réseau

Les remarques les plus importantes sont les suivantes :

- ⇒ Le coefficient de performance dans le cas d'une vitesse de vent constante atteint son maximum.
- ⇒ L'erreur du C_p par rapport à sa référence est trop petit de l'ordre de 10^{-4} au début et atteint même l'ordre de 10^{-9} à la fin.
- ⇒ Il y'a un changement brusque dans la valeur du coefficient de performance lors du changement de vitesse par un échelon.
- ⇒ Le C_p revient rapidement à suivre sa référence maximale après le changement, et l'erreur reste de l'ordre de 10^{-9} .
- ⇒ Le profil réel du vent montre un vrai suivi à temps réel du $C_{p_{max}}$.
- ⇒ Le coefficient de performance continu à suivre son maximum même avec tous les changements, et l'erreur reste négligeable.
- ⇒ Les courants statoriques suivent de manière proportionnelle le profil du vent, ils augmentent avec l'augmentation de la vitesse du vent et diminuent avec cette dernière.

$\implies$ Les courants de sortie de l'onduleur injecté au réseau, change avec le changement du profil du vent.

3.6 Conclusion

La méthode du MPPT est capable d'éliminer le déséquilibre lorsque la charge est faiblement déséquilibrée.

Lorsqu'il y a un changement brutale des charges et que ces charge reste faiblement déséquilibré, la MPPT peut contrôler ce déséquilibre et l'éliminer mais dans un intervalle de temps plus lent.

L'efficacité de la méthode MPPT à éliminer le déséquilibre reste valable même pour un changement brusque de la vitesse du vent.

Le changement rapide de l'angle des pales n'affecte pas l'élimination du déséquilibre.

Comme on vu sur le dernier cas, l'un des limites de la méthode MPPT est quand la charge est fortement déséquilibré, à ce moment-là elle n'est plus d'utilité pour l'élimination du déséquilibre tout en injectant la puissance active maximale disponible.

Malgré cette limite la méthode MPPT reste valable et efficace pour un large intervalle de déséquilibré.

Les piques de courants qui apparaissent dans les différents composants de notre système influence sur la section des câbles d'où la nécessité de les surdimensionner.

L'apparition des piques de tensions dans le système risque de faire claquer les isolants. Les piques de courant dans le transistor peuvent les faire griller s'ils dépassent sa valeur admissible. Ces piques de tensions et de courants réduisent la durée de vie de notre système.

Le coefficient de performance toujours atteint son maximum et reste quasiment constante grâce a la méthode MPPT, ce qui veut dire quel a pu extraire le maximum de la puissance active disponible tout au long des changement brusque des paramètres, et même avec un profil réel de la vitesse du vent.

Conclusion Générale

Dans le premier chapitre une étude bibliographique a été présentée qui concerne les différents types d'éoliennes et leurs principes de fonctionnements. Mais aussi les différentes technologies des éoliennes et de ce fait on a conclu que les éoliennes à vitesse variables offrent une large plage de variation de vitesse et du coup elles permettent une meilleure possibilité de réglage que celles des éolienne fixe.

On a constaté aussi que les avantages de l'énergie éolienne la rend comme une source très prometteuse et que ces inconvénient on peut les surmonté. Ceci est justifier par la capacité de l'énergie éolienne et sa part dans la contribution à la production électrique qui ne cesse pas d'augmenter et qui évolue d'une manière très rapide lors de la dernière décennie.

Après il apparait nécessaire de connaître les principaux codes de raccordements des éoliennes dans le réseau électrique, d'où on a tiré qu'il est nécessaire de maintenir la tension en tout point du réseau dans un intervalle de tolérance ceci dans le but d'assurer le bon fonctionnement des installations raccordées au réseau électrique.

Puis on a introduit la notion du déséquilibre qui est généralement dû à une charge déséquilibré, et qui conduit à la surchauffe et la dégradation des équipements raccordé au réseau.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation des différents composants du système éolien. Nous avons commencé par la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie du système éolien. Ensuite, nous avons développés le modèle de la MADA, tel que son rotor est raccordé au réseau par un filtre RL à travers des convertisseurs contrôlés en MLI et reliés par un bus continu, que nous avons tous les modélisés.

Un modèle mathématique de la MADA a était établi en se basant principalement sur les équations électriques de la machine. Le modèle développé est basé sur la théorie p-q qui repose sur la transformation de Park. Les expressions du flux de puissance et du couple électromagnétique de la machine ont été établies. Et on a déduit à partir des bilans de puissances les relations entre les puissances actives et réactives, statoriques et rotorique.

La technique de la MPPT consiste à extraire le maximum de la puissance du vent disponible au niveau des pales de la turbine éolienne en maximisant le coefficient de puissance qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine et qui est défini

comme étant le rapport de la puissance de l'éolienne divisée par la puissance du vent.

Sachant que la puissance du déséquilibre peut être fournie dans les limites constructives de la MADA et du CCR. Et afin de faire participer l'éolienne à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique du réseau, on a opté pour l'injection de la puissance active maximale, tout en prenant compte de la puissance nécessaire à l'élimination du déséquilibre dans le réseau électrique.

On a conclu à la fin que la méthode du MPPT est capable de contrôler et d'éliminer le déséquilibre lorsque les charges sont faiblement déséquilibrées, et même lors d'un changement brutal des charges qui restent faiblement déséquilibrées, de la vitesse du vent et de l'angle des pales. Mais malheureusement, l'une des limites de la commande MPPT est quand la charge est fortement déséquilibré, à ce moment-là elle n'est plus d'utilité pour l'élimination du déséquilibre tout en injectant la puissance active maximale disponible.

Le déséquilibre et les changements brutaux, nuit à la stabilité du réseau et des équipements raccordés au réseau, généralement les piques des courants et tension qui apparaissent dans notre système influence sur la section des câbles, risque de faire claquer les isolants et réduisent la durée de vie de notre système d'où la nécessiter de les surdimensionnés.

Tout au long des changements brusque des paramètres, et même avec un profil réel de la vitesse du vent, la méthode MPPT a pu extraire le maximum de puissance active disponible, en s'assurant que le coefficient de performance est toujours à son maximum et reste quasiment constant.

Les objectifs de contrôle pour l'ensemble du système d'énergie éolienne ont été atteints.

En perspective, des travaux de recherche peuvent être menés sur les axes suivants :

- ⇒ Les limites des correcteurs PI à répondre aux exigences et performances souhaité lors du régime transitoire de la MADA, et essayer de les remplacer par d'autre correcteurs performant et plus robuste.
- ⇒ Appliquer la commande prédictive sur les convertisseurs NPC à trois niveaux, et élargir cette commande pour traiter différents objectifs à la fois. Et trouver le lien entre ces derniers.
- ⇒ A l'issue de ce travail des perspectives d'application de la commande MPPT et prédictive sur d'autres systèmes sont envisagés.

Annexe A

TRANSFORMATIONS DES SYSTÈMES TRIPHASÉS

Les transformations, sont un outil mathématique utilisé dans l'étude des machines électriques, et en particulier pour leur commande vectorielle, afin de modéliser le système triphasé complexe avec un modèle diphasé plus simplifié.

Représentation vectorielle

Soit le système triphasé (x_a, x_b, x_c) équilibré :

$$x_a = X.\cos(\omega.t + \phi) \tag{A.1}$$

$$x_b = X.\cos(\omega.t + \phi - \frac{2\pi}{3}) \tag{A.2}$$

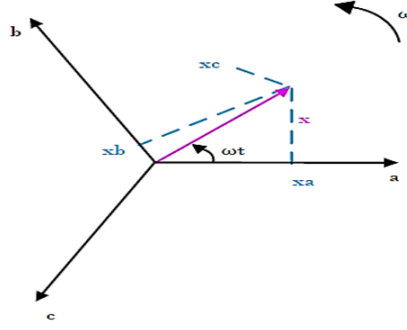
$$x_c = X.\cos(\omega.t + \phi + \frac{2\pi}{3}) \tag{A.3}$$

Tel que :

X : l'amplitude

ω : la fréquence angulaire ou pulsation

ϕ : le déphasage

FIGURE A.1 – Représentation du vecteur $\vec{x}$ dans le repère (abc)

Le vecteur $\vec{x}$ qui tourne à une vitesse angulaire ω autour de l'origine des trois axes (abc) orientés de 120° l'un par rapport à l'autre représente le système triphasé équilibré. En projetant le vecteur $\vec{x}$ selon chaque axe, nous obtenons les grandeurs x_a, x_b, x_c . Soit le vecteur $\vec{a}$ l'origine des axes :

$$\vec{a} = 1 \quad (\text{A.4})$$

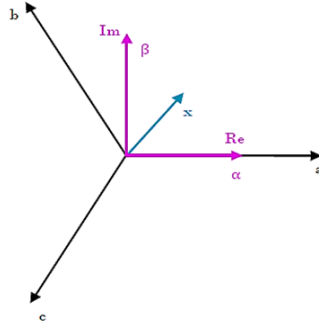
$$\vec{b} = e^{j(\frac{2\pi}{3})} \quad (\text{A.5})$$

$$\vec{c} = e^{j(-\frac{2\pi}{3})} \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{x} = |\vec{x}|e^{j(\omega.t+\phi)} = Xe^{j(\omega.t+\phi)} \quad (\text{A.7})$$

Transformation de Clarke

La transformation de Clarke, est un changement de repère dans lequel on peut représenter le vecteur $\vec{x}$ selon l'axe réel α et l'axe imaginaire β . Les grandeurs transformées sont généralement des courants, des tensions ou des flux.

FIGURE A.2 – Représentation du vecteur $\vec{x}$ dans le repère $(\alpha\beta)$

Projetant le vecteur $\vec{x}$ selon les axes $(\alpha\beta)$:

$$\vec{x} = x_\alpha + jx_\beta \quad (\text{A.8})$$

Les composantes du vecteur $\vec{x}$ sous forme matricielle s'expriment comme suit en fonction des grandeurs x_a, x_b et x_c :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

On définit la matrice de Clarke comme suit :

$$C_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

La matrice inverse de Clarke utilisée pour passer du système diphasé dans le repère $(\alpha\beta)$ au système triphasé dans le repère (abc) est :

$$C_1^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

Matrice de rotation

La transformation de rotation utilisé ici, elle s'agit d'un changement de repère permettant de représenter le vecteur $\vec{x}$ dans le nouveau repère décalé d'un angle θ . Soit la matrice de rotation $R(\theta)$:

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

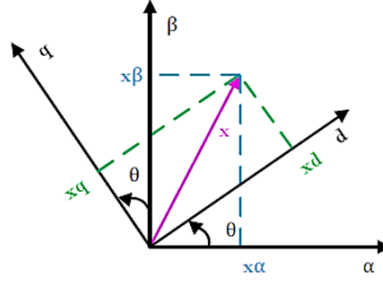
Avec θ est l'angle de rotation. Afin d'assurer le passage au repère (dq) il suffit de faire tourner le repère $(\alpha\beta)$ d'un angle θ en introduisant la matrice de rotation $R(\theta)$:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

Pour faire tourner l'axe α en direction de l'axe β dans le sens horaire, il faut que θ soit compris entre 0 et $\pi/2$.

Le passage inverse du repère (dq) au repère $(\alpha\beta)$ est assuré par la matrice de rotation invers $R(\theta)^{-1}$:

$$R(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

FIGURE A.3 – Passage du repère (α/β) au repère (dq)

La transformation de Park

Il s'agit d'un passage d'un repère fixe (α/β) par rapport au repère triphasé (abc) à un repère diphasé (dq) qui tourne à une vitesse angulaire ω_y par rapport au repère (abc) . Donc la transformation de Park est une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation.

L'angle de Park que forme le repère (dq) avec le repère (abc) c'est l'angle de la rotation, et qui est donné par l'expression suivante :

$$\theta_y = \int_0^t \omega_y dt + \omega_{y0} \quad (\text{A.9})$$

La transformation de Park est définie par la matrice suivante :

$$P(\theta) = K \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

La transformation de Park est très similaire à la transformation (dq) elles sont souvent confondues dans la littérature. La différence entre ces deux transformations réside dans la valeur du coefficient K , Contrairement à la transformation (dq) , la transformation de Park est non unitaire et ne conserve pas la puissance.

$K = \sqrt{\frac{2}{3}}$: Transformation non unitaire $\rightarrow$ pas de conservation de puissance.

$K = \frac{2}{3}$: Conservation de la puissance.

La transformée de Park inverse est :

$$P(\theta) = K \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Références

- [1] IRENA (2019), " Renewable Energy Statistics 2019 ", The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [2] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, " Etat de l'art des aérogénérateurs ", L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154, 2002.
- [3] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, P. Surekha, " Solar PV and Wind Energy Conversion Systems ", Springer International Publishing Switzerland 2015.
- [4] F. Becker, " Emulation d'une chaine éolienne de conversion d'énergie ", Mémoire de master (2011), Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [5] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro and M. Narimani, "High-power wind energy conversion systems : State-of-the-art and emerging technologies," in Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 5, pp. 740-788, May 2015.
- [6] N. NASR, N. MOUBAYED, "Etude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical", Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy (2011), vol. 7, p. 145-157.
- [7] A. Mamadie Sylla, " Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation", Mémoire de master (2013), Université du Québec à Trois-Rivières.
- [8] B. Wu, Y. Venkata " Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems ", IEEE Press Series on power Engineering (2017).
- [9] Z. Chen, J. M. Guerrero and F. Blaabjerg, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 8, pp. 1859-1875, Aug. 2009.
- [10] H. Abu-Rub, M. Malinowski, K. Al-Haddad, " Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications ", A co-publication of IEEE Press and John Wiley & Sons Ltd, pp.270-317, 2014.

[11] S. D. Ahmed, F. S. M. Al-Ismail, M. Shafiullah, F. A. Al-Sulaiman and I. M. El-Amin, "Grid Integration Challenges of Wind Energy : A Review," in IEEE Access, vol. 8, pp. 10857-10878, 2020.

[12] M. Mohseni, M.I. Syed, " Review of international grid codes for wind power integration : Diversity, technology and a case for global standard ", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp.3876-3890, Elsevier Ltd, 2012.

[13] M. Tsili, S. Papathanassiou " A review of grid code technical requirements for wind farms ", IET Journals, IET Renewable Power Generation 2009, Vol. 3, Iss. 3, pp.308–332.

[14] O. Malaoui, " L'élimination du déséquilibre dans les réseaux électriques", Mémoire de Master (2020), ESTI-Annaba.

[15] M. Smaili, " Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération ", Thèse de doctorat (2013), Université du Québec.

[16] I. Yahyaoui, " Advances in Renewable Energies and Power Technologies ", Volume 1, Solar and Wind Energies, pp.429-507, Elsevier Inc. 2018, University Carlos III of Madrid, Spain.

[17] Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2018 – Annual market statut ", Global offshore Wind Summit Taiwan, International Conference & exhibition, April 2019.

[18] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21) Renewables Now, " Renewables 2019 Global Status Report ", A comprehensive annual overview of the state of renewable energy.

[19] J. Lee, E. Muljadi, P. Srensen and Y. C. Kang, "Releasable Kinetic Energy-Based Inertial Control of a DFIG Wind Power Plant," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 1, pp. 279-288, Jan. 2016.

[20] L. Riachy, " Contribution à la commande d'un onduleur multiniveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques", Thèse de doctorat (2017), ESIGELEC / IRSEEM.

[21] F. Amrane, " Contribution à la commande d'un système de conversion éolien à base de la génératrice à double alimentation ", Thèse de doctorat (2018), Université Ferhat Abbas Setif.

[22] J. Lee, G. Jang, E. Muljadi, F. Blaabjerg, Z. Chen and Y. Cheol Kang, "Stable Short-Term Frequency Support Using Adaptive Gains for a DFIG-Based Wind Power Plant," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 3, pp. 1068-1079, Sept. 2016.

[23] A. Merabet, K. T. Ahmed, H. Ibrahim and R. Beguenane, "Implementation of Sliding Mode Control System for Generator and Grid Sides Control of Wind Energy Conversion System," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1327-1335, July 2016.

[24] X. Chen, L. Yan, X. Zhou and H. Sun, "A Novel DVR-ESS-Embedded Wind-Energy Conversion System," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1265-1274, July 2018.

[25] W. Tang, J. Hu, Y. Chang and F. Liu, "Modeling of DFIG-Based Wind Turbine for Power System Transient Response Analysis in Rotor Speed Control Timescale," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6795-6805, Nov. 2018.

[26] J. Hu, Y. Huang, D. Wang, H. Yuan and X. Yuan, "Modeling of Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines for DC-Link Voltage Stability Analysis," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1325-1336, Oct. 2015.

[27] I. Erlich, J. Kretschmann, J. Fortmann, S. Mueller-Engelhardt & H. Wrede, "Modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generators for power system stability studies", *IEEE Transactions on power systems* (2007), vol. 22, no 3, p. 909-919.

[28] C. Huang, F. Li and Z. Jin, "Maximum Power Point Tracking Strategy for Large-Scale Wind Generation Systems Considering Wind Turbine Dynamics," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2530-2539, April 2015.

[29] M. A. Abdullah, A . H. M. Yatim, C. W. Tan, R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems", *Renewable and sustainable energy reviews* (2012), vol. 16, no 5, p. 3220-3227.

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

[31] L. Fan, Z. Miao, " Modeling and analysis of doubly fed induction generator wind energy systems ", *Modeling of Doubly Fed Induction Generation (DFIG) Converter Controls*, pp. 35-54, Academic Press, 2015.

[32] D-C. Phan, S. Yamamoto, " Rotor speed control of doubly fed induction ge-

nerator wind turbines using adaptive maximum power point tracking ", Energy 111, pp.377-388, Elsevier Ltd, 2016.

[33] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed, H. Benalla " Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) pp.109-120.

[34] P. Krafczyk, " Modélisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA", Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur (2013), Université de Lorraine, Nancy.

[35] H. Bennani, " Machine asynchrone à double alimentation, les lois de commande en régime permanent ", Mémoire pour l'obtention du grade de M.Sc. (2011), Université Laval du Québec.

[36] A. Telli, " Etude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseau MT", Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister (2012), Université Mohamed Boudiaf, Oran.

[37] P. Cheng, H. Nian, C. Wu and Z. Q. Zhu, "Direct Stator Current Vector Control Strategy of DFIG Without Phase-Locked Loop During Network Unbalance," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 1, pp. 284-297, Jan. 2017.

[38] A.R. Kumhar " Vector Control Strategy to Control Active and Reactive Power of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Energy Conversion system ", Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI 2018).

[39] X. Chen, L. Yan, X. Zhou and H. Sun, "A Novel DVR-ESS-Embedded Wind-Energy Conversion System," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 3, pp. 1265-1274, July 2018.

[40] T. Ghennam, " Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation ", Thèse de doctorat (2011), Ecole Centrale de Lille, Polytechnique Militaire d'Alger.

[41] H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes, " Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning ", IEEE Press-Wiley InterScience, Inc. 2007.

[42] E.H. Watanabe, J.L. Afonso, J.G. Pinto, L.F.C. Monteiro, M. Aredes, H. Akagi " Instantaneous p-q Power Theory for Control of Compensators in Micro-Grids ", IEEE

2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC) - Lodz, Poland (2010.06.15-2010.06.18).

[43] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", in Proc. IEEE IPEC-Tokyo, 1983, p. 1375.

[44] H. E. Aimani and A. Essadki, "Study of the PI Controller and Sliding Mode of DFIG used in a WECS," 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Tangier, pp. 1-6, 2017.

[45] J. Hu, Y. He, L. Xu and B. W. Williams, "Improved Control of DFIG Systems During Network Unbalance Using PI-R Current Regulators," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 2, pp. 439-451, Feb. 2009.

[46] A. M. S. Yunus, A. Abu-Siada, M. A. S. Masoum, M. F. El-Naggar and J. X. Jin, "Enhancement of DFIG LVRT Capability During Extreme Short-Wind Gust Events Using SMES Technology," in IEEE Access, vol. 8, pp. 47264-47271, 2020.

[47] C. Wu, P. Cheng, H. Nian and F. Blaabjerg, "Rotor Current Oriented Control Method of DFIG-DC System Without Stator Side Sensors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 11, pp. 9958-9962, Nov. 2020.