



République Algérienne Démocratique et  
Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université des Frères Mentouri de Constantine



Faculté des Sciences de la Technologie  
Département d'Electrotechnique

N° de série : .....  
N° d'ordre : .....

# Thèse

Pour l'Obtention du diplôme de  
**DOCTORAT 3<sup>ème</sup> CYCLE**

Spécialité: ELECTROTECHNIQUE

Option : ELECTROTECHNIQUE

Présentée par :

**OUALAH Oussama**

Master en Electrotechnique

## Thème

---

**CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES MACHINES  
ELECTRIQUES :APPLICATION A UN SYSTEME EOLIEN**

---

Soutenue le : 27 / 09 / 2023

Devant le Jury :

<i>Président</i>	MEHASNI Rabia	Professeur	Univ. des Frères Mentouri Constantine
<i>Rapporteur</i>	KERDOUN Djallel	Professeur	Univ. des Frères Mentouri Constantine
<i>Examineur</i>	CHAIBA Azeddine	Professeur	Univ. Abbes LaghrourKhenchla
<i>Examineur</i>	BENOUDJIT Djamel	MCA	Univ. Mostapha Benboulaïd Batna 2
<i>Examineur</i>	BENNECIB Nedjoudja	MCA	Univ. des Frères Mentouri Constantine

## *Remerciements*

*Je* remercie tout d'abord le Professeur **Kerdoun Djallel**, de m'avoir fait l'honneur d'encadrer mon doctorat, pour sa disponibilité, et pour son écoute et ses conseils pertinents tout au long de la rédaction de cette thèse.

*Je* tiens à remercier le Dr. Boumessata Abderraouf pour son précieux soutien tout au long de ma thèse.

*Je* souhaite remercier l'ensemble des membres de mon jury d'avoir accepté de juger et d'évaluer ce travail de doctorat, mais aussi pour avoir passé du temps dans la lecture de cette thèse.

*Je* tiens à remercier mes collègues de la promotion du doctorat, mes enseignants et les responsables de département d'Electrotechnique de l'université des Frères Mentouri de Constantine.

*Je* tiens également à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien inconditionnel et leur présence continue.

*Enfin* je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de cette thèse.

*Oualah Oussama*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à ceux qui m'ont  
supporté le long de la période de  
préparation de ma thèse de près ou de  
loin, je tiens également à le dédier :*

*A mes chers parents,*

*A mes chers frères,*

*A ma famille,*

*A mes amis*

## ملخص

هدف هذه الأطروحة هو تحسين تصميم سلسلة تحويل الطاقة الرياحية من خلال إيجاد توازن مثلى بين التكلفة وكفاءة الطاقة وأداء النظام وجودة الطاقة المُدخلة إلى الشبكة الكهربائية. لتحقيق هذا الهدف، قمنا بإجراء نمذجة وتحكم ومحاكاة لمولد رياح يتألف من محور رياح وآلة مزدوجة التغذية خالية من الفرش ومحولات متصلة متعاكسة ووحدة تحكم تنقسم وحدة التحكم إلى قسمين: تحكم المحول من جانب المولد وتحكم المحول من جانب الشبكة. تم إجراء نمذجة لعناصر التحكم المختلفة مثل حافلة التيار المستمر ومرشح ربط GSC-الشبكة. يتم توصيل الجزء الثابت الأساسي للماكينة العامل كمولد مباشرة بالشبكة الكهربائية، في حين يتم توصيل الجزء الثابت الثانوي عبر محولات متصلة متعاكسة، مما يمكن التحكم في النظام الكامل للطاقة الرياحية. تم تطبيق تقنيات مثل توجيه تدفق الجزء الثابت وتحكم بوضع الانزلاق من الدرجة الأولى والثانية، بالإضافة إلى تحكم نقطة القدرة القصوى (MPPT) على وحدة التحكم للتحكم بشكل مستقل في الطاقات النشطة والمتفاعلة المرسله إلى الشبكة الكهربائية من المولد واستخلاص أقصى قدرة. تظهر نتائج المحاكاة للسلسلة الكلية للطاقة الرياحية فعالية تحكم MPPT. وتؤكد أنه تم تحقيق التحكم المستقل في الطاقات النشطة والمتفاعلة المرسله إلى الشبكة الكهربائية من المولد الرياحي بنجاح.

## الكلمات المفتاحية :

طاقة الرياح , الآلة مزدوجة التغذية خالية من الفرش, محول الطاقة ,تقنية MPPT ,تقنية توجيه التدفق, التحكم عن طريق النمط الانزلاقيه , خوارزمية Super Twisting.

## **Résumé**

L'objectif de cette thèse est d'optimiser la conception d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne en établissant un équilibre optimal entre le coût, le rendement énergétique, les performances du système et la qualité de l'énergie injectée dans le réseau électrique. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé une modélisation, une commande et une simulation d'un générateur éolien comprenant une turbine éolienne, une machine asynchrone double alimentation sans balais à réluctance, des convertisseurs back to back et un bloc de commande.

Le bloc de commande est divisé en deux parties : le contrôle du convertisseur côté génératrice et le contrôle du convertisseur côté réseau. La modélisation de différents éléments liés au contrôle, tels que le bus continu et le filtre de liaison GSC-réseau, a été effectuée. Le stator primaire de la machine, fonctionnant en tant que générateur, est directement connecté au réseau électrique, tandis que le stator secondaire est connecté via des convertisseurs back to back, permettant ainsi le contrôle de l'ensemble du système éolien. Des techniques telles que l'orientation du flux statorique, la commande par mode de glissement de premier et de second ordre, ainsi que la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), ont été appliquées sur le bloc de commande afin de contrôler indépendamment les puissances active et réactive envoyées au réseau électrique par le générateur et d'extraire la puissance maximale. Les résultats de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne démontrent l'efficacité de la commande MPPT. Ils confirment que le contrôle indépendant des puissances active et réactive envoyées au réseau électrique par le générateur éolien a été réalisé avec succès en utilisant l'orientation du flux statorique. Les méthodes de commande non linéaires examinées dans cette étude ont démontré des performances élevées dans la gestion du système de conversion d'énergie éolienne. Les résultats de simulation ont confirmé l'efficacité et la robustesse de chaque méthode en termes de suivi, de fonctionnement à facteur de puissance unitaire, de découplage, de temps de réponse et de qualité du courant.

## **Mots clés**

Turbine Eolienne ; Machine Asynchrone Double Alimentation Sans Balais à Réluctance; Convertisseurs Back To Back ; MPPT (Maximum Power Point Tracking); Orientation du Flux Statorique ; Commande par Mode de Glissement; algorithme Super-Twisting.

## **Abstract**

The objective of this thesis is to optimize the design of a wind energy conversion system by establishing an optimal balance between cost, energy efficiency, system performance, and the quality of energy injected into the electrical grid. To achieve this objective, we conducted modeling, control, and simulation of a wind generator consisting of a wind turbine, a brushless doubly fed reluctance machine BDFRM, back-to-back converters, and a control block. The control block is divided into two parts: generator-side converter control and grid-side converter control. Modeling of various control-related elements, such as the DC bus and the GSC-grid link filter, was performed. The primary stator of the machine, operating as a generator, is directly connected to the electrical grid, while the secondary stator is connected via back-to-back converters, enabling control of the entire wind system. Techniques such as stator flux orientation, first and second-order sliding mode control, and Maximum Power Point Tracking (MPPT) control were applied to the control block to independently control the active and reactive powers sent to the electrical grid by the generator and extract maximum power. Simulation results of the overall wind system demonstrate the effectiveness of the MPPT control. They confirm that independent control of the active and reactive powers sent to the electrical grid by the wind generator has been successfully achieved using stator flux orientation. The nonlinear control methods examined in this study have demonstrated high performance in managing the wind energy conversion system. Simulation results have confirmed the efficiency and robustness of each method in terms of tracking, unity power factor operation, decoupling, response time, and current quality.

## **Key words**

Wind Turbine; Brushless Doubly Fed Reluctance Machine BDFRM ;Back To-Back Converter ;MPPT(Maximum Power Point Tracking); Stator Flux Oriented Control ;Sliding Mode Control ;Super Twisting Algorithm.



# Table des Matières

Introduction générale..... 1

## **Chapitre I**

### Généralités sur l'Énergie Éolienne

I.1	Introduction.....	7
I.2	Définition de l'énergie éolienne.....	7
I.3	Historique.....	8
I.4	Énergie éolienne dans le monde .....	9
I.5	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	11
I.5.1	Avantages.....	11
I.5.2	Inconvénients .....	11
I.6	Application des éoliennes .....	12
I.6.1	Système connecté au réseau.....	12
I.6.2	Système autonome.....	12
I.6.3	Systèmes hybrides.....	13
I.7	Les différents types d'éoliennes .....	13
I.7.1	Eoliennes à axe vertical .....	13
I.7.2	Eoliennes à axe horizontal.....	15
I.8	Principaux composants d'une éolienne a axe horizontal.....	16
I.9	Éoliennes connectées au réseau électrique.....	19
I.9.1	Eoliennes à vitesse fixe .....	19
I.9.2	Eoliennes à vitesse variable.....	22
I.10	Machines électriques .....	22
I.10.1	Machine synchrone.....	23
I.10.1.1	machine synchrone à rotor bobiné.....	23
I.10.1.2	Machine synchrone a aimants permanents.....	24

## ***Table des Matières***

I.10.2 MACHINE ASYNCHRONE.....	24
I.10.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	25
I.10.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné.....	25
I.10.2.3 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade.....	27
I.10.2.4 Machine asynchrone à double alimentation sans balais (BDFIG) .....	27
I.10.2.5 Machine asynchrone double alimentation sans balais à réluctance (BDFRM) .....	28
I.10.3 Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes .....	29
I.11 Convertisseurs de puissance.....	31
I.12 Conclusion .....	34

## **Chapitre II**

### **Modélisation et Commande de la BDFRM**

II.1 Introduction.....	36
II.2 Principe de fonctionnement BDFRM.....	38
II.3 Mode de fonctionnement de la BDFRM.....	39
II.4 Modèle mathématique de la BDFRM.....	40
II.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	40
II.4.2 Modèle électrique de BDFRM dans le repère triphasé .....	41
II.4.3 Équations de tension BDFRM .....	41
II.4.4 Équations des flux .....	42
II.4.5 Équation mécanique .....	43
II.5 Transformation de Park.....	44
II.6 Modèle électrique de BDFRM dans le repère biphasé.....	45
II.6.1 Choix du référentiel.....	45
II.7 Modèle de la machine BDFRM lié au champ tournant.....	46
II.8 Equations d'état.....	47
II.9 Simulation du moteur raccorde au réseau.....	47
II.10 Commande vectoriel .....	48
II.10.1 Principe de la commande vectorielle.....	49
II.10.2 Variantes de la commande vectorielle.....	50

## ***Table des Matières***

II.10.3	Contrôle Vectoriel par orientation du flux statorique primaire de la BDFRM.....	50
II.10.4	Commande de la machine BDFRM fonctionnant en mode générateur.....	51
II.10.5	Calcul des régulateurs des puissances $Q_g$ et $P_g$ .....	53
II.10.6	Commande de la machine BDFRM fonctionnant en mode moteur.....	55
II.10.7	Calcul des régulateurs.....	56
II.11	Résultats de simulation.....	58
II.11.1	Fonctionnant en mode générateur.....	58
II.11.2	Fonctionnement en mode moteur.....	59
II.12	Conclusion.....	60

## **Chapitre III**

### **Modélisation, Commande et Simulation d'un Système Eolien Basé Sur la machine BDFRM**

III.1	Introduction.....	62
III.2	Système éolien étudié.....	62
III.3	Modélisation de la turbine éolienne .....	63
III.3.1	Modèle aérodynamique .....	64
III.3.2	Modèle du multiplicateur .....	65
III.3.3	Modèle de l'arbre mécanique .....	66
III.4	Rappel sur le modèle mathématique de la machine BDFRG.....	67
III.5	Modélisation de l'étage de conversion.....	68
III.5.1	Modélisation du convertisseur côté réseau .....	68

## **Table des Matières**

III.5.2	Modélisation	du	convertisseur	côté	
	machine.....				70
III.5.3	Principe	de		la	
	MLI.....				72
III.5.4	Algorithme de commande				72
III.6	Contrôle	du	convertisseur	cote	
	réseau .....				73
III.6.1	Synchronisation du système de l'onduleur avec le réseau				73
III.6.2	Contrôle des courants transitant dans le filtre RL.....				74
III.6.3	Contrôle	de	la	tension	du
	Vdc .....			bus	continu
					76
III.7	Extraction du maximum de la puissance du vent.....				77
III.8	Résultats			de	
	Simulations .....				81
III.9	Conclusion.....				85

## **Chapitre IV**

### Commande Par Mode Glissant d'un Système Eolien basé sur la machine BDFRM

IV.1	Introduction.....				87
IV.2	Commande par mode glissant.....				87
IV.3	Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable.....				88
IV.4	Concept	général	de	la	commande
	glissant.....			par	mode
					89
IV.4.1	Choix de la surface de glissement.....				89
IV.4.2	Conditions	de	convergence	et	
	d'existence.....				90
IV.4.3	La	détermination	de	la	loi
	commande .....			de	
					91
IV.5	Phénomène	du	Chattering	et	ses
	solutions .....				93
IV.5.1	Solutions	pour	atténuer	le	phénomène
	broutement.....			de	
					93
IV.5.2	Solution de couche limite				94
IV.5.3	Solution par des lois d'approche.....				95
IV.6	Commande par mode de glissement d'ordre supérieur				96
IV.6.1	Mode glissant d'ordre deux				97

## ***Table des Matières***

IV.6.1.1	Algorithme du Twisting.....	97
IV.6.1.2	Algorithme sous-optimal .....	98
IV.6.1.3	Algorithme du Super Twisting .....	99
IV.7	Application de la commande par mode glissant sur le système éolien à base de BDFRG .....	100
IV.7.1	Commande par mode glissant d'ordre un des puissances active et réactive .....	100
IV.7.2	Commande par mode glissant de second ordre des puissances active et réactive.....	102
IV.8	Résultats de simulation.....	103
IV.8.1	Résultats de simulation du système par la commande par mode glissant d'ordre un..	103
IV.8.2	Résultats de simulation du système par la commande mode glissant d'ordre deux...	106
IV.8	Conclusion.....	109
	Conclusion générale.....	110
	Références.....	112
	Annexe.....	120

# Introduction générale

Le monde est confronté aujourd'hui à un défi mondial de transition énergétique, car les pays développés et émergents ont de plus en plus besoin d'énergie pour la croissance de leur économie, dans un cadre de ressources énergétiques limitées et mal réparties. En même temps, le changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre oblige à modifier le schéma énergétique en faveur de ressources énergétiques plus respectueuses du climat, telles que l'hydroélectricité, l'éolien ou le solaire [1].

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas du tout nouvelle dans l'histoire de l'humanité. Pendant longtemps, les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et la biomasse étaient la principale possibilité pour produire de l'énergie. Cependant, cela a changé avec la révolution industrielle, où le charbon, le pétrole, le gaz naturel et l'énergie nucléaire sont devenus de plus en plus importants. Malheureusement, ces sources d'énergie fossiles et non renouvelables entraînent une pollution atmosphérique importante due aux émissions de gaz à effet de serre, ce qui provoque un changement climatique irréversible. De plus, dans le cas de l'énergie nucléaire, il y a une pollution par radiations à long terme [2].

Les formes d'énergie renouvelable qui connaissent actuellement la plus grande exploitation sont l'énergie hydraulique, l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne [3]. Le vent est certainement l'une des sources d'énergie verte naturelles et inépuisables les plus importantes. Pour cette raison, les scientifiques et les chercheurs ont entrepris un travail intensif sur la conception et la commande de différentes technologies de générateurs d'éoliennes afin d'augmenter la production d'énergie électrique [4].

Selon des statistiques préliminaires publiées par la WWEA aujourd'hui, le marché mondial des éoliennes a atteint un nouveau record en 2021 avec des éoliennes d'une capacité totale de 97,5 Gigawatt installées dans le monde, après 92,7 Gigawatt en 2020. La capacité globale de toutes les éoliennes dans le monde a maintenant dépassé 840 Gigawatt (après 742,5 Gigawatt en 2020), assez pour fournir plus de 7% de la demande mondiale d'électricité.

Récemment, la variété des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [5].

## *Introduction générale*

Ces éoliennes peuvent fonctionner soit avec une vitesse fixe (effectivement dans une plage de vitesse d'environ 1%), soit à vitesse variable.

Pour une éolienne à vitesse fixe, le générateur tourne à une vitesse constante ou proche de celle-ci, indépendamment de la vitesse du vent. La vitesse est déterminée par la fréquence de l'alimentation du réseau auquel le générateur est connecté. Ces éoliennes génèrent leur puissance maximale à une vitesse de vent spécifique et sont équipées d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil, qui présente à la fois une robustesse et une simplicité d'utilisation[6].

Néanmoins, il est important de souligner plusieurs inconvénients tels que le manque de contrôle des puissances active et réactive, ainsi que les risques de rupture de la boîte de vitesse en raison des charges mécaniques élevées. C'est pourquoi les fabricants d'éoliennes manifestent un intérêt croissant pour les dispositifs à vitesse variable.

Dans le cas d'une éolienne à vitesse variable, le générateur est contrôlé par un équipement électronique de puissance, permettant ainsi de réguler la vitesse du rotor. Cette approche permet d'atténuer les fluctuations de puissance induites par les variations du vent en ajustant la vitesse du rotor. Par conséquent, les variations de puissance résultant de la conversion du vent peuvent être réduites. En comparaison avec une éolienne à vitesse fixe, cela contribue à améliorer l'impact sur la qualité de l'énergie produite par l'éolienne [7].

Au cours des dernières décennies, les machines à double alimentation ont été largement utilisées dans différentes applications en raison de l'utilisation de convertisseurs partiellement dimensionnés pour contrôler la machine, ce qui a entraîné une réduction du coût du convertisseur [8]. De telles machines sont utilisées dans des applications où la vitesse change légèrement avec le temps, telles que les grandes éoliennes, ainsi que les entraînements de puissance comme les entraînements de pompe ou même les systèmes de propulsion distribués turboélectriques. Le type courant de machines à double alimentation à rotor à induction appelé machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans cette machine, deux enroulements séparés sont montés sur le stator et le rotor, dans lesquels l'enroulement du stator se connecte directement aux réseaux électriques tandis que l'enroulement du rotor se connecte indirectement aux réseaux électriques via deux convertisseurs back to back. Le principal avantage de ces machines est l'utilisation de convertisseurs partiellement dimensionnés, qui réduisent le coût des convertisseurs d'électronique de puissance par rapport à une éolienne à vitesse variable alimentée par le stator. La présence de balais et de bagues collectrices pour connecter le rotor aux convertisseurs augmente le besoin de maintenance, et la probabilité de panne et les pertes de puissance. Pour résoudre ce problème, le type de DFM

## *Introduction générale*

sans balais, à savoir la machine sans balais à double alimentation (BDFM). Le principal avantage de la technologie BDFM par rapport au DFM est l'absence de brosse et de bague collectrice, ce qui réduit le besoin de services de maintenance et de plus, améliore la robustesse de la machine [9].

Dans le BDFIM, le rotor bobiné est court-circuité ou à cage, alors que le stator a deux enroulements. Un enroulement est directement connecté aux réseaux électriques, tandis que l'autre enroulement est connecté aux réseaux électriques via deux convertisseurs back to back. Ainsi, les deux enroulements sont sur le stator, alors qu'ils ont un couplage indirect via le rotor et qu'il n'y a pas de couplage direct entre eux. Le BDFM est attrayant pour être utilisé dans de nombreuses applications, telles que les systèmes de régulation de vitesse à fréquence variable et les systèmes de génération de fréquence constante à vitesse variable. Par conséquent, la conception et le contrôle de BDFM ont suscité beaucoup d'intérêt. Les importantes pertes de rotor et le faible rendement provoqués par la cage ou le rotor bobiné rendent la machine considérablement dépendante des paramètres et compliquent le fonctionnement du contrôleur. De tels inconvénients rendent le BDFIM difficile à mettre en œuvre. En conséquence, une autre technologie BDFM prometteuse a été proposée qui a un rotor de type à réluctance appelé Brushless Double-Fed Reluctance Machine (BDFRM). Le BDFRM a été introduit pour la première fois au début des années 1970. Dans cette machine, il n'y a pas de rotor bobiné ou à cage. Par conséquent, il a une fiabilité plus élevée et des pertes de puissance plus faibles par rapport à son homologue à induction, c'est-à-dire BDFIM. De plus, le BDFRM est approximativement sans entretien en raison de l'absence d'enroulement du rotor par rapport au BDFIM à rotor bobiné. Une structure plus simple, une taille plus petite, une densité de puissance plus élevée, une efficacité plus élevée et un coût de maintenance inférieur sont les autres avantages du BDFRM par rapport aux machines traditionnelles. De plus, le contrôle du BDFRM est beaucoup plus facile grâce à son rotor sans cage. La technologie du BDFRM a un fort potentiel d'utilisation dans des applications à vitesse restreinte de grande puissance en raison de son coût de fabrication, ainsi que des critères de fiabilité et de robustesse. Il peut également être utilisé dans des applications telles que les turbomachines, les applications éoliennes à fréquence constante et à vitesse réglable et les applications hydroélectriques, la climatisation, le chauffage commercial et les entraînements de grandes pompes. L'application du BDFRM dans les éoliennes, en particulier celles offshore, a accéléré les études de recherche sur le BDFRM, en raison des avantages des éoliennes du point de vue du coût de production d'énergie nul et des problèmes environnementaux. En raison de l'application et de l'importance du BDFRM. Cependant, son

## *Introduction générale*

fonctionnement compliqué en raison du concept de couplage entre les enroulements du stator via le rotor à réluctance est moins étudié. Une implication des bases de fonctionnement inhabituelles et de la conception inappropriée est le couple insignifiant par volume pour les BDFRM construits, et donc, un BDFRM plus grand et plus cher est nécessaire pour atteindre le couple d'une réluctance synchrone équivalente ou d'une machine à induction à cage. Cependant, des progrès récents ont révélé que les BDFRM peuvent fonctionner avec une efficacité et une densité de couple élevées (rapport couple par volume) lorsqu'ils sont correctement conçus. De plus, la diminution de leur rapport masse par couple a également été étudiée dans la littérature. De plus, il est révélé que la BDFRM peut atteindre une meilleure densité de couple qu'une machine à induction à rotor à cage utilisant le même châssis. En raison des avantages mentionnés du BDFRM par rapport au BDFIM, tels que le faible coût de fabrication résultant de son rotor à réluctance, la grande fiabilité résultant de la structure sans balais, les faibles pertes et les besoins de maintenance réduits, des études de recherche ont été menées depuis les années 1990 pour analyser ces machines [10].

L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'étude des stratégies de commande robuste de la BDFRM lorsqu'elle fonctionne en tant que génératrice dans les systèmes de production d'énergie éolienne. Pour ce faire, une analyse des différentes structures de ces systèmes est nécessaire afin de sélectionner la plus performante. La structure choisie consiste en la BDFRM, entraînée par une turbine. Cette machine est directement connectée au réseau électrique via le stator de puissance et est contrôlée par les grandeurs statoriques du stator de commande grâce à deux convertisseurs bidirectionnels. Ces convertisseurs ont pour rôle principal de connecter la génératrice éolienne au réseau électrique de deux manières différentes : l'un sur le convertisseur côté réseau, permettant le contrôle du bus continu et l'amélioration du facteur de puissance côté réseau ; l'autre sur le convertisseur côté bobinage de commande, permettant le contrôle et l'optimisation du flux énergétique généré par le stator de puissance pendant les périodes de fonctionnement du système. Afin d'assurer un rendement et une qualité de production optimaux, plusieurs techniques de commande seront développées dans le cadre de ce travail.

Le premier chapitre présente les généralités sur l'énergie éolienne. Nous commençons par une définition de cette énergie en montrant quelques chiffres concernant la production d'électricité de cette énergie dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne est devenue inéluctable ; ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes éoliens et leurs applications. Nous allons aussi présenter les différents types des éoliennes et les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal ; ensuite, nous allons exposer les deux

## *Introduction générale*

technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. La dernière partie de ce chapitre sera une présentation des différents types et des principales caractéristiques des générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens en précisant les convertisseurs d'électronique de puissance associés.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation le principe de fonctionnement et les différents types de fonctionnement après on présenter le modèle mathématique triphasé de la BDFRM et comment il est transformé en un système diphasé en utilisant des hypothèses simplificatrices. Ensuite, nous utiliserons la commande vectorielle sur le modèle de la machine pour découpler les puissances active et réactive envoyées par la machine au réseau électrique en mode générateur, ainsi que pour découpler la vitesse de rotation mécanique et la puissance réactive de la machine en mode moteur. À la fin du chapitre, nous présenterons les résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée sur la BDFRM pour ses deux modes de fonctionnement (générateur et moteur).

. Le troisième chapitre se consacre à l'étude globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Ce système, illustré par la Figure III.1, repose sur une éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance reliée au réseau électrique par le biais de deux convertisseurs back to back. Une liaison continue entre les deux convertisseurs est établie par un bus continu à base de capacitances. Le convertisseur côté générateur (MSC) assure à la fois la conversion AC/DC et le contrôle de la vitesse de la BDFRM en fonction de la vitesse du vent afin d'extraire une puissance maximale (contrôle MPPT). Quant au convertisseur côté réseau (GSC), il est responsable de l'injection de l'énergie produite dans le réseau, avec la régulation de la puissance active et réactive, ainsi que la régulation de la tension du bus continu (contrôle PQ). Le GSC est connecté au réseau via un filtre de type RL qui élimine les harmoniques présentes dans le courant injecté au réseau.

L'étude du système global abordée dans ce chapitre comprend une éolienne, une machine asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance, des convertisseurs back to back et un bloc de commande. Ce bloc de commande est divisé en deux parties : le contrôle du convertisseur côté générateur et le contrôle du convertisseur côté réseau. Divers éléments liés au contrôle, tels que le bus continu et le filtre de liaison entre le GSC et le réseau, sont modélisés. Enfin, la simulation du système global sera mise en œuvre sous MATLAB/Simulink.

Le quatrième chapitre sera subdivisé en deux parties. La première partie sera consacrée à la présentation théorique de la commande par mode glissant de premier et de second ordre. La

## ***Introduction générale***

seconde partie sera dédiée à l'application du contrôle par mode glissant de premier et de second ordre au système éolien à vitesse variable basé sur le BDFRM.

**CHAPITRE I :**  
**Généralités sur l'Énergie**  
**Éolienne**

## **I.1 Introduction**

L'énergie renouvelable est essentielle pour minimiser les effets néfastes du réchauffement de la planète, qui est l'une des principales raisons des derniers changements climatiques sur terre. En outre, les sources traditionnelles de combustibles fossiles, comme le charbon et le pétrole, devraient s'épuiser dans un avenir proche. D'autre part, l'énergie nucléaire, principale source d'énergie non fossile, est difficile à contrôler et produit des déchets nocifs pour l'homme et la nature. Les incidents survenus dans les réacteurs nucléaires de Tchernobyl (1986) et de Fukushima (2011) ont provoqué la dernière réaction négative à l'égard de la production d'énergie nucléaire, ce qui a incité des états comme l'Allemagne à déclarer qu'elle fermerait ses dernières centrales nucléaires dans un avenir proche [11-13]. Les inconvénients susmentionnés des sources d'énergie classiques indiquent clairement l'importance du développement de sources d'énergie propres et fiables en tant que solution alternative[14].

Le vent est certainement l'une des plus importantes sources naturelles non épuisables d'énergie verte. Pour cette raison, les scientifiques et les chercheurs ont commencé un travail intensif sur la conception et le contrôle de différentes technologies de générateurs d'éoliennes pour une plus grande production d'énergie électrique[15].

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur l'énergie éolienne. Nous commençons par une définition de cette énergie en montrant quelques chiffres concernant la production d'électricité de cette énergie dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne est devenue inéluctable ; ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes éoliens et leurs applications. Nous allons aussi présenter les différents types des éoliennes et les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal ; ensuite, nous allons exposer les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable. La dernière partie de ce chapitre sera une présentation des différents types et des principales caractéristiques des générateurs électriques utilisés dans les systèmes éoliens en précisant les convertisseurs d'électronique de puissance associés.

## **I.2 Définition de l'énergie éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le

refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [16].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure I.1).

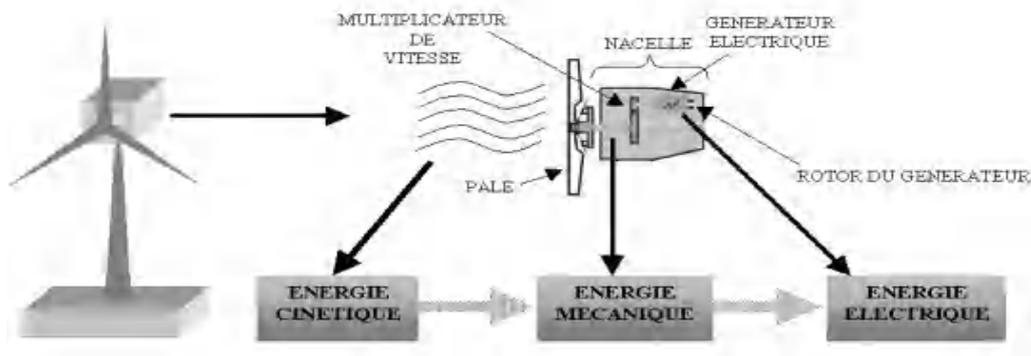


Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [17]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [17].

### I.3 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C environ. Hammourabi fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent [18]. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du moyen âge. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de "moulins", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour

assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV<sup>e</sup> siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive [19].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, environ 1 million d'aérogénérateurs fonctionnait dans le monde. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [20].



Figure I.2 les moulins à vent [20]

#### **I.4 Énergie éolienne dans le monde**

Selon des statistiques préliminaires publiées par la WWEA, aujourd'hui, le marché mondial des éoliennes a atteint un nouveau record en 2021 avec des éoliennes d'une capacité totale de 97,5 GW installées dans le monde, après 92,7 GW en 2020. La capacité globale de toutes les éoliennes dans le monde a maintenant dépassé 840 GW (après 742,5 GW en 2020), assez pour fournir plus de 7% de la demande mondiale d'électricité.

Selon les chiffres préliminaires de la Chine, le pays a installé à lui seul 55,8 Gigawatts en 2021, battant à nouveau son propre record de 2020 où 52 GW ont été installés. Cela équivaut à une croissance de 19,4 %. La Chine compte désormais 344 GW d'éoliennes installées à travers le pays.

Les États-Unis, en tant que deuxième marché mondial, ont connu une croissance robuste de 12,5 GW, bien que nettement inférieure à celle de 2020, lorsque près de 17 GW ont été ajoutés. La capacité éolienne installée aux États-Unis est maintenant proche de 135 GW.

Le Brésil s'est avéré être le troisième marché mondial pour les nouvelles éoliennes à affiché une croissance de 18,6 %, ajoutant 3,4 GW en un an. Cela fait du pays le leader incontesté de l'énergie éolienne en Amérique du Sud, avec une capacité éolienne globale de 21,4 GW.

Les marchés européens montrent des évolutions diverses : Alors que le Royaume-Uni (2,6 GW) et la Suède (2,2 GW) ont réalisé de nouvelles installations de plus de 2 GW et que l'Allemagne s'est légèrement améliorée avec 1,7 GW d'ajouts nets, bien qu'encore bien en deçà 2017/2018, plusieurs marchés européens ont sous-performé en 2021. La Suède est entrée dans le top dix des marchés éoliens en tant que nouveau venu, avec désormais 12 GW de capacité éolienne globale.

Le deuxième plus grand pays asiatique d'énergie éolienne, l'Inde, a atteint un jalon de plus de 40 GW de capacité totale, cependant, le pays est en retard sur ses objectifs et a ajouté environ 1,5 GW au cours de l'année civile 2021. Des objectifs nationaux ambitieux pour l'énergie éolienne indiquent qu'on peut s'attendre à une forte croissance dans un avenir proche.

Le plus grand producteur de l'énergie éolienne dans l'Afrique est l'Afrique du Sud (3163 MW), suivi par l'Égypte 1702 MW, le Maroc 1458 MW, le Kenya 338 MW, l'Éthiopie 324 MW, la Tunisie 245 MW, le Cap-Vert 25 MW, et l'Algérie 10 MW [21].

L'évolution de l'énergie éolienne à travers le monde par année et la capacité de production totale de cette énergie par pays sont respectivement présentées sur la figure I.1 et le tableau I.1.

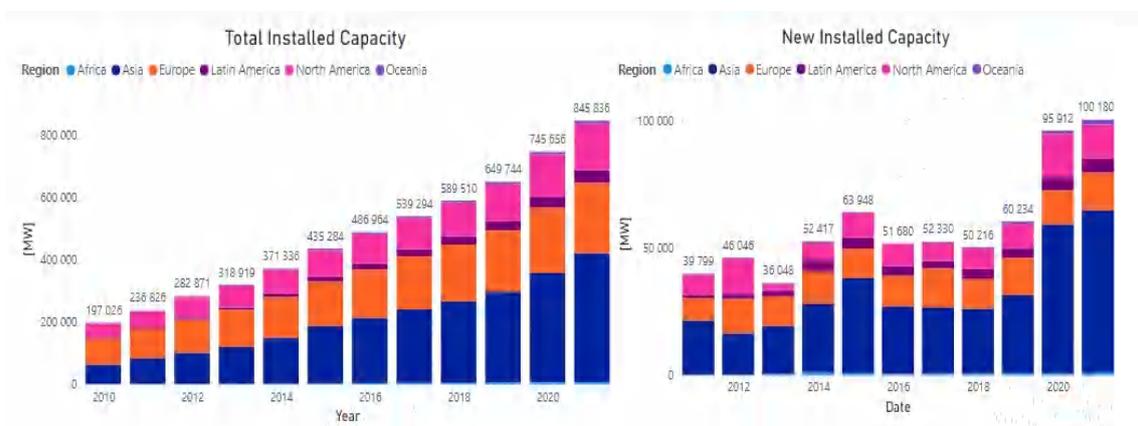


Figure I. 3 L'énergie éolienne à travers le monde [21]

Tableau I.1 : Capacité de production éolienne totale installée et ajoutée [21]

Country/Region	2021	New Capacity 2021	Growth Rates 2021	2020	2019	2018
China*	343'829	55'800	19.4%	288'029	236'029	209'529
United States***	134'846	12'518	10.2%	122'328	105'433	96'363
Germany	63'924	1'716	2.8%	62'208	61'357	59'313
India	40'100	1'475	3.8%	38'625	37'529	35'129
Spain	28'196	750	2.7%	27'446	25'808	23'494
United Kingdom	26'812	2'645	10.9%	24'167	23'515	20'743
Brazil**	21'365	3'355	18.6%	18'010	15'452	14'707
France	19'081	1'132	6.3%	17'949	16'646	15'313
Canada	14'304	677	5.0%	13'627	13'413	12'816
Sweden	12'097	2'175	21.9%	9'922	8'985	7'406
Rest of the World*	135'166	15'019	12.5%	120'147	105'618	94'719
<b>Total*</b>	<b>839'730</b>	<b>97'272</b>	<b>13.1%</b>	<b>742'458</b>	<b>649'785</b>	<b>589'547</b>

\* Preliminary, \*\* By November 2021, \*\*\* Excl. Puerto Rico

©WWEA 2022

Cela équivaut à un taux de croissance de 13 %, contre 14 % un an plus tôt et 10 % en 2019.

### I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne offre de nombreux avantages, ce qui explique pourquoi elle est la source d'énergie qui connaît la plus forte croissance dans le monde. Les efforts de recherche visent à relever les défis pour accroître l'utilisation de cette énergie.

#### I.5.1 Avantages

- Les systèmes d'énergie éolienne sont alimentés par le vent qui circule naturellement. Elle peut être considérée comme une source d'énergie propre qui ne pollue pas l'air comme les centrales électriques qui utilisent des combustibles fossiles, tels que le charbon ou le gaz naturel. Les éoliennes ne produisent pas d'émissions atmosphériques à l'origine des pluies acides ou des gaz à effet de serre.
- L'énergie éolienne est disponible en tant que source d'énergie domestique dans de nombreux pays du monde et ne se limite pas à quelques pays seulement, comme dans le cas du pétrole.
- L'énergie éolienne est l'une des technologies d'énergie renouvelable les moins chères disponibles aujourd'hui.
- Les éoliennes peuvent également être construites dans des fermes ou des ranchs, ce qui profite à l'économie des zones rurales, où se trouve la plupart des meilleurs sites éoliens. Les agriculteurs et les éleveurs peuvent continuer à utiliser leurs terres car les

éoliennes n'utilisent qu'une petite partie des terres. Les propriétaires de centrales éoliennes versent des loyers à l'agriculteur ou à l'éleveur pour l'utilisation de la terre.

### **I.5.2 Inconvénients**

- L'énergie éolienne doit concurrencer les sources de production d'électricité conventionnelles coté coûts. Selon le profil de vent sur le site, le parc éolien ne peut pas être compétitif à une centrale électrique à combustible fossile. Même si le coût de l'énergie éolienne a diminué au cours des 10 dernières années, la technologie nécessite un investissement initial plus élevé que les solutions d'alimentation à énergie fossile.
- Le principal défi de l'utilisation du vent comme source d'énergie est que le vent est intermittent et qu'il ne souffle pas toujours lorsque l'électricité est nécessaire. L'énergie éolienne ne peut pas être stockée ; et tous les vents ne peuvent pas être exploités pour répondre au calendrier des demandes d'électricité. L'option de stockage d'énergie dans des bancs de batteries dépasse les limites économiquement réalisables pour les grandes éoliennes.
- Les bons sites éoliens sont souvent situés dans des endroits éloignés, loin des villes où l'électricité est nécessaire. Dans les pays en développement, il y a toujours le coût supplémentaire de la pose du réseau pour connecter les parcs éoliens éloignés au réseau d'approvisionnement.
- Bien que les centrales éoliennes aient relativement peu d'impact sur l'environnement par rapport aux autres centrales électriques conventionnelles, le bruit produit par les pales du rotor et les impacts esthétiques (visuels) suscitent certaines inquiétudes. La plupart de ces problèmes ont été résolus ou considérablement réduits grâce au développement technologique ou à l'implantation appropriée des centrales éoliennes [22].

### **I.6 Application des éoliennes**

Du point de vue de l'utilisation de l'électricité produite, les systèmes éoliens peuvent être utilisés en trois applications, comme expliqué ci-dessous :

#### **I.6.1 Système connecté au réseau**

Le système connecté au réseau est branché à un système de transmission et de distribution d'électricité appelé systèmes connectés au réseau. Une éolienne connectée au réseau peut être utilisée pour réduire la consommation de vecteurs énergétiques fossiles. Si la turbine ne peut pas fournir la quantité d'énergie nécessaire, le service public compense la différence.

#### **I.6.2 Système autonome**

Comme leur nom l'indique, les systèmes autonomes ne sont pas connectés au réseau électrique. Les systèmes d'énergie éolienne autonomes peuvent convenir aux maisons, aux fermes ou même à des communautés entières (un projet de cohabitation, par exemple) qui sont éloignées des lignes électriques les plus proches. Cependant, si le réseau est disponible dans une zone proche, il est toujours avantageux d'être connecté au réseau. Par conséquent, les systèmes autonomes ne sont utilisés que dans les zones où le réseau n'est pas du tout disponible.

### **I.6.3 Systèmes hybrides**

Un système hybride utilisant l'énergie éolienne est un système dans lequel le fonctionnement d'une éolienne est combiné à toute autre source d'énergie. Une telle combinaison peut être considérée comme un autre type de système autonome. Cette source peut être, par exemple, un système photovoltaïque ou un groupe électrogène diesel. Pour préciser la nature de ces systèmes, on utilise parfois le terme "système hybride autonome" pour différencier les systèmes hybrides dans lesquels l'éolienne fonctionne en mode hybride avec l'alimentation du réseau.

Sur de nombreux sites, la vitesse du vent est faible en été, lorsque le soleil brille le plus et le plus longtemps. Le vent est fort en hiver lorsqu'il y a moins d'ensoleillement disponible. Étant donné que les périodes de pointe de fonctionnement des systèmes éoliens et photovoltaïques se produisent à différents moments de la journée et de l'année, les systèmes hybrides sont plus susceptibles de produire de l'électricité au besoin.

Pour les moments où ni l'éolienne ni les modules photovoltaïques ne produisent d'électricité (par exemple, la nuit quand le vent ne souffle pas), la plupart des systèmes autonomes fournissent de l'énergie via des batteries et/ou un moteur-générateur alimenté par des combustibles fossiles comme le diesel. Si les batteries sont faibles, le moteur-générateur peut fonctionner à pleine puissance jusqu'à ce que les batteries soient chargées. L'ajout d'un générateur à combustible fossile rend le système plus complexe, mais les contrôleurs électroniques modernes peuvent faire fonctionner ces systèmes complexes automatiquement. L'ajout d'un moteur-générateur peut également réduire le nombre de modules photovoltaïques et de batteries dans le système. Il convient de s'assurer que la capacité de stockage est suffisamment importante pour répondre aux besoins électriques pendant les périodes de non-charge. Les bancs de batteries sont généralement dimensionnés pour un à trois jours de fonctionnement sans vent [23].

### **I.7 Les différents types d'éoliennes**

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

### I.7.1 Eoliennes à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus: conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius: inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924) [24].

#### ➤ Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Le rotor Darrieus peut être analysé avec les méthodes de tube à flux unique ou multiple décrites. Les principales différences concernent (1) l'orientation des éléments de pale, qui sont maintenant différents les uns des autres, et (2) la distance des éléments de pale à l'axe de rotation, qui n'est pas constante sur la longueur de la lame [25].

#### ➤ Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Le rotor Savonius est une éolienne à axe vertical avec une section en forme de S vue de dessus. Un schéma est illustré à la figure I. 4. Il s'agit principalement d'un dispositif de type traînée, mais il peut également y avoir une certaine portance contribuant à la puissance. La puissance du Savonius est basée sur la différence de pression entre la pale qui se retire du vent et celle qui avance dans le vent. Ceci est à son tour lié à la différence des coefficients de traînée associés au côté convexe de la pale et au côté concave des pales. Une discussion détaillée de l'aérodynamique du rotor Savonius peut être trouvée dans [26].

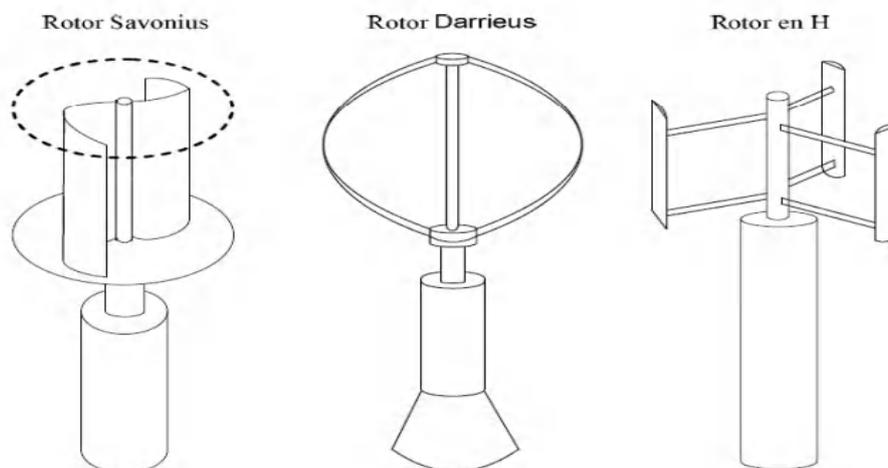


Figure I. 4 Eolienne à axe vertical

Le tableau I.2 résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

Avantages	Inconvénients
La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner qu'elle que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.	La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

**I.7.2 Eoliennes à axe horizontal**

Les turbines de vent horizontales peuvent être construites avec deux ou trois pales. La technologie largement dominante aujourd'hui c'est la turbine tripale à axe horizontal, parfois bipale et à rotor face au vent. La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière (voir la figure I.5) : en amont(Upwind) ou en aval(Downwind) [27].

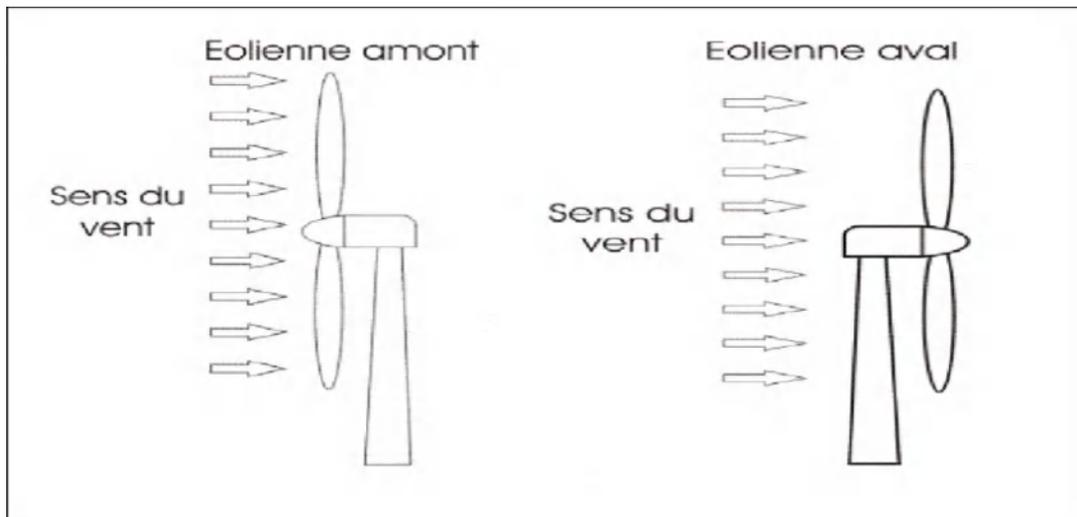


Figure 1.5 Turbines éoliennes en amont et en aval

Selon son nombre de pales, l'éolienne à axe horizontal est dite mono pale, bipales, tripales ou multipales. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité. Cependant, un contre poids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela.

Les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive pas des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour. Alors, pour remédier à ces problèmes, pratiquement toutes les éoliennes installées sont de type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et présentent le coefficient de puissance le plus élevé. Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal [28].

Le tableau ci-dessous résume les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe horizontal :

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

Avantages	Inconvénients
Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.	Coût de construction très élevé.
Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.	L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage	La nécessité d'un système d'orientation des pales

### I.8 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales, la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement [29].

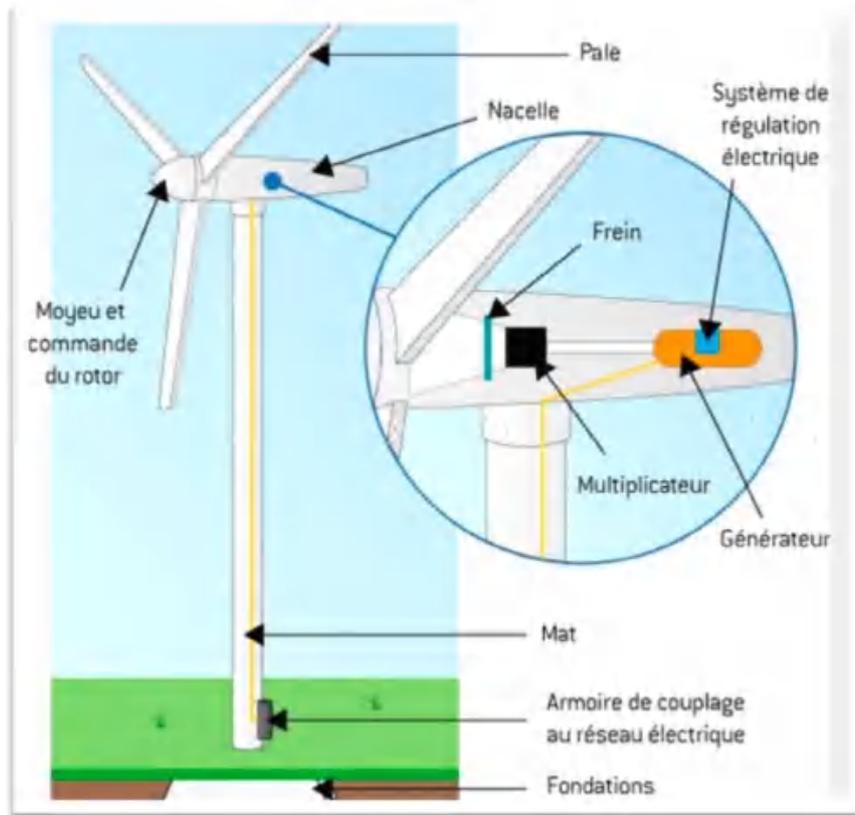


Figure 1.6 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

- **Le mât** : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor), voir figure I.7. Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont si haut perchées parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons..., et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [30].

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor.



Figure I.7. Tour d'une turbine

- **Un rotor** : composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone.

Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre du rotor.



Figure I.8. Rotor d'une turbine

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

- **Une nacelle** : montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [20]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle

jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne (figure I.9).

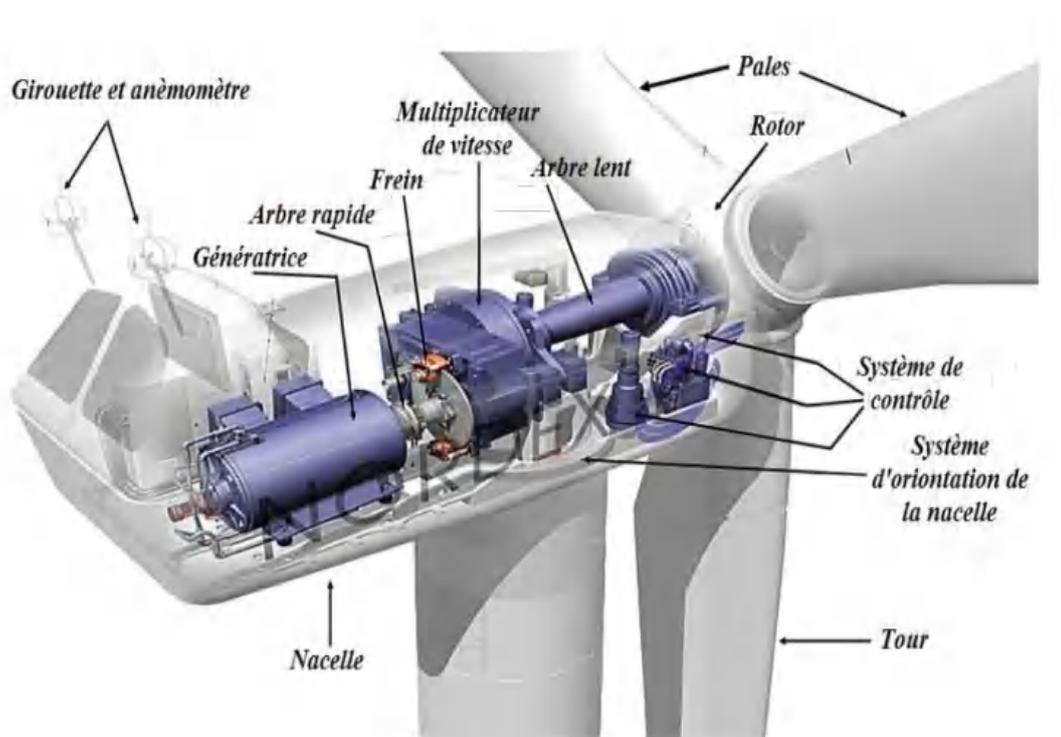


Figure I.9 Constitution d'une nacelle

Grâce à un système de supervision et du contrôle, une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

- Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite [31].

## I.9 Éoliennes connectées au réseau électrique

### I.9.1 Éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe fonctionnent à vitesse constante. Cela signifie que, quelle que soit la vitesse du vent, la vitesse du rotor de l'éolienne est fixe et déterminée par la fréquence du réseau. Les éoliennes à vitesse fixe sont généralement équipées de générateurs asynchrones à cage d'écureuil (SCIG), d'un démarreur progressif et d'un banc de condensateurs, liés directement au réseau, comme le montre la figure I.10. Cette configuration d'éolienne est également connue sous le nom de "Danish concept", car elle a été développée et largement utilisée au Danemark [32].

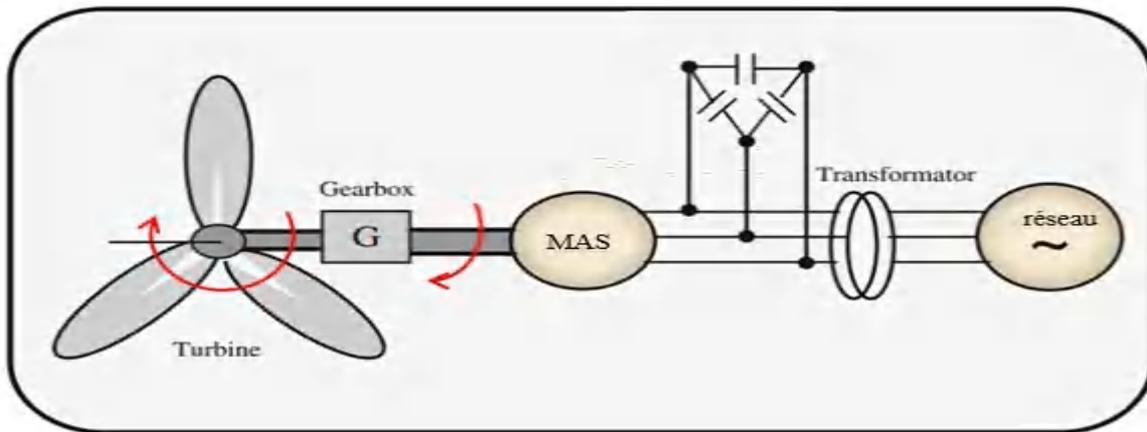


Figure I.10 Éolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Initialement, la machine asynchrone à cage d'écureuil est connectée en régime moteur de telle sorte qu'elle génère un couple électromagnétique dans la même direction que le couple du vent. En régime permanent, la vitesse de rotation dépasse la vitesse synchrone et le couple électromagnétique est négatif. Cela correspond au fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil en mode génératrice (ou en régime hyper-synchrone) [33]. Comme elle est directement connectée au réseau, la machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionne sur sa caractéristique mécanique naturelle ayant une grande rigidité (correspondant à un petit glissement) donnée par la résistance du rotor. Par conséquent, la vitesse de rotation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est très proche de la vitesse synchrone imposée par la fréquence du réseau. De plus, les variations de la vitesse du vent n'induisent que de faibles variations de la vitesse du générateur. Comme la puissance varie proportionnellement au cube de la vitesse du vent, les variations électromagnétiques associées sont importantes.

Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont largement répandues car elles sont mécaniquement simples, ont un rendement élevé et un faible coût de maintenance. En outre, elles sont très robustes et stables. L'un des principaux inconvénients de ces machines c'est qu'il existe une relation étroite entre la puissance active, la puissance réactive, la tension aux bornes et la vitesse du rotor [34]. Cela signifie qu'une augmentation de la production de puissance active n'est possible qu'avec une augmentation de la consommation de puissance réactive, ce qui conduit à un facteur de puissance à pleine charge relativement faible. Afin de limiter l'absorption de la puissance réactive du réseau, les WECS basés sur la machine asynchrone à cage d'écureuil sont équipés de batteries de condensateurs. Le rôle du démarreur progressif est de lisser les courants d'appel pendant la connexion au réseau [35].

Les éoliennes basées sur les machines asynchrones à cage d'écureuil sont conçues pour atteindre une efficacité énergétique maximale à une vitesse de vent fixe. Afin d'augmenter

l'efficacité énergétique, le générateur de certaines éoliennes à vitesse fixe possède deux jeux d'enroulements, et donc deux vitesses. Le premier jeu est utilisé à faible vitesse de vent (généralement huit pôles) et l'autre à moyenne et grande vitesse de vent (généralement quatre à six pôles).

Les éoliennes à vitesse fixe ont l'avantage d'être simples, robustes et fiables, avec des systèmes électriques simples et peu coûteux et un fonctionnement éprouvé. Par contre, du fait du fonctionnement à vitesse fixe, la contrainte mécanique est importante. Toutes les fluctuations de la vitesse du vent sont transmises au couple mécanique et ensuite, en tant que fluctuations électriques, au réseau. De plus, les éoliennes à vitesse fixe ont une contrôlabilité très limitée (en termes de vitesse de rotation), puisque la vitesse du rotor est fixe, presque constante, dépendante de la fréquence du réseau.

L'évolution des éoliennes basées sur les machines asynchrones à vitesse fixe a donné naissance aux éoliennes à vitesse variable limitée. Elles sont équipées d'un générateur asynchrone à rotor bobiné (WRIG) à résistance de rotor externe variable voir la figure I.11. La particularité de cette éolienne c'est qu'elle possède une résistance rotorique supplémentaire variable, pilotée par une électronique de puissance. Ainsi, la résistance totale (interne plus externe) du rotor est réglable, contrôlant en outre le glissement du générateur et donc la rigidité de la caractéristique mécanique. Évidemment, la plage du contrôle dynamique de la vitesse est déterminée par la taille de la résistance supplémentaire. Habituellement, la plage de contrôle est jusqu'à 10% de la vitesse synchrone [36].

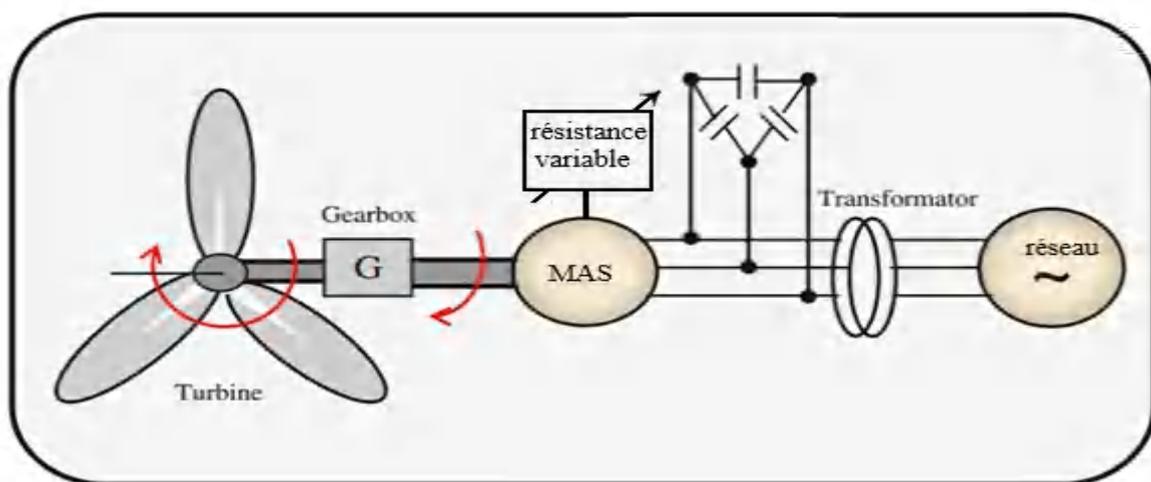


Figure I.11 Eolienne à vitesse variable limitée, à base de la machine asynchrone à rotor bobiné

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des machines asynchrones à cage d'écurie sont les suivants [37] :

- Système électrique simple ;
- Haute fiabilité ;
- Coût modéré.

Leurs principaux inconvénients sont les suivants :

- La puissance extraite n'est pas optimisée : Avec ce type d'éolienne, nous n'avons pas la possibilité d'ajuster la puissance produite.
- Absence de gestion de la puissance réactive par le générateur à induction : Le raccordement direct d'un générateur à induction au réseau nécessite l'ajout de batteries de condensateurs pour réduire la puissance réactive nécessaire au réseau.

### **I.9.2 Eoliennes à vitesse variable**

Ce système est très simple, mais il peut être bruyant du fait de l'orientation des pales qui limite la plage de vitesses de vent exploitables. Pour cela, un fonctionnement à vitesse variable sera nécessaire pour maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est pas possible à cause des variations de fréquence de la tension statorique. Une interface électronique de puissance (PE) entre le générateur et le réseau est nécessaire [38]. Il se compose de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés via un bus de tension continue [39].

Les principaux avantages et inconvénients des éoliennes à vitesse variable sont les suivants [40] :

- Augmentation de l'efficacité énergétique.
- Réduction de l'ondulation du couple.
- Génération d'une puissance électrique de haute qualité.
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.

Les inconvénients:

- Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation du convertisseur de puissance.
- Système de commande plus complexe.

### **I.10 Machines électriques**

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [41].

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans ces systèmes sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [37].

### I.10.1 Machine synchrone

Les grandes éoliennes qui ne nécessitent pas de multiplicateur, sont basées généralement sur les génératrices synchrones. Ces dernières ont plusieurs avantages, à savoir: un bon rendement, un couple massique important à dimensions convenables, comme ils ne demandent pas d'énergie réactive pour la magnétisation du rotor qui est assuré directement par un aimant permanent ou par un enroulement d'excitation. Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [42].

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (voir figure I.12) [43].

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aérogénérateur. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

#### I.10.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné

Les variations importantes des couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien peuvent causer une démagnétisation des aimants et une diminution de leur durée de vie, car ces dernières sont constituées généralement d'un matériau peu fréquent, à cause de la difficulté et du coût de son extraction de la terre [44].

Pour limiter cet inconvénient, certains fabricants ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à rotor bobiné, le champ tournant rotorique est créé par un enroulement alimenté en courant continu (roue polaire) au moyen d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation exige la présence d'un contact glissant au rotor, ou par un système "Brushless" avec un redresseur tournant [45].

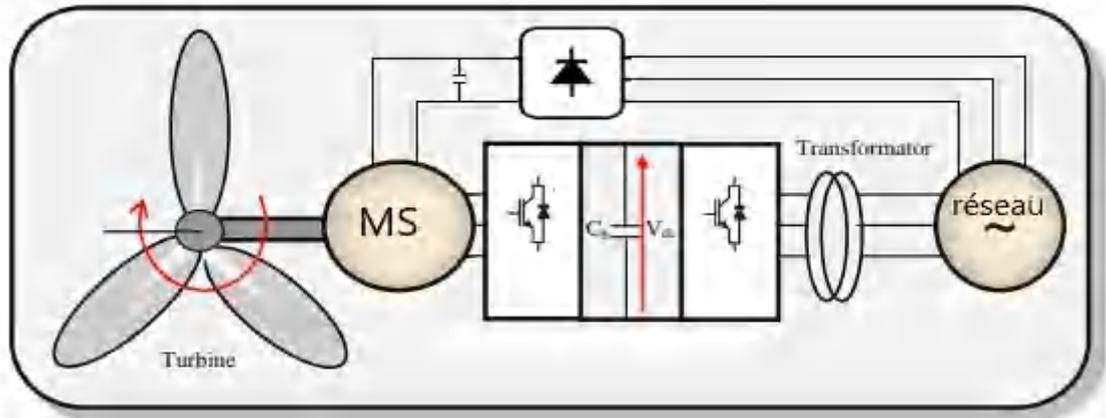


Figure I.12 Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone à rotor bobiné

### I.10.1.2 Machine synchrone à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis l'amélioration des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs. Ce type de machine utilise un aimant permanent à rotor multipôles, ce qui donne l'avantage d'avoir un grand couple massique [46].

La suppression du système de balais - bagues et du multiplicateur de l'éolienne a minimisé les frais d'entretien du système. De plus, la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement. Il existe plusieurs types de ces machines destinées aux applications éoliennes comme: les machines de construction standards (radiales), les génératrices discoïdes (champs axial) et les machines à rotor extérieur [47].

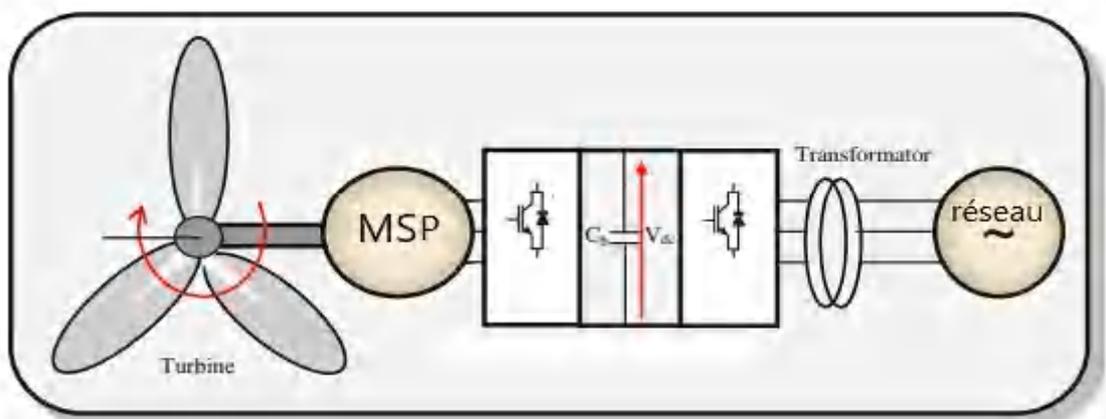


Figure I.13 Eolienne à vitesse variable à base d'une machine synchrone à aimants permanents

### I.10.2 Machine asynchrone

La machine asynchrone est la machine la plus répandue dans le domaine de production d'énergie éolienne. Ce type de machine offre la possibilité de travailler à vitesse variable tout en respectant les contraintes de fréquence et de tension.

Il existe plusieurs types de machines asynchrones à savoir : la machine asynchrone à cage, la machine asynchrone à double stator, la machine asynchrone double alimentée à rotor bobiné, la machine asynchrone double alimentée sans collecteur et la machine à réluctance à double alimentation de type brushless.

### I.10.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Nous avons vu précédemment que si la machine asynchrone à cage d'écureuil est connectée directement au réseau électrique, la puissance fournie au celui-ci ne peut pas être optimal car la machine n'a pas la possibilité de fonctionner à vitesse variable. La figure I.14 illustre une structure d'une éolienne à vitesse variable utilisant la même machine. Le stator de la machine est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance qui permet de contrôler et de varier la vitesse de la machine afin de fournir une puissance maximale au réseau électrique. Le convertisseur de puissance doit être dimensionné pour la puissance nominale envoyée au réseau par la machine asynchrone (mode générateur). Comme la machine synchrone, cet inconvénient reste un obstacle pour le développement industriel de cette configuration [48].

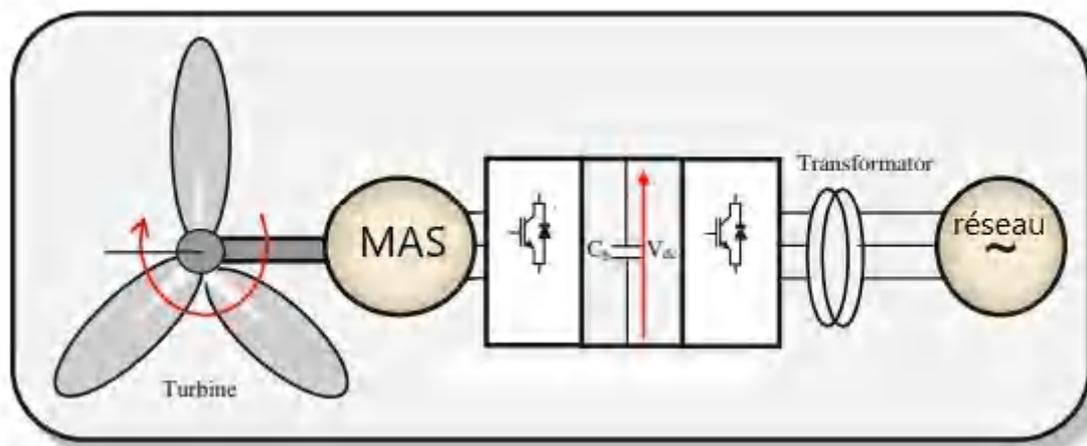


Figure I.14 Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

### I.10.2.2 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

De nos jours, la machine asynchrone à double alimentation (GADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production supérieure à 1MW grâce à ses caractéristiques [49]. La machine asynchrone à double alimentation (GADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor différent des autres machines, les enroulements du rotor sont couplés en étoile et les

extrémités sont connectées à des bagues conductrices. Des balais viennent frotter les bagues lorsque la machine fonctionne. Les enroulements du stator sont directement connectés au réseau alors que les enroulements du rotor passent par les convertisseurs de puissance bidirectionnels pour assurer la variation du glissement (voir la figure I.15). Cette topologie est, actuellement, le meilleur choix des fabricants dans la plupart des projets de centrale éolienne pour de nombreuses raisons comme la réduction des efforts sur les parties mécaniques, la réduction du bruit et la possibilité du contrôle des puissances actives et de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive, ainsi la possibilité de se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire. Il est aussi capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour assurer la commande de tension [50]. Ainsi la plage de la vitesse de rotation est 30% (ou 33%) autour de la vitesse du synchronisme [51]. De plus, le convertisseur est dimensionné seulement pour 20-30% de la puissance nominale de la machine [52]. Il vient du fait que c'est le seul schéma dans lequel la puissance générée peut être supérieure à la puissance nominale de la machine utilisée.

La GADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants. C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur [53]. Lorsque la GADA fonctionne en génératrice, mode hypo-synchrone une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à  $g.P_{mec}$  est transmise par l'intermédiaire du rotor. Grâce à la production ou l'absorption de la puissance réactive du rotor, la GADA a la possibilité d'assurer le fonctionnement à facteur de puissance unitaire [54].

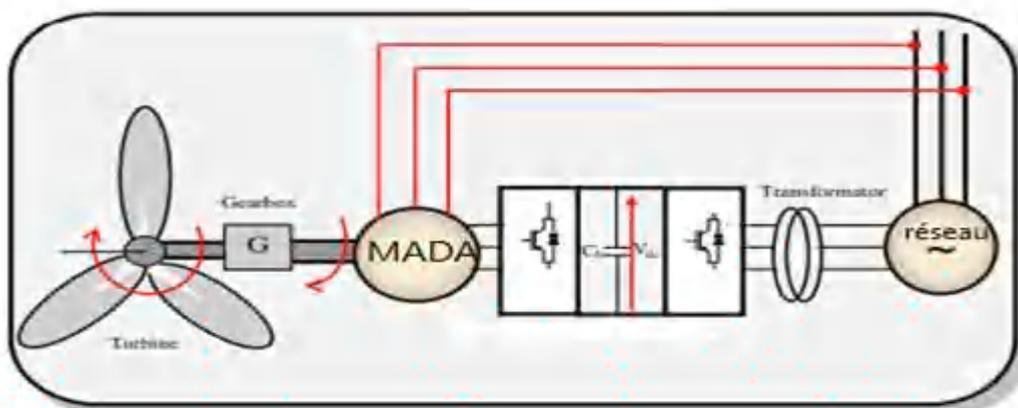


Figure I.15 Éolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation

Pour remédier au problème de la présence de bague-balais, les chercheurs proposent d'autres nouveaux types de machine asynchrone à double alimentation tels que : la machine asynchrone à double alimentation de type brushless et la machine à réluctance à double alimentation de type brushless, pour des applications de conversion d'énergie éolienne. [57-59]

### I.10.2.3 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade

Cette configuration de machine essaye d'allier les avantages de la MAC et de la MADA. Elle peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (figure I.16). La puissance à travers l'ensemble convertisseur/BC est proportionnelle au glissement du rotor (BP). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique[60].

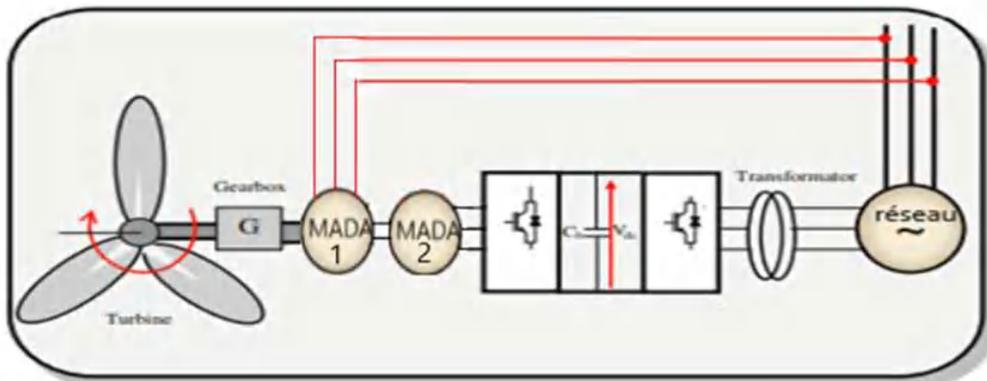


Figure I.16 Éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation en cascade

### I.10.2.4 Machine asynchrone à double alimentation sans balais (BDFIG)

La cascade est une association de deux MADA que nous considérons comme distinctes (indépendantes). Afin d'optimiser et d'éviter l'encombrement de celle-ci. On place les enroulements des deux MADA dans des encoches communes : on parle alors en langue anglaise de BDFM (BrushlessDoubly Fed Machine) [61].

Il a été proposé par Hunt en 1907 avec initialement un rotor à cage spécial. Ensuite, une structure de rotor à cage particulière, qui a une grande partie de la simplicité et de la robustesse d'un enroulement à cage d'écureuil, a été développée par Broadway en 1970 pour remplacer le rotor bobiné [62].

Dans une telle machine, des couplages magnétiques entre bobinages sont inévitables et il y a des précautions à prendre dans la conception pour les rendre nuls en théorie, ou tout du moins aussi faibles que possibles en pratique. Le point essentiel porte sur les nombres de paires de pôles des deux bobinages. Afin d'obtenir deux bobinages découplés magnétiquement, il faut que le flux créé par le stator de l'une ait une résultante nulle sur le stator de l'autre. Il est aisé de découpler deux bobinages en les plaçant en quadrature. Ou, ici nous devons découpler des enroulements triphasés entre eux et il n'est donc pas possible dans ce cas d'obtenir un découplage par un simple décalage angulaire. On proposera plutôt un découplage par un choix judicieux des nombres de paires de pôles des deux bobinages, comme cela est illustré par le schéma de la figure I.33. On notera que la cage d'écurieil peut être reconstruite sous la forme d'une cage spéciale (voir la figure I.34). La construction du rotor est faite d'une façon à respecter le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages statoriques[63].

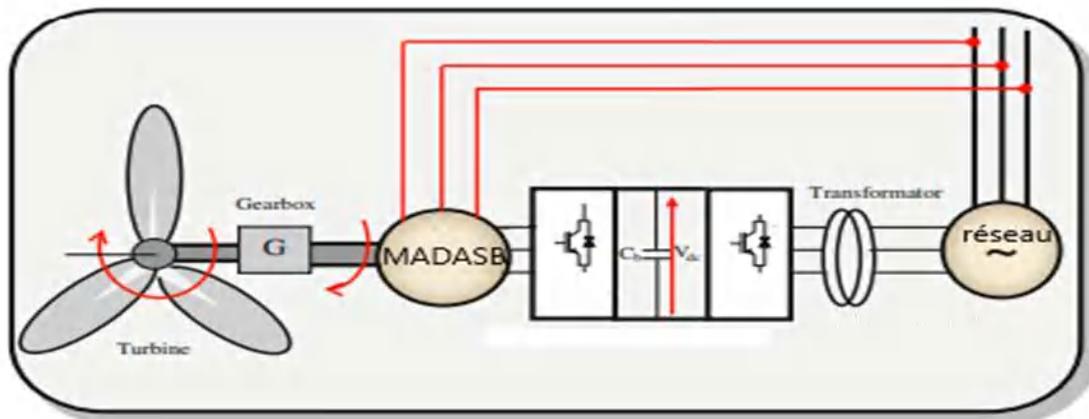


Figure I.17 Eolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentationsans balais

#### I.10.2.5 Machine asynchrone à double alimentation sans balais à réductance (BDFRM)

La BDFRM est une autre variante, elle est introduite par Broadway [64] et développée plus tard par Longya Xu [65].

La machine asynchrone à double alimentation sans balais à réductance(BDFRM) est sans aucun doute un candidat attrayant pour les applications à vitesse variable en raison de son faible coût, de sa grande fiabilité et de sa faible injection d'harmoniques dans le réseau d'alimentation. Les avantages économiques et l'amélioration de la qualité de l'alimentation de l'entraînement BDFRM peuvent être attribués à la propriété de récupération de la puissance de glissement de la machine, ce qui implique l'utilisation d'un onduleur plus petit (par rapport à la puissance de la machine) [66]. Les machines à double alimentation sans balais (BDFM) ont été envisagées pour les éoliennes et les dispositifs de type pompe, qui ont été

traditionnellement desservis par une machine à induction à double alimentation (DFIM) avec une résistance de rotor contrôlable ou une double alimentation. La BDFM devrait conserver les avantages de la DFIM en termes de coûts, grâce à l'utilisation d'un onduleur plus petit (environ 25 % de la puissance de la machine, avec une plus grande fiabilité et un fonctionnement sans entretien grâce à l'absence de balais) [67]. La BDFRM partage tous les avantages des machines doublement alimentées par rapport à leurs homologues à excitation simple - la flexibilité du mode de fonctionnement, la plus grande liberté de contrôle et la possibilité de fonctionner à des vitesses sub-synchrones et super-synchrones dans les deux régimes de motorisation et de génération [68]. La BDFRM possède deux enroulements statoriques de nombres de pôles différents et de fréquences appliquées généralement distinctes. L'enroulement primaire (puissance) est connecté au réseau et l'enroulement secondaire (contrôle) est alimenté par le convertisseur (voir la figure I.18). Le couplage magnétique entre les enroulements, qui est une condition préalable à la production d'un couple par les machines, est assuré par le rotor qui possède la moitié du nombre total de pôles du stator. Dans le cas de la BDFIM, le rotor est une cage spéciale composée de boucles imbriquées, alors que la BDFRM peut utiliser n'importe quelle conception de rotor du Syncrel. A de nombreux égards, la BDFRM et la BDFIM sont manifestement similaires, cependant, la BDFRM possède plusieurs avantages importants cités par Jovanovic et Betz [69].

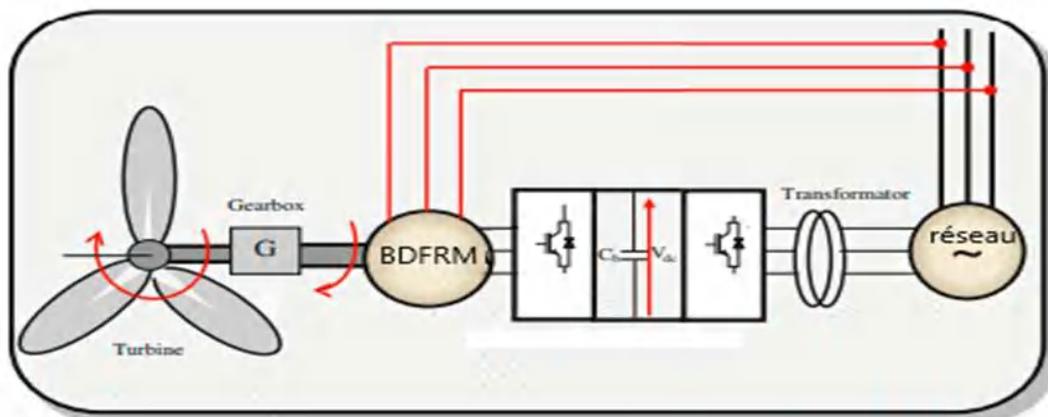


Figure I.18 Éolienne à vitesse variable à base d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance (BDFRM)

### I.10.3 Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes

Les avantages et les inconvénients des différents types d'éoliennes basant sur les différentes machines (générateurs) sont présentés sur le tableau (I.3) [70,71,48].

SCIG : Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil.

PMSG : Générateur Synchrone à Aimants Permanents.

WRSG : Générateur Synchrone à Rotor Bobiné.

DFIG : Générateur asynchrone à double alimentation.

BDFIG : Générateur asynchrone à double alimentation sans balais.

BDFRG : Générateur asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance.

Tableau I. 3 Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe (SCIG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple, robuste et fiable.</li> <li>• Aucune interface d'électronique de puissance.</li> <li>• Moins cher.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible rendement énergétique.</li> <li>• Fortes contraintes mécaniques.</li> <li>• Pas de contrôle des puissances (active et réactive).</li> </ul>
Vitesse variable (PMSG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement énergétique plus élevé.</li> <li>• Contrôle des puissances (active et réactive).</li> <li>• Absence des contacts glissants (bagues-balais).</li> <li>• Faibles contraintes mécaniques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût élevé de l'aimant permanent.</li> <li>• Démagnétisation de l'aimant permanent.</li> <li>• Complexe procédure de construction.</li> <li>• Coût plus élevé du convertisseur de puissance.</li> <li>• Pertes plus élevées dans le convertisseur de puissance.</li> <li>• Grande taille</li> </ul>
Vitesse variable (WRSG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement énergétique plus élevé.</li> <li>• Contrôle des puissances (active et réactive).</li> <li>• Faibles contraintes mécaniques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût plus élevé du convertisseur de puissance.</li> <li>• Pertes plus élevées dans le convertisseur de puissance.</li> <li>• Grande taille.</li> </ul>
Vitesse variable (DFIG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement énergétique plus élevé.</li> <li>• Contrôle des puissances (active et réactive).</li> <li>• Faible coût du convertisseur de puissance.</li> <li>• Faibles contraintes mécaniques.</li> <li>• Taille compacte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existence des contacts glissants (bagues-balais).</li> <li>• Importantes pertes dans le multiplicateur de vitesse (boite de vitesse)</li> </ul>
Vitesse variable (BDFIG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement énergétique plus élevé.</li> <li>• Contrôle des puissances (active et réactive).</li> <li>• Absence des contacts glissants (bagues-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complexités de contrôle, de conception et d'assemblage.</li> <li>• Pertes plus élevées dans le multiplicateur de vitesse.</li> </ul>

	balais). • Faible coût du convertisseur de puissance. • Faibles contraintes mécaniques. • Taille compacte.	
Vitesse Variable (BDFRG)	• Rendement énergétique plus élevé. • Contrôle des puissances (active et réactive). • Absence des contacts glissants (bagues-balais). • Faible coût du convertisseur de puissance. • Faibles contraintes mécaniques. • Construction plus facile.	• Complexités de contrôle et de conception du rotor. • Pertes plus élevées dans le multiplicateur de vitesse. • Plus grande que la MADA (DFIM).

### I.11 Convertisseurs de puissance

Selon le type de la machine et de la source d'énergie électrique, nous différencions plusieurs séries de convertisseurs statiques (figure I.19) :

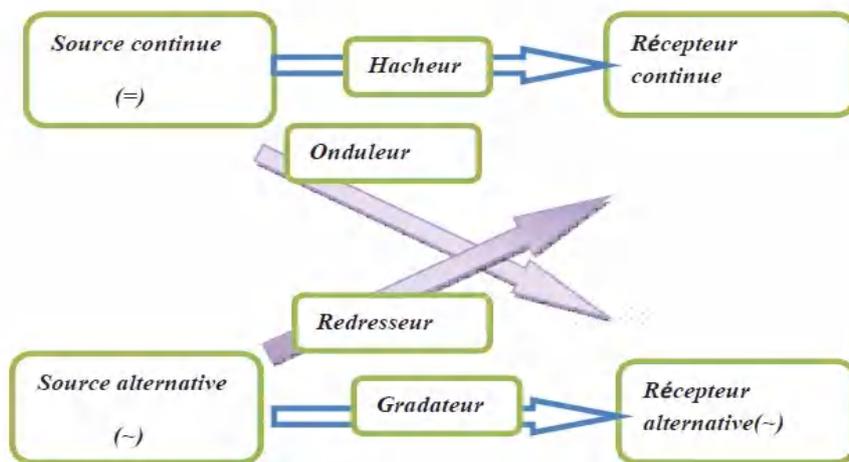


Figure I.19 Famille des convertisseurs statiques

Le générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, qui est injectée dans le réseau électrique par l'intermédiaire d'une interface électronique de puissance [72]. Comme elle est placée entre le générateur de l'éolienne et le réseau électrique, l'interface électronique de puissance doit satisfaire aux exigences du générateur et du réseau avec une solution rentable et facile à entretenir. Du côté du générateur, cette interface garantit que la vitesse de rotation de l'éolienne est continuellement ajustée afin d'extraire la puissance maximale du vent [73] en suivant un point de suivi maximal. Du côté du réseau, l'interface électronique de puissance doit être conforme aux paramètres du réseau [74], quelle que soit la vitesse du

vent ; et doit avoir la capacité de contrôler la puissance active et réactive, la fréquence et la tension. L'introduction de l'électronique de puissance dans les systèmes éoliennes n'a cessé de croître depuis les années 1980, devenant progressivement de plus en plus avancée et apportant des améliorations de performance significatives pour les éoliennes - non seulement en réduisant la charge mécanique et en augmentant le rendement énergétique, mais aussi en permettant aux éoliennes de se comporter comme des composants actifs contrôlables dans le système électrique et de soutenir le réseau de la même manière que les centrales électriques conventionnelles [75]. Aujourd'hui, les composants peuvent supporter des courants et des tensions nominaux plus élevés, les pertes de puissance diminuent et les dispositifs deviennent plus fiables.

Les interfaces d'électronique de puissance les plus couramment utilisées dans les applications d'éoliennes au fil des ans sont :

- Le démarreur progressif est un composant électrique de puissance simple, utilisé dans les années 1980 dans les éoliennes avec SCIG pour réduire le courant d'appel lors des connexions des éoliennes au réseau, limitant ainsi les perturbations du réseau. Sans démarreur progressif, le courant d'appel peut atteindre sept à huit fois le courant nominal, ce qui peut provoquer de graves perturbations de tension sur le réseau.
- La batterie de condensateurs est un composant électrique qui fournit de la puissance réactive aux générateurs asynchrones des éoliennes. Traditionnellement, les batteries de condensateurs à commutation mécanique constituent le moyen le plus simple et le plus économique de minimiser la puissance réactive prélevée par les générateurs asynchrones sur le réseau. Les générateurs des éoliennes peuvent avoir une compensation dynamique à pleine charge, où un certain nombre de condensateurs sont connectés ou déconnectés en permanence, en fonction de la demande moyenne de puissance réactive du générateur sur une période de temps prédéfinie. Comme la demande de puissance réactive d'un générateur asynchrone dépend fortement de la vitesse du vent, les batteries de condensateurs peuvent souvent être déclenchées par un nombre extrême d'événements de commutation.
- Le convertisseur de fréquence, généralement utilisé dans les éoliennes depuis 2000, est un dispositif qui facilite l'interconnexion de deux systèmes électriques ayant des fréquences indépendantes [76]. Il permet d'ajuster et de contrôler la fréquence et la tension du générateur, et donc d'améliorer la capacité des éoliennes à se comporter et à agir comme des éléments actifs. Il permet d'ajuster et de contrôler la fréquence et la tension de la génératrice, et donc d'améliorer la capacité des éoliennes à se comporter et à agir comme des composants actifs du système électrique.

Un convertisseur de fréquence traditionnel, également appelé variateur de vitesse, se compose de :

- Une unité de conversion de courant alternatif (CA)/courant continu (CC) (redresseur) convertit le courant alternatif en courant continu, tandis que l'énergie circule dans le système à courant continu ;
- Des condensateurs (stockage de l'énergie) ;
- L'unité de conversion CC/CA (onduleur) convertit le CC en CA, tandis que l'énergie circule vers le système à courant alternatif.

Ces dernières années, différentes topologies de convertisseurs (convertisseurs conventionnel (back-to-back)/multi-niveaux/tandems/matriciel/résonants) ont été étudiées afin de vérifier si elles pouvaient être utilisées dans les éoliennes. Le convertisseur conventionnel (back-to-back) est aujourd'hui très pertinent pour les éoliennes. Il constitue l'état de l'art et peut donc être utilisé pour évaluer les autres topologies de convertisseur. Les convertisseurs matriciels et multiniveaux sont les concurrents les plus sérieux du convertisseur conventionnel (back-to-back) et sont donc recommandés pour des études plus approfondies [77].

## **I.12 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'énergie éolienne. Nous avons commencé par une définition de cette énergie ainsi que quelques chiffres concernant la production d'électricité de ces énergies dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne est devenue inéluctable. Ainsi que les avantages et inconvénients des systèmes éoliens et leurs applications. Nous avons aussi présenté les différents types d'éoliennes et les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal, ensuite, nous avons présenté les deux technologies d'éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

Enfin nous avons présenté les différents types et les principales caractéristiques des générateurs électriques pour les turbines éoliennes en précisant les convertisseurs d'électronique de puissance associés, utilisés dans les éoliennes. Le dispositif du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance (BDFRM) partage tous les avantages des machines doublement alimentées par rapport à leurs homologues à excitation simple - la flexibilité du mode de fonctionnement, la plus grande liberté de contrôle et la possibilité de fonctionner à des vitesses sub-synchrones et

super-synchrones dans les deux régimes de motorisation et de génération, la BDFRM est considérée comme une machine de 3ème génération dans les systèmes éoliens.

## **CHAPITRE II :**

# **Modélisation et Commande de la BDFRM**

## II.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les machines à double alimentation ont été largement utilisées dans différentes applications en raison de l'utilisation de convertisseurs partiellement dimensionnés pour contrôler la machine, ce qui a entraîné une réduction du coût du convertisseur [78]. De telles machines sont utilisées dans des applications où la vitesse change légèrement avec le temps, telles que les grandes éoliennes, ainsi que les entraînements de puissance comme les entraînements de pompe ou même les systèmes de propulsion distribués turboélectriques. Le type courant de machines à double alimentation à rotor à induction appelé machine à induction à double alimentation (DFIM). Dans cette machine, deux enroulements séparés sont montés sur le stator et le rotor, dans lesquels l'enroulement du stator se connecte directement aux réseaux électriques tandis que l'enroulement du rotor se connecte indirectement aux réseaux électriques via deux convertisseurs back to back. Le principal avantage de ces machines est l'utilisation de convertisseurs partiellement dimensionnés, qui réduisent le coût des convertisseurs d'électronique de puissance par rapport aux convertisseurs entièrement dimensionnés dans les machines synchrones à aimants permanents (PMSM). La présence de balais et de bagues collectrices pour connecter le rotor aux convertisseurs augmente le besoin de maintenance, la probabilité de panne et les pertes de puissance. Pour résoudre ce problème, le type de DFM sans balais, à savoir la machine sans balais à double alimentation (BDFM). Le principal avantage de la technologie BDFM par rapport au DFM est l'absence de brosse et de bague collectrice, ce qui réduit le besoin de services de maintenance et de plus, améliore la robustesse de la machine [79].

Dans la BDFIM, le rotor bobiné est court-circuité ou à cage, alors que le stator a deux enroulements. Un enroulement est directement connecté aux réseaux électriques, tandis que l'autre enroulement est connecté aux réseaux électriques via deux convertisseurs back to back. Ainsi, les deux enroulements sont sur le stator, alors qu'ils ont un couplage indirect via le rotor et qu'il n'y a pas de couplage direct entre eux. La BDFM est attrayante pour être utilisée dans de nombreuses applications, telles que les systèmes de régulation de vitesse à fréquence variable et les systèmes de génération de fréquence constante à vitesse variable. Par conséquent, la conception et le contrôle de la BDFIM ont suscité beaucoup d'intérêt. Les importantes pertes de rotor et le faible rendement provoqués par la cage ou le rotor bobiné rendent la machine considérablement dépendante des paramètres et compliquent le fonctionnement du contrôleur. De tels inconvénients rendent la BDFIM difficile à mettre en

œuvre. En conséquence, une autre technologie BDFM prometteuse a été proposée qui a un rotor de type à réluctance appelé Brushless Double-Fed Reluctance Machine (BDFRM). La BDFRM a été introduite pour la première fois au début des années 1970. Dans cette machine, il n'y a pas de rotor bobiné ou à cage. Par conséquent, il a une fiabilité plus élevée et des pertes de puissance plus faibles par rapport à son homologue à induction, c'est-à-dire BDFIM. De plus, la BDFRM est approximativement sans entretien en raison de l'absence d'enroulement du rotor par rapport au BDFIM à rotor bobiné. Une structure plus simple, une taille plus petite, une densité de puissance plus élevée, une efficacité plus élevée et un coût de maintenance inférieur sont les autres avantages de la BDFRM par rapport aux machines traditionnelles. De plus, le contrôle de la BDFRM est beaucoup plus facile grâce à son rotor sans cage. La technologie de la BDFRM a un fort potentiel d'utilisation dans des applications à vitesse restreinte de grande puissance en raison de son coût de fabrication, ainsi que des critères de fiabilité et de robustesse. Il peut également être utilisé dans des applications telles que les turbomachines, les applications éoliennes à fréquence constante et à vitesse réglable et les applications hydroélectriques, la climatisation, le chauffage commercial et les entraînements de grandes pompes. L'application de la BDFRM dans les éoliennes, en particulier celles offshore, a accéléré les études de recherche sur la BDFRM, en raison des avantages des éoliennes du point de vue du coût de production d'énergie nul et des problèmes environnementaux. En raison de l'application et de l'importance de la BDFRM. Cependant, son fonctionnement compliqué en raison du concept de couplage entre les enroulements du stator via le rotor à réluctance est moins étudié. Une implication des bases de fonctionnement inhabituelles et de la conception inappropriée est le couple insignifiant par volume pour les BDFRM construites, et donc, une BDFRM plus grande et plus chère est nécessaire pour atteindre le couple d'une réluctance synchrone équivalente ou d'une machine à induction à cage. Cependant, des progrès récents ont révélé que les BDFRM peuvent fonctionner avec une efficacité et une densité de couple élevées (rapport couple par volume) lorsqu'ils sont correctement conçus. De plus, la diminution de leur rapport masse par couple a également été étudiée dans la littérature. De plus, il est révélé que la BDFRM peut atteindre une meilleure densité de couple qu'une machine à induction à rotor à cage utilisant le même châssis. En raison des avantages mentionnés de la BDFRM par rapport à la BDFIM, tels que le faible coût de fabrication résultant de son rotor à réluctance, la grande fiabilité résultant de la structure sans balais, les faibles pertes et les besoins de maintenance réduits, des études de recherche ont été menées depuis les années 1990 pour analyser ces machines [80].

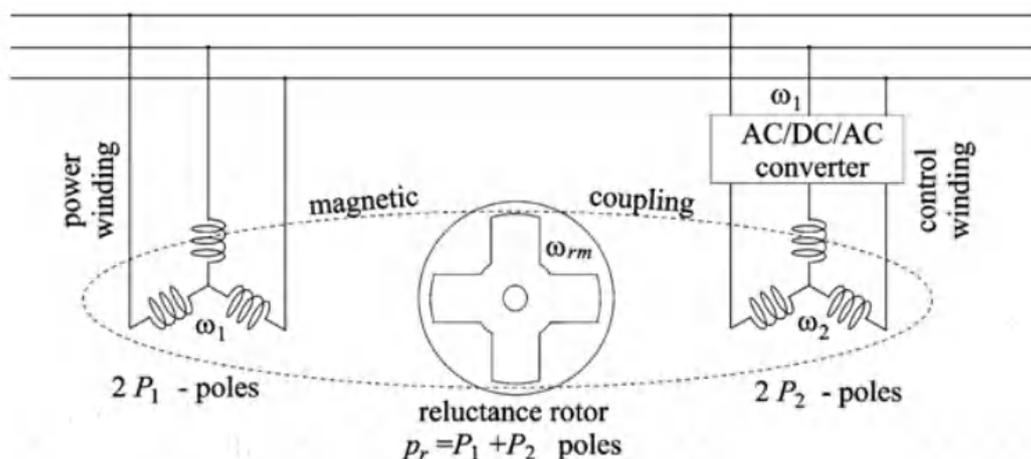
Dans ce chapitre, nous allons commencer par présenter le principe de fonctionnement et les différents types de fonctionnement après on présenter le modèle mathématique triphasé de la BDFRM et comment il est transformé en un système diphasé en utilisant des hypothèses simplificatrices. Ensuite, nous utiliserons la commande vectorielle sur le modèle de la machine pour découpler les puissances active et réactive envoyées par la machine au réseau électrique en mode générateur, ainsi que pour découpler la vitesse de rotation mécanique et la puissance réactive de la machine en mode moteur. À la fin du chapitre, nous présenterons les résultats de simulation de la commande vectorielle appliquée sur la BDFRM pour ses deux modes de fonctionnement (générateur et moteur).

## II.2 Principe de fonctionnement de la BDFRM

Une BDFRM se compose de deux ensembles d'enroulements sinusoïdaux triphasés distribués avec  $2p$  et  $2q$  pôles ( $p \neq q$ ) encastrés dans les mêmes fentes du stator. Le rotor n'a pas de bobinage. Cependant, le nombre de pôles sur le rotor et le stator est indiqué par l'équation :

$$P_r = (p + q) \quad (\text{II.1})$$

La représentation schématique de la BDFRM est illustrée sur la figure II.1. L'un des deux enroulements du stator est appelé enroulement de puissance/principal, et l'autre est appelé enroulement de commande/secondaire. Il n'y a pas de couplage magnétique direct entre deux enroulements. L'interaction entre deux enroulements aura lieu par rotor seulement. L'enroulement de puissance est directement excité par le réseau ayant la fréquence 50/60 Hz. Le rôle principal de l'enroulement de puissance est de mettre en place un champ magnétique dans la machine et traite l'échange de puissance avec le réseau. L'enroulement de commande est excité par la fréquence variable, la tension variable obtenue à partir d'un convertisseur électronique de puissance, ou toute autre source dédiée. Ce bobinage contrôle le couple développé et la vitesse de fonctionnement du BDFRM [4].



## Figure II.1 Représentation schématique du BDFRM

La vitesse angulaire fondamentale et les relations de position correspondantes pour la machine sont :

$$\omega_r = \omega_{rm} P_r = \omega_p + \omega_s \quad (\text{II.2})$$
$$\omega_{rm} = \frac{\omega_p + \omega_s}{P_r} = \frac{(1-s) \cdot \omega_p}{p+q} = (1-s) \cdot \omega_{syn} \quad (\text{II.3})$$
$$n_{rm} = 60 \frac{f_p + f_s}{P_r} \quad (\text{II.4})$$

Tels que :

$\omega_r, \omega_{rm}$  - Vitesses électrique et mécanique du rotor respectivement,

$\omega_{syn}$  - Vitesse de synchronisme

$\omega_p$  - Pulsation statorique primaire

$\omega_s$  Pulsation statorique secondaire

$P_r$  Nombre de pole de paire du rotor

s glissement

On définit le glissement s par :

$$s = - \frac{\omega_s}{\omega_p} \quad (\text{II.5})$$

Si  $\omega_s > 0$ , la machine fonctionne en mode hyper synchrone

Si  $\omega_s < 0$ , la machine fonctionne en mode hypo synchrone

### II.3 Mode de fonctionnement de la BDFRM

En générale, la BDFRM permet de fonctionner en moteur ou en générateur, Cependant la commande des tensions statoriques secondaires permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur ou générateur (figure II.2) [81].

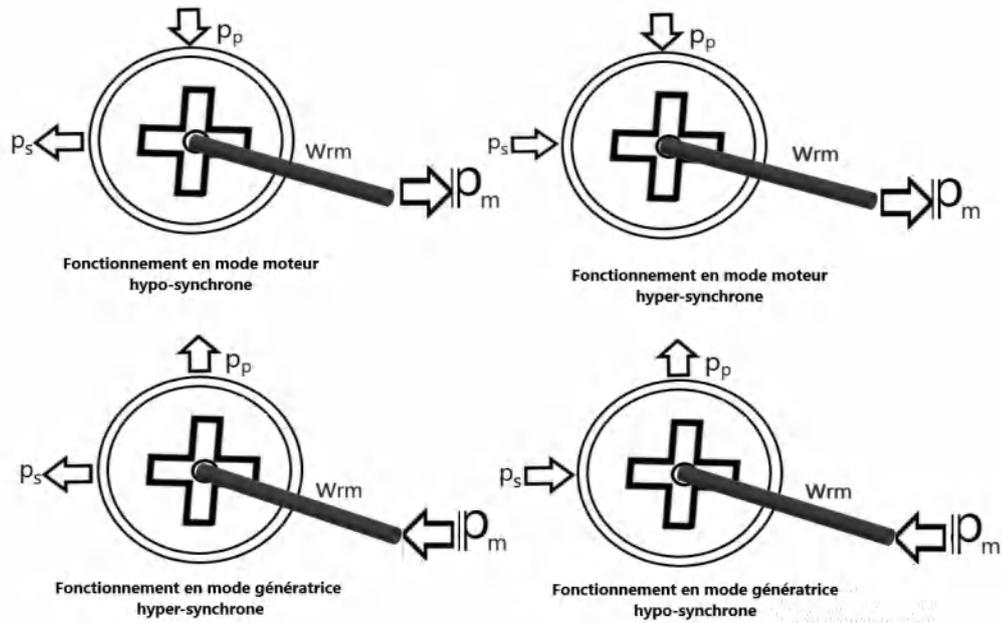


Figure II.2 Les quatre modes de fonctionnement de la BDFRM

### II.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [82].

### II.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

- La puissance fournie par le réseau va au stator primaire et secondaire.
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [83].

### II.3.3 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone

- La puissance est fournie par le stator primaire au réseau.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le stator secondaire.
- La vitesse de rotation est en-dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [84].

### II.3.4 Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone :

- La puissance est fournie par le stator au réseau.
- La puissance de glissement est récupérée via le stator secondaire pour être réinjectée au réseau.

- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [85].

## **II.4 Modèle mathématique de la BDFRM**

Comme tous les systèmes physiques qui nécessitent une modélisation, celle-ci permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations. On distingue deux modèles mathématiques qui représentent la machine, à savoir le modèle élaboré dans le référentiel abc (modèle triphasé) découlant des équations différentielles qui régissent le fonctionnement de la machine et le modèle issu de la transformation de Park ou de Concordia (modèle biphasé) utilisé couramment pour étudier les machines électriques.

### **II.4.1 Hypothèses simplificatrices**

La BDFRM présente des phénomènes très compliqués qui interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation magnétique, le courant de Foucault...etc. Donc, on suppose certaines hypothèses simplificatrices suivantes :

- La parfaite symétrie de la machine ;
- L'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables) ;
- La répartition spatiale sinusoïdale des champs magnétiques le long de l'entrefer ;
- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable ;
- L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques ;
- On néglige l'effet de peau ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques [85].

### **II.4.2 Modèle électrique de BDFRM dans le repère triphasé**

Chaque enroulement peut être représenté par un circuit électrique équivalent comme indique la figure II.3.

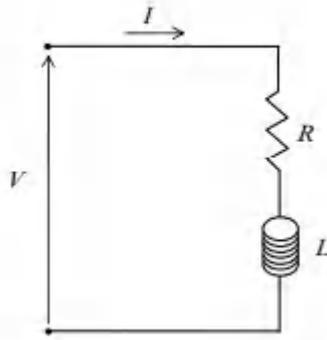


Figure II.3 Circuit d'un enroulement

La relation entre le flux et la force électromotrice développée au niveau de l'inductance est donnée par la loi de Faraday :

$$-e = \frac{d\varphi_t}{dt} \quad (\text{II.6})$$

L'application de la loi des mailles à ce circuit donne :

$$-e = \frac{d\varphi_t}{dt} = V - R \cdot I \quad (\text{II.7})$$

Avec : R et L sont respectivement, la résistance et l'inductance de l'enroulement.

I et V représentent respectivement, le courant dans l'enroulement et la tension à ses bornes.

$\varphi_t = \varphi + \varphi_c$ , où  $\varphi$  est le flux propre de l'enroulement, et  $\varphi_c$  c'est un flux de couplage magnétique avec d'autres enroulement [86].

#### II.4.3 Équations de tension de la BDFRM

Le stator comprend deux enroulements triphasés comme illustré sur la figure II.1 qui peuvent être représentés par :

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d}{dt} [\varphi] \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$[V] = [V_A V_B V_C V_a V_b V_c] \quad (\text{II.9})$$

$$[I] = [I_A I_B I_C I_a I_b I_c] \quad (\text{II.10})$$

$$[\varphi] = [\varphi_A \varphi_B \varphi_C \varphi_a \varphi_b \varphi_c] \quad (\text{II.11})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} rA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & rB & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & rC & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ra & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & rb & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & rc \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$V_A V_B V_C V_a V_b V_c$  : Les tensions des enroulements primaire et secondaire respectivement.

$I_A I_B I_C I_a I_b I_c$  : Les courants des enroulements primaire et secondaire respectivement.

$\varphi_A \varphi_B \varphi_C \varphi_a \varphi_b \varphi_c$  : Les flux à travers les trois enroulements des stators primaire et secondaire.

[R] : Matrices des résistances.

#### II.4.4 Équations des flux

Les flux totalisés couplés avec les enroulements statoriques primaire et secondaire s'expriment comme suit :

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} [L_P] & [L_{PS}] \\ [L_{SP}] & [L_S] \end{bmatrix} [I] \quad (\text{II.13})$$

$$[L_P] = \begin{bmatrix} L_{AA} + L_{lA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} + L_{lB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} + L_{lC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[L_S] = \begin{bmatrix} L_{aa} + L_{la} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} + L_{lb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} + L_{lc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[L_{PS}] = \begin{bmatrix} L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_{mp} \quad (\text{II.18})$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{ms} \quad (\text{II.19})$$

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = L_{BA} = L_{CA} = L_{CB} = -\frac{1}{2} \cdot L_{mp} \quad (\text{II.20})$$

$$L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = L_{ba} = L_{ca} = L_{cb} = -\frac{1}{2} \cdot L_{ms} \quad (\text{II.21})$$

$$L_{Aa} = L_{aA} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm}) \quad (\text{II.22})$$

$$L_{Bc} = L_{cB} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm}) \quad (\text{II.23})$$

$$L_{Cb} = L_{bC} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm}) \quad (\text{II.24})$$

$$L_{Bb} = L_{bB} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm} + 2\pi/3) \quad (\text{II.25})$$

$$L_{Ac} = L_{cA} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm} + 2\pi/3) \quad (\text{II.26})$$

$$L_{Ca} = L_{aC} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm} + 2\pi/3) \quad (\text{II.27})$$

$$L_{Cc} = L_{cC} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm} - 2\pi/3) \quad (\text{II.28})$$

$$L_{Ab} = L_{bA} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm} - 2\pi/3) \quad (\text{II.29})$$

$$L_{Ba} = L_{aB} = L_{psmax} \cos(p_r \theta_{rm} - 2\pi/3) \quad (\text{II.30})$$

Avec :

[L<sub>P</sub>] -La matrice d'inductance de l'enroulement primaire.

[L<sub>S</sub>] -La matrice d'inductance de l'enroulement secondaire.

[L<sub>PS,SP</sub>] -La matrice d'inductance mutuelle entre les enroulements primaire et secondaire.

$[L_{ii}]$  -Les auto-inductances des enroulements.

$[L_{li}]$  -Les inductances de fuite des enroulements.

$[L_{ij}]$  -Les inductances mutuelles entre les phases. / eti, j= [A,B,C,a, b, c].

$L_{psmax}$  -La valeur maximale de l'inductance mutuelle.

En substituant les équations des flux (II.13) dans les équations (II.8) on obtient le système suivant [87]:

$$[V] = [R].[I] + \begin{bmatrix} [L_P] & [L_{PS}] \\ [L_{SP}] & [L_S] \end{bmatrix} \frac{d[I]}{dt} + \begin{bmatrix} 0 & [L_{PS}] \\ [L_{SP}] & 0 \end{bmatrix} [I] \quad (\text{II.31})$$

#### II.4.5 Équation mécanique

L'équation mécanique de la BDFRM est donnée sous la forme suivante [88] :

$$J \cdot \frac{d\omega_{rm}}{dt} + f \cdot \omega_{rm} = T_e - T_r \quad (\text{II.32})$$

$J$  - Le moment d'inertie.

$\omega_{rm}$  - La vitesse de rotation mécanique.

$f$ -Le coefficient de frottement visqueux.

$T_e$  - Le couple électromagnétique.

$T_r$ - Le couple résistant.

Le couple électromagnétique de BDFRM est donné par l'expression suivante [89] :

$$T_e = \frac{P_p}{2} [I]^T [G] [I] \quad (\text{II.33})$$

$$[G] = \frac{d}{d\theta_r} [L] \text{ Avec } [L] = \begin{bmatrix} [L_P] & [L_{PS}] \\ [L_{SP}] & [L_S] \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Où :  $P_p$  -Le nombre de paires de pôles.

#### II.5 Transformation de Park :

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [90].

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $[P(\alpha)]$  est donnée sous la forme suivante [14] :

$$[X_{d,q,0}] = [P(\alpha)][X_{A,B,C}] \quad (\text{II.35})$$

Où :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - 2\pi/3) & -\sin(\alpha + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Les nouvelles variables  $X_d$  et  $X_q$  sont appelées respectivement composante directe et en quadrature.

La transformation inverse est définie par :

$$[X_{A,B,C}] = [P(\alpha)]^{-1} [X_{d,q,0}] \quad (\text{II.37})$$

$$\begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & -\sin(\alpha - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & -\sin(\alpha + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Où :

$X_A, X_B, X_C$ - Les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

$X_d, X_q$ - Les valeurs instantanées des grandeurs diphasées.

$X_0$ - La composante homopolaire.

$[P(\alpha)]$ - La matrice directe de Park.

$[P(\alpha)]^{-1}$ - La matrice inverse de Park.

$\alpha$ -L'angle entre l'axe 'd'et l'axe ' a ' de référence dans le système triphasé.

La composante homopolaire (O) ne participe pas à la création du champ tournant de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi arbitrairement orthogonal au plan (d, q) [91].

## II.6 Modèle électrique de la BDFRM dans le repère biphasé

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), on obtient le modèle mathématique de la machine (BDFRM) dans le repère biphasé (d, q) [92] :

**Equations électriques :**

$$\begin{cases} V_{pd} = R_p I_{pd} + \frac{d\Phi_{pd}}{dt} - \omega \phi_{pq} \\ V_{pq} = R_p I_{pq} + \frac{d\Phi_{pq}}{dt} + \omega \phi_{pd} \\ V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - (\omega_r - \omega) \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + (\omega_r - \omega) \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

$$\omega_r = \omega_{rm} P_r = \omega_p + \omega_s \quad (\text{II.40})$$

**Equations de flux :**

$$\begin{cases} \phi_{pd} = L_p I_{pd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{pq} = L_p I_{pq} - L_m I_{sq} \\ \phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{pd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} - L_m I_{pq} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

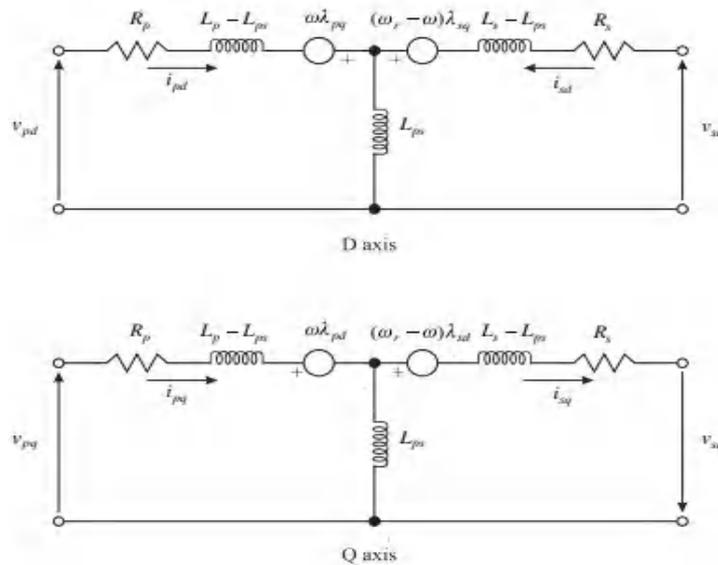


Figure II.4 Le modèle dq de la BDFRM

### II.6.1 Choix du référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique :

- **Référentiel lié au stator** : Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(\alpha, \beta)$ . Dans ce cas,  $(\omega = 0)$ . Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [94].
- **Référentiel lié au rotor** : Dans ce cas, le système d'axes  $(d, q)$  est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse  $(\omega = \omega_r)$ . Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [95].
- **Référentiel lié au champ tournant** : Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(X, Y)$ , il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire  $(\omega = \omega_p)$ . Les équations électriques de la machine deviennent En général, le référentiel lié au champ tournant est le plus utilisé pour réaliser le contrôle vectoriel du fait que les grandeurs deviennent continues [86].

### II.7 Modèle de la machine BDFRM lié au champ tournant

Equations électriques :

$$\begin{cases} V_{pd} = R_p I_{pd} + \frac{d\Phi_{pd}}{dt} - \omega_p \phi_{pq} \\ V_{pq} = R_p I_{pq} + \frac{d\Phi_{pq}}{dt} + \omega_p \phi_{pd} \\ V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - (\omega_r - \omega_p) \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + (\omega_r - \omega_p) \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

$$\omega_r = \omega_{rm} P_r = \omega_p + \omega_s \quad (\text{II.43})$$

Equations de flux :

$$\begin{cases} \phi_{pd} = L_p I_{pd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{pq} = L_p I_{pq} - L_m I_{sq} \\ \phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{pd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} - L_m I_{pq} \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$T_e = \frac{3P_R L_m}{2L_p} (\phi_{pd} I_{sq} + \phi_{pq} I_{sd}) \quad (\text{II.45})$$

Les puissances active et réactive :

- Pour le bobinage de puissance (stator primaire) :

$$\begin{cases} P_p = \frac{3}{2} (V_{pd} I_{pd} + V_{pq} I_{pq}) \\ Q_p = \frac{3}{2} (V_{pq} I_{pd} - V_{pd} I_{pq}) \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

- Pour le bobinage de commande (stator secondaire) :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq}) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

## II.8 Equations d'état

En considérant les flux statoriques secondaires et les courants statoriques secondaires comme des vecteurs d'état alors le modèle de la BDFRM sous forme d'équation d'état s'écrit comme

$$\text{suit : } \frac{dX}{dt} = \dot{X} = AX + BU \quad (\text{II.48})$$

Avec :

$$X = [\phi_{sd} \ \phi_{sq} \ I_{sd} \ I_{sq}] , \quad U = [V_{sd} \ V_{sq} \ V_{pd} \ V_{pq}]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_r - \omega_p & -R_s & 0 \\ -(\omega_r - \omega_p) & 0 & 0 & -R_s \\ a_1 & a_2 \omega_r & a_3 & -\omega_p \\ -a_2 \omega_r & a_1 & \omega_p & a_3 \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_2 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 & -a_4 \end{bmatrix}$$

Où :

$$a_1 = \frac{R_p}{\delta L_p L_s}, \quad a_2 = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad a_3 = \frac{-1}{\sigma} \left( \frac{R_p}{L_p} + \frac{R_s}{L_s} \right), \quad a_4 = -\frac{L_m}{\delta L_p L_s} V_{pd}$$

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_p L_s}$  : Coefficient de dispersion.

U : Le vecteur de commande de la MADA

X : Le vecteur d'état de la MADA

[A] : matrice fondamentale qui caractérise le système

[B] : matrice d'application de la commande

Ou bien :

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{sd} = (wr - wp)\phi_{sq} - R_s I_{sd} + V_{sd} \\ \dot{\phi}_{sq} = -(wr - wp)\phi_{sd} - R_s I_{sq} + V_{sq} \\ \dot{I}_{sd} = a_1 \phi_{sd} + a_2 wr \phi_{sq} + a_3 I_{sd} - wp I_{sq} + a_2 V_{sd} + a_4 V_{pd} \\ \dot{I}_{sq} = -a_2 wr \phi_{sd} + a_1 \phi_{sq} + wp I_{sd} + a_3 I_{sq} + a_2 V_{sq} - a_4 V_{pd} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

La relation (II.47) montre que la machine est un système non linéaire. En plus, ce système est non stationnaire car toutes les grandeurs sont susceptibles de varier en fonction du temps.

## II.9 Simulation du moteur raccordé au réseau

Pour la machine BDFRM alimentée directement par le réseau triphasé 230/400 V et tournant à vide, nous visualisons la vitesse mécanique, et le couple électromagnétique comme c'est montré sur la figure II.5.

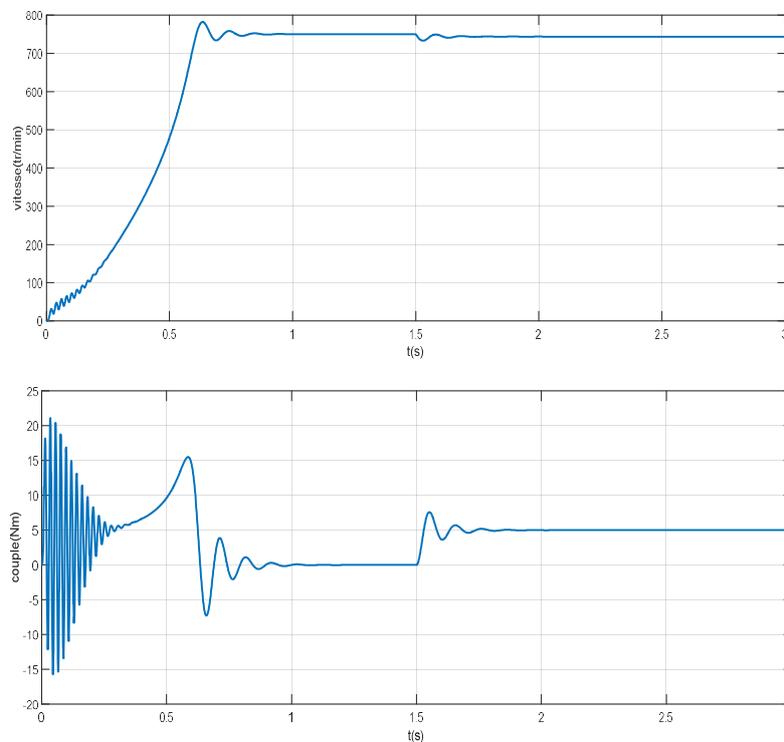


Figure II.5 Résultat de simulation d'un démarrage direct de la machine BDFRM

Pendant le démarrage de la machine, on remarque que le couple de démarrage est élevé, et pendant l'augmentation de la charge à l'instant de temps  $t=1s$  on remarque que la valeur de la vitesse diminue après un certain temps du régime transitoire.

## **II.10 Commande vectorielle**

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps, certaines polémiques donnent la paternité de cette théorie à Blondel. Les premiers développements théoriques de la méthode du flux orienté ont été réalisés au début des années 70 par Blaschke et ses applications effectives ont vu le jour grâce à Léonard dix ans plus tard. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancés en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformé de Park, évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations, ce qui ne pouvait pas se faire en pure démarche analogique [96]. Avec l'évènement des microcontrôleurs et des dispositifs permettant le traitement du signal, il est devenu possible de réaliser une telle commande à un coût raisonnable. Cela a conduit à une explosion des recherches et des applications relatives à la commande vectorielle des machines à courant alternatif [97].

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine à courant alternatif comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent[98].

### **II.10.1 Principe de la commande vectorielle**

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle, commande directe du couple (DTC)). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit établit un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quel que soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel. Au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être [99].

Par contre, dans une machine alternative, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle.

Le principe de cette dernière consiste à transformer le modèle de la machine alternative à une structure similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée et compensée. En effet, en absence de la saturation et de la réaction magnétique d'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation. Il n'est pas affecté par le courant d'induit à cause de l'orientation perpendiculaire des flux statoriques et rotoriques. C'est pourquoi le couple électromagnétique d'une machine à courant continu à excitation séparée est directement proportionnel au courant de l'induit pour une valeur constante du flux, ce qui présente un réglage rapide du couple. Et pour la machine alternative, l'angle entre les deux champs statoriques et rotoriques est différent de  $90^\circ$ .

L'idée proposée par Blaschke et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle de  $90^\circ$  entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

### **II.10.2 Variantes de la commande vectorielle**

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [100] :

Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension
- Commande en courant

Suivant les opérations désirées pour le flux :

- Commande vectorielle de flux rotorique
- Commande vectorielle de flux statorique.
- Commande vectorielle de flux d'entrefer (ou de flux magnétisant)

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement

### II.10.3 Contrôle Vectoriel par orientation du flux statorique primaire de la BDFRM

Afin de réaliser le principe de la commande vectorielle nous choisissons d'orienter l'axe d suivant le flux statorique primaire. Le principe de ce type d'orientation de flux est illustré sur la figure II.6.

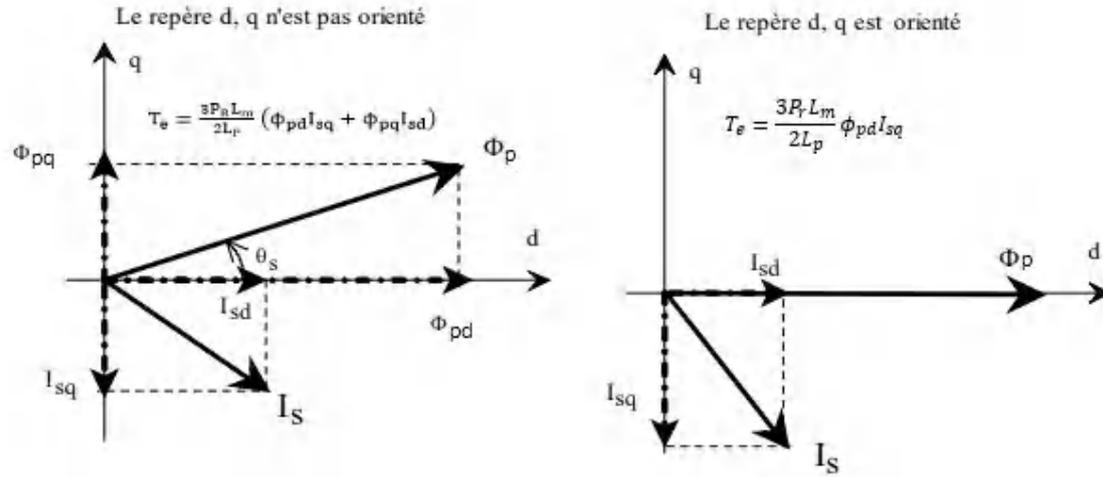


Figure II.6 Orientation du flux statorique primaire

$$\varphi_{pd} = \varphi_p, \quad \varphi_{pq} = 0 \quad (\text{II.50})$$

Et l'équation des flux statoriques primaires (équation II.44) du bobinage de puissance devient :

$$\begin{cases} \varphi_{pd} = L_p I_{pd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{pq} = L_p I_{pq} - L_m I_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

Les courants statoriques primaire peuvent être s'écrire en fonction des courants statorique primaire comme suit :

$$\begin{cases} I_{pd} = \frac{\varphi_{pd} - L_m I_{sd}}{L_p} \\ I_{pq} = \frac{L_m I_{sq}}{L_p} \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

En remplaçant l'équation (II.52) dans l'équation des flux rotoriques (II.44), on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s \sigma I_{sd} + \frac{L_m}{L_p} \varphi_{pd} \\ \varphi_{sq} = \sigma L_s I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

La relation des tensions statoriques primaire dans l'équation (II.42) devient :

$$\begin{cases} V_{pd} = \frac{d\varphi_p}{dt} \\ V_{pq} = \omega_p \varphi_p \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

On a négligé la résistance primaire  $R_p$ .

Avec l'hypothèse du flux statorique primaire constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{pd} = 0 \\ V_{pq} = V_p = \omega_p \Phi_p \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

En introduisant l'expression (II.53) dans les équations des tensions statorique secondaire du système (II.42), on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \sigma \frac{dI_{sd}}{dt} + e_q \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \sigma \frac{dI_{sq}}{dt} + e_d + e_\varphi \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

Avec :

$$\begin{cases} e_q = -\omega_s \sigma L_s I_{sq} \\ e_d = \omega_s \sigma L_s I_{sd} \\ e_\varphi = \omega_s \frac{L_m}{L_p} \Phi_p \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

#### II.10.4 Commande de la machine BDFRM fonctionnant en mode générateur

Dans cette partie, nous allons présenter la commande indépendante des puissances active et réactive délivrées au réseau électrique à partir de la BDFRM qui fonctionne en mode générateur.

Les puissances active et réactive envoyées au réseau électrique par la BDFRM sont données par :

$$\begin{cases} P_g = P_p + P_s \\ Q_g = Q_p + Q_s \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

D'après l'équation (II.55), les puissances active et réactive statoriques de l'équation (II.46) deviennent alors :

$$\begin{cases} P_p = \frac{3}{2} V_{pq} I_{pq} \\ Q_p = \frac{3}{2} V_{pq} I_{pd} \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

Pour obtenir l'expression des puissances statoriques primaires en fonction des courants statoriques secondaires, on remplace dans l'équation précédente les courants statoriques par ses expressions (II.52), on obtient :

$$\begin{cases} P_p = \frac{3V_{pq}L_m}{2L_p} I_{sq} \\ Q_p = \frac{3}{2} \frac{V_{pq}^2}{\omega_p L_p} - \frac{3}{2} V_{pq} \frac{L_m}{L_p} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.60})$$

On remarque que la puissance active statorique  $P_p$  est directement proportionnelle au courant statorique secondaire en quadrature  $I_{sq}$ , et la puissance réactive statorique  $Q_p$  est proportionnelle au courant statorique secondaire direct  $I_{sd}$ .

En négligeant les chutes de tensions et pour un glissement relativement faible, les expressions de la puissance active et réactive statorique secondaire deviennent [24] :

$$\begin{cases} P_s = -s \frac{3}{2} V_{pq} \frac{L_m}{L_p} I_{sq} \\ Q_s = -s \frac{3}{2} V_{pq} \frac{L_m}{L_p} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

En substituant les équations des puissances statoriques primaire et secondaire (II.60) et (II.61) dans l'équation des puissances délivrées au réseau électrique (II.58), ceci mène à :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3(1-s)V_{pq}L_m}{2L_p} I_{sq} \\ Q_g = \frac{3}{2} \frac{V_{pq}^2}{\omega_p L_p} - \frac{3(1-s)}{2} V_{pq} \frac{L_m}{L_p} I_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

On remarque que la puissance active  $P_g$  est directement proportionnelle au courant statorique secondaire en quadrature  $I_{sq}$ , et la puissance réactive  $Q_g$  est proportionnelle au courant statorique secondaire direct  $I_{sd}$ .

Ensuite, les équations des courants deviennent :

$$\begin{cases} I_{sq} = \frac{2L_p}{3(1-s)V_{pq}L_m} P_g \\ I_{sd} = \left( \frac{3V_{pq}^2}{2\omega_p L_p} - Q_g \right) \frac{2L_p}{3(1-s)V_{pq}L_m} \end{cases} \quad (\text{II.63})$$

En remplaçant l'équation (II.63) dans l'équation (II.56), on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = -AR_s Q_g - A\sigma L_s \frac{dQ_g}{dt} + eq + ev \\ V_{sq} = AR_s P_g + A\sigma L_s \frac{dP_g}{dt} + ed + e\phi \end{cases} \quad (\text{II.64})$$

Avec :

$$\begin{cases} A = \frac{2L_p}{3(1-s)V_{pq}L_m} \\ ev = AR_s \frac{3V_{pq}^2}{2\omega_p L_p} \end{cases} \quad (\text{II.65})$$

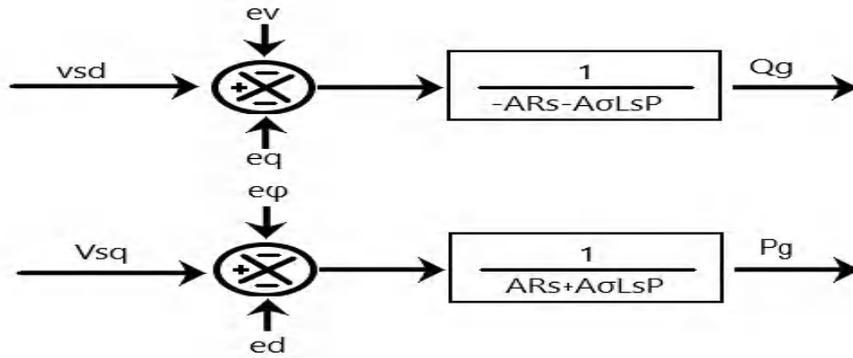


Figure II.7 Schéma bloc de la BDFRM

On remarque sur la figure II.7, que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

Pour commander ou réguler la machine BDFRM, on va mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présentés dans les équations (II.65 et II.57) ( $e_p$ ,  $e_\phi$ ,  $e_d$ ,  $e_v$ ).

### II.10.5 Calcul des régulateurs des puissances $Q_g$ et $P_g$

Pour le système de réglage des puissances, nous choisissons d'utiliser des correcteurs de type Proportionnel-Intégral (PI), étant donné qu'ils sont simples à mettre en œuvre. Ce type de correcteur assure une erreur statique nulle grâce à l'action d'intégration, tandis que la rapidité de réponse est établie par l'action proportionnelle. Le calcul des correcteurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles.

On rappelle la fonction de transfert reliant les composantes statoriques de chaque axe de la BDFRM :

$$\frac{Q_g}{V_{sd}} = -\frac{P_g}{V_{sq}} = \frac{-1}{1 + \frac{\sigma L_s P}{R_s}} \quad (\text{II.66})$$

Les composantes de puissances ( $P_g$ ,  $Q_g$ ), ont la même boucle de régulation donnée par la figure II.8.

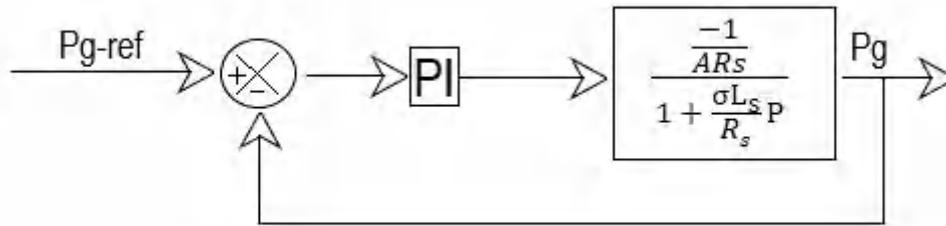


Figure II.8 Boucle de régulation de la puissance

On introduit un régulateur PI qui a pour expression :

$$PI = K_p + \frac{K_i}{p} = kp \left( \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \quad / \tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{II.67})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système s'écrit :

$$FTBO = kp \left( \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \frac{-1}{1 + \frac{\sigma L_S p}{R_S}} \quad (\text{II.68})$$

On adopte la méthode de compensation des pôles, on obtient la forme suivante :

$$\tau_i = \frac{\sigma L_S}{R_S} \quad (\text{II.69})$$

$$FTBO = \frac{-Kp}{A\sigma L_S p} \quad (\text{II.70})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{A\sigma L_S p}{-K}} \quad (\text{II.71})$$

La constante de temps du système est :

$$\tau_{BF} = \frac{A\sigma L_S}{-Kp} \quad (\text{II.72})$$

Donc :

$$\begin{cases} K_{p,Qg} = \frac{A\sigma L_S}{-\tau_{BF}} \\ K_{i,Qg} = \frac{-AR_S}{\tau_{BF}} \end{cases} \quad (\text{II.73})$$

$$\begin{cases} K_{p,Pg} = \frac{A\sigma L_S}{\tau_{BF}} \\ K_{i,Pg} = \frac{AR_S}{\tau_{BF}} \end{cases} \quad (\text{II.74})$$

La constante de temps nous renseigne sur la dynamique du système, elle est de l'ordre de 5 ms pour un système qui répond vite [102].

L'ensemble de tous ces correcteurs est représenté sur le schéma bloc (figure II.9)

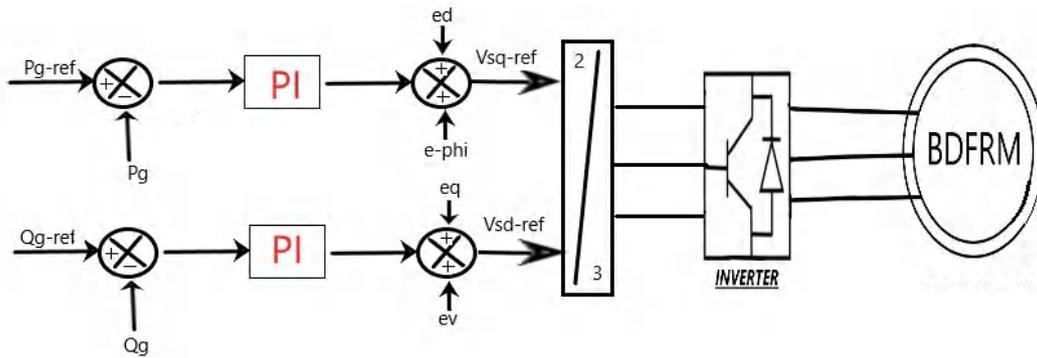


Figure II.9 Schéma bloc du contrôle de la machine BDFRM fonctionnant en mode générateur

### II.10.6 Commande de la machine BDFRM fonctionnant en mode moteur

Dans cette partie, nous allons présenter la commande indépendante de la vitesse de rotation mécanique et de la puissance réactive statorique primaire de la machine BDFRM qui fonctionne en mode moteur.

L'orientation du flux statorique primaire suivant l'axe direct rend le couple électromagnétique produit par BDFRM proportionnel uniquement à la composante de l'axe en quadrature du courant statorique secondaire. L'équation du couple à partir de la relation (II.45) s'écrit alors :

$$T_e = \frac{3P_R L_m}{2L_p} \Phi_{pd} I_{sq} \quad (II.75)$$

À partir de cette équation et équation mécanique (II. 32), il est clair que la vitesse de rotation peut être contrôlée par action sur la composante en quadrature du courant statorique secondaire  $I_{sq}$ , et à partir de l'équation (II. 60) il est clair que la puissance réactive statorique primaire peut être contrôlée par action sur la composante en direct du courant statorique secondaire  $I_{sd}$ .

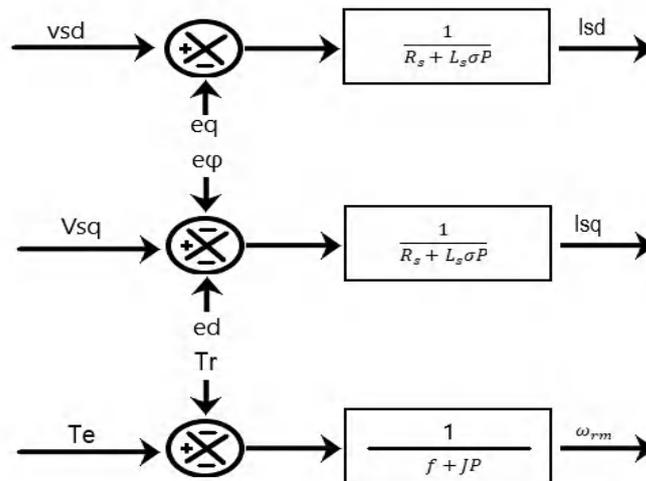


Figure II.10 Schéma bloc de la BDFRM

On remarque dans la figure II. 10 que les courants et les tensions sont liés par une fonction de transfert du premier ordre, le couple et la vitesse sont liés par une fonction de transfert du premier ordre. Il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes d et q pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs.

### II.10.7 Calcul des régulateurs

- Régulateurs des courants statoriques secondaires

À partir de l'expression (II.56), les fonctions de transfert reliant les composantes statoriques de chaque axe sont données par :

$$\frac{I_{sd}}{V_{sd}} = \frac{I_{sq}}{V_{sq}} = \frac{1}{R_s + L_s \sigma P} \quad (\text{II.76})$$

Les composantes du courant statorique secondaire ( $I_{sd}$ ,  $I_{sq}$ ), ont la même boucle de régulation donnée par la figure II.11.

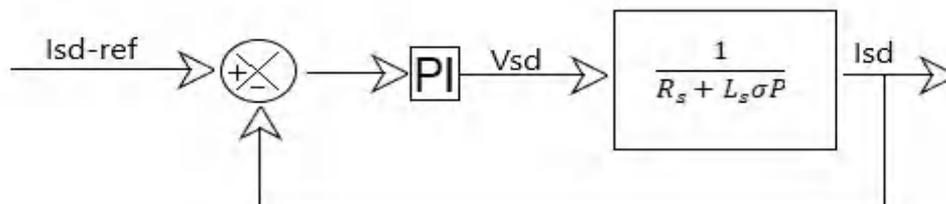


Figure II.11 Boucle de régulation des courants statoriques

La fonction de transfert en boucle ouverte du système s'écrit :

$$FTBO = k_p \left( \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \frac{1/R_s}{1 + \frac{L_s}{R_s} \sigma p} \quad (\text{II.77})$$

On adopte la méthode de compensation des pôles, on obtient la forme suivante :

$$\tau_i = \frac{L_s}{R_s} \sigma \quad (\text{II.78})$$

$$FTBO = \frac{K_p}{\sigma L_s p} \quad (\text{II.79})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{\sigma L_s p}{K_p}} \quad (\text{II.80})$$

La constante de temps du système est :

$$\tau_{BF} = \frac{\sigma L_s}{K_p} \quad (\text{II.81})$$

Donc :

$$\begin{cases} K_p = \frac{\sigma L_s}{\tau_{BF}} \\ K_i = \frac{K_p}{\frac{L_s}{R_s} \sigma} \end{cases} \quad (\text{II.82})$$

La constante de temps nous renseigne sur la dynamique du système, elle est de l'ordre de 5 ms pour un système qui répond vite.

- **Régulateur de Vitesse**

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. À partir d'équation mécanique (II. 32) la fonction de transfert est :

$$\frac{\omega_{rm}}{T_e} = \frac{1}{f + Jp} \quad (\text{II.83})$$

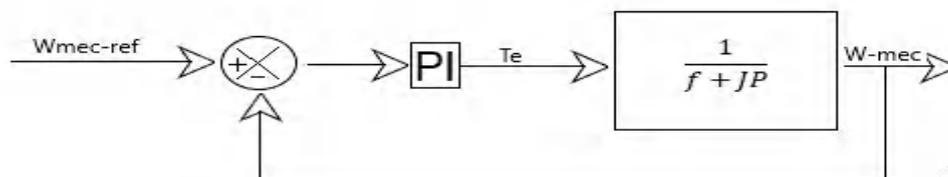


Figure II.12 Boucle de régulation de la vitesse

La fonction de transfert en boucle ouverte du système s'écrit :

$$FTBO = k_p \left( \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \frac{1}{f + Jp} \quad (\text{II.84})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{\frac{K_p}{f \tau_i \tau_m} (\tau_m p + 1)}{p^2 + \left( \frac{f + K_p}{f \tau_m} \right) p + \frac{K_p}{f \tau_i \tau_m}} \quad (\text{II.85})$$

Avec :  $\tau_m = \frac{J}{f}$  et  $\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$

Par imposition des pôles en boucle fermée, nous obtenons les paramètres du correcteur PI :

$$\begin{cases} K_{pw} = 2\xi\omega_n J - f \\ K_{iw} = J\omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{II.86})$$

Maintenant, on va illustrer le schéma général décrivant la commande vectorielle indirect de la vitesse et la puissance réactive qui se présente ainsi :

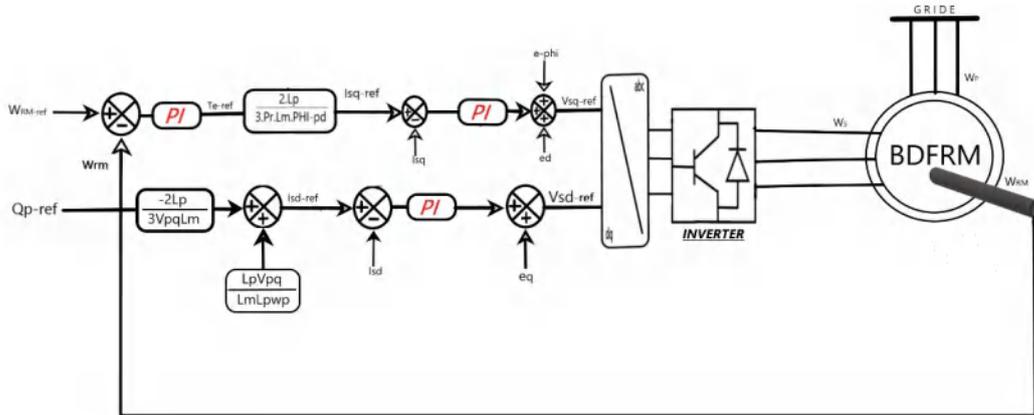


Figure II.13 Schéma bloc du contrôle de la machine BDFRM fonctionnant en mode moteur

## II.11 Résultats de simulation

La simulation a été réalisée avec le logiciel Matlab/Simulink, afin de valider les commandes étudiées dans ce travail. On a réalisé deux points de fonctionnement, le premier fonctionnement en mode générateur et le deuxième en mode moteur.

La BDFRM utilisée dans ce travail est de 1,5 KW. Elle est connectée directement au réseau de lignes via son stator primaire et contrôlé via son deuxième stator par un onduleur.

### II.11.1 Fonctionnant en mode générateur

Les figures ci-dessus représentent les résultats de la simulation obtenus par la commande vectorielle indirecte des puissances générées au niveau du stator de la machine BDFRM. La commande permet de découpler les expressions de la puissance active et réactive du générateur. La composante quadrature du courant statorique secondaire contrôle la puissance active, et la composante directe contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau. Nous remarquons que les grandeurs de référence ont été suivies par la machine BDFRM pour les deux puissances active et réactive.

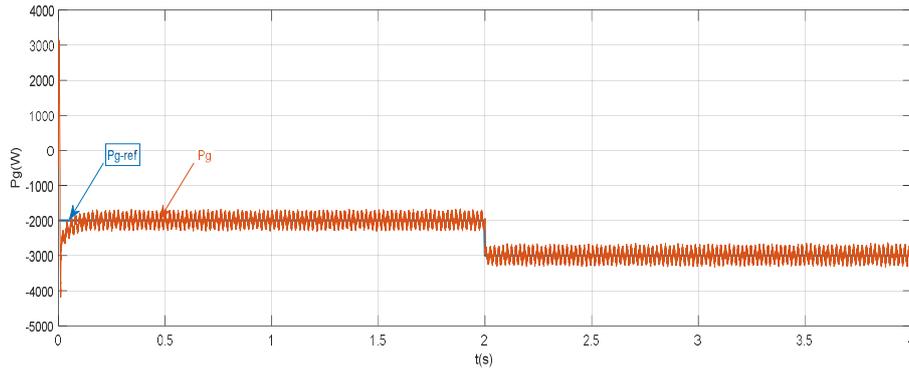


Figure II.14 puissance active ( $P_g$ )

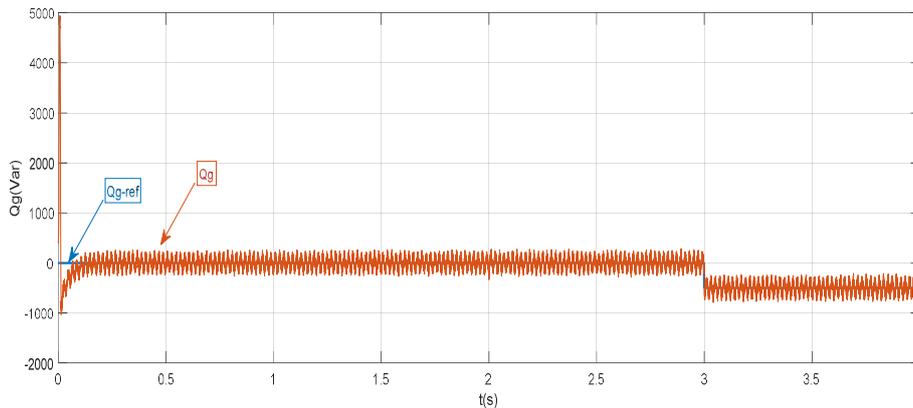


Figure II.15 puissance réactive ( $Q_g$ )

### II.11.2 Fonctionnement en mode moteur

Les figures ci-dessus représentent les résultats de la simulation obtenus par la commande vectorielle indirecte de la vitesse et de la puissance réactive statorique primaire de la machine BDFRM. La commande permet de découpler les expressions de la vitesse et la puissance réactive du moteur. La composante quadrature du courant statorique secondaire contrôle la vitesse, et la composante directe contrôle la puissance réactive. On remarque que la vitesse du moteur suit la référence avec un bon temps de réponse dans les trois modes : synchronisation (750 tr/min) et super synchronisation (900 tr/min) et sub-synchronisation (700 tr/min) et la puissance réactive du stator primaire suit correctement sa référence.

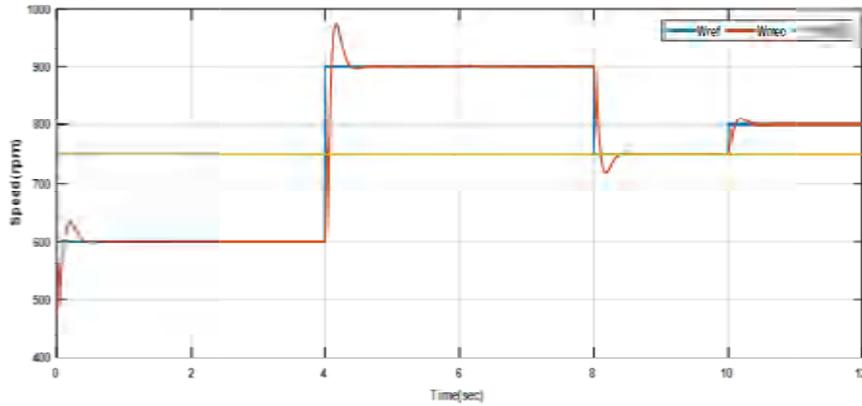


Figure II.16 La vitesse de BDFRM

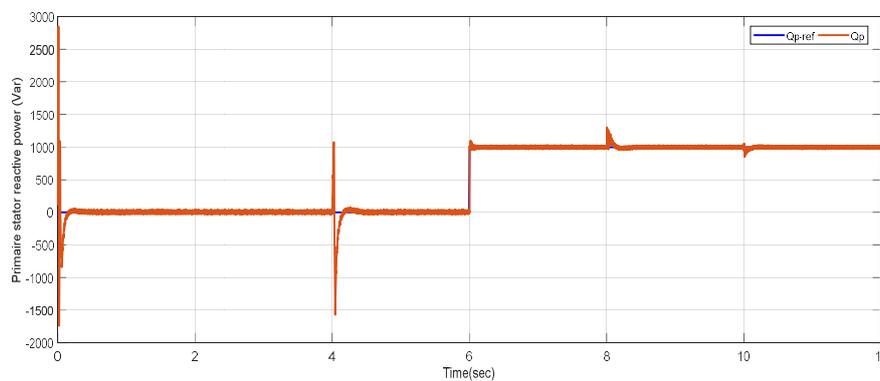


Figure II.17 puissance réactive

## II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit deux parties essentielles de système de conversion éolienne. Dans la première partie nous avons présente la modélisation de la machine BDFRM qui peut fonctionner en générateur et en moteur. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, où la complexité a été réduite. La transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle et Equations d'état de la machine.

Dans la deuxième partie, Nous avons aussi présenté la modélisation et la commande vectoriel indirect de cette machine. De plus, le contrôle des tensions statorique secondaire nous a permis de contrôler indépendamment les puissances active et réactive délivrées au réseau électrique par la machine BDFRM qui fonctionne en mode générateur et lecontrôle séparé de la vitesse et de la puissance réactive du stator de la machine à réluctance à double alimentation sans balais (BDFRM) qui fonctionne en mode moteur.

# **CHAPITRE III**

## **Modélisation, Commande et Simulation d'un Système Eolien Basé Sur la machine BDFRM**

### **III.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance (BDFRM) ainsi que sa commande vectorielle dans les modes moteur et générateur. Le présent chapitre se consacre à l'étude globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Ce système, illustré par la Figure III.1, repose sur une éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance reliée au réseau électrique par le biais de deux convertisseurs dos-à-dos. Une liaison continue entre les deux convertisseurs est établie par un bus continu à base de capacitances.

Le convertisseur côté générateur (MSC) assure à la fois la conversion AC/DC et le contrôle de la vitesse de la BDFRM en fonction de la vitesse du vent afin d'extraire une puissance maximale (contrôle MPPT). Quant au convertisseur côté réseau (GSC), il est responsable de l'injection de l'énergie produite dans le réseau, avec la régulation de la puissance active et réactive, ainsi que la régulation de la tension du bus continu (contrôle PQ). Le GSC est connecté au réseau via un filtre de type RL qui élimine les harmoniques présentes dans le courant injecté au réseau.

L'étude du système global abordée dans ce chapitre comprend une éolienne, une machine asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance, des convertisseurs back to back et un bloc de commande. Ce bloc de commande est divisé en deux parties : le contrôle du convertisseur côté générateur et le contrôle du convertisseur côté réseau. Divers éléments liés au contrôle, tels que le bus continu et le filtre de liaison entre le GSC et le réseau, sont modélisés. Enfin, la simulation du système global sera mise en œuvre sous MATLAB/Simulink.

### **III.2 Système éolien étudié**

La figure (II.1) représente la configuration du système éolien raccordé au réseau électrique. Le schéma de l'éolienne est basé sur la machine BDFRM. Cette composition est constituée des éléments suivants :

- Turbine éolienne
- Machine asynchrone double alimentation sans balais à réluctance (BDFRM)
- Bus continu pour le stockage et le filtrage de l'énergie
- Convertisseur coté machine (CCM)

- Convertisseur coté réseau (CCR) et sa commande pour l'interconnexion avec le réseau

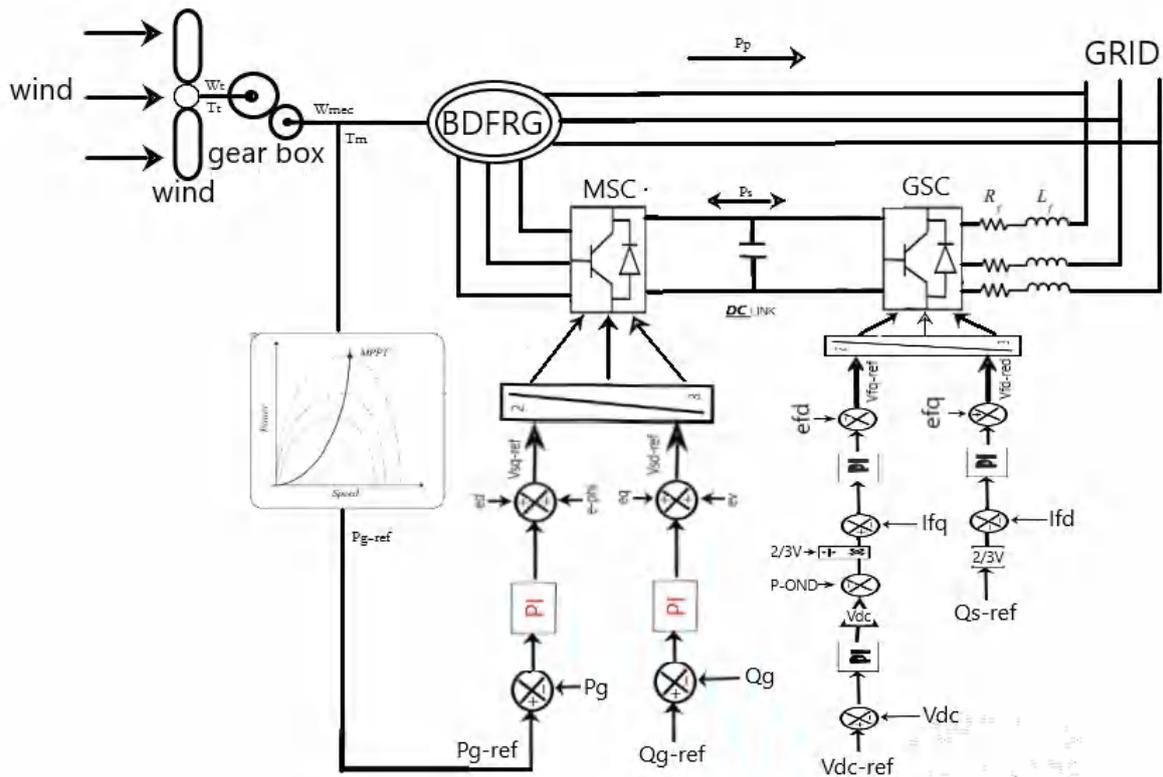


Figure III.1 Structure du système éolien raccordé au réseau électrique

### III.3 Modélisation de la turbine éolienne :

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe en raison de la multiplicité des domaines impliqués, notamment l'aérodynamique, la mécanique et l'électrique. Les facteurs déterminants de la puissance mécanique, tels que la vitesse du vent, les dimensions et la forme de la turbine, contribuent à sa complexité. Ainsi, il est nécessaire de développer un modèle dynamique intégrant tous ces paramètres pour comprendre le comportement de la turbine. La modélisation est devenue une nécessité pour contrôler les performances et répondre aux exigences opérationnelles souhaitées.

Les modèles les plus couramment utilisés dans le cadre des études électromécaniques sont relativement simples et reposent sur les hypothèses simplificatrices suivantes [103], [104], [105]:

- La vitesse du vent est supposée uniformément répartie sur l'ensemble des pales, ce qui permet de considérer toutes les pales comme un système mécanique unique.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air ( $\delta_b$ ) est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor de la turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté générateur.

Ces hypothèses permettent d'aboutir à un modèle simplifié, tel qu'illustré dans la Figure III.2.

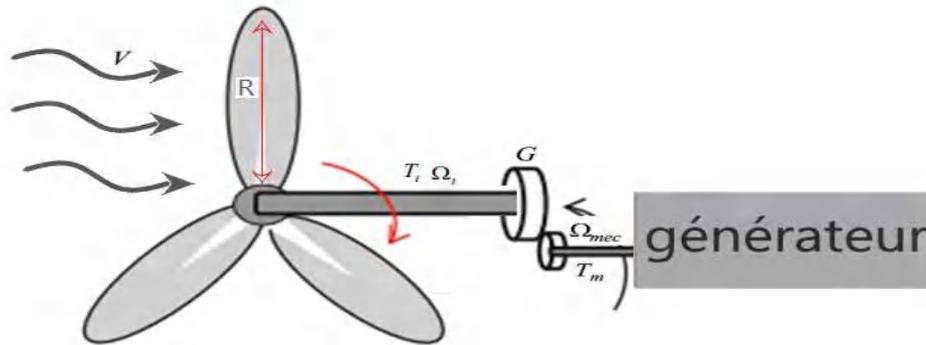


Figure III.2 Modèle de la turbine éolienne.

### III.3.1 Modèle aérodynamique :

La turbine éolienne récupère l'énergie du vent qui passe à travers ses pales et la convertit en énergie mécanique. Lorsque l'éolienne est exposée directement au vent, la puissance mécanique peut être exprimée par [106-107] :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_p(\lambda) \cdot V^3 \quad (\text{III.1})$$

$\rho$  : La masse volumique de l'air ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ).

$S$  : La surface balayée par les pales de l'éolienne,  $S = \pi \cdot R^2$ .

$R$  : Le longueur d'une pale de l'éolienne.

$V$  : La vitesse du vent.

Le coefficient de puissance  $C_p(\lambda, \beta)$  représente le rendement aérodynamique de l'éolienne et cela dépend du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation des pales  $\beta$ . Le ratio de vitesse  $\lambda$  est donné par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V} \quad (\text{III.2})$$

$\Omega_t$  : est la vitesse de la turbine.

Pour notre exemple, le coefficient de puissance  $C_p$  est donné par les équations suivantes

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_x} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_x}} + 0.0068\lambda \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_x} = \frac{1}{\lambda + 0.08} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{III.4})$$

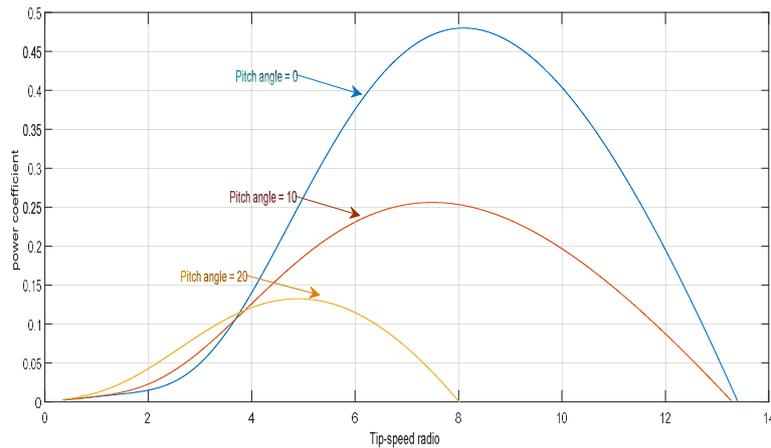


Figure III.3 Caractéristiques du coefficient de puissance de l'éolienne avec le ratio de vitesse à différentes valeurs de l'angle de calage des pales

La Figure III.3 présente la valeur maximale du coefficient de puissance ( $C_p\_max = 0,48$ ) qui est obtenue lorsque l'angle de calage des pales ( $\beta$ ) est de 0 degré et que le ratio de vitesse ( $\lambda$ ) est de 8,1. Dans cette configuration, la turbine éolienne capte la puissance aérodynamique maximale.

Par ailleurs, les variations du vent entraînent des fluctuations du couple, ce qui engendre des charges de fatigue accrues sur l'arbre de transmission et affecte également la qualité de la puissance produite. C'est pourquoi il est particulièrement intéressant de concevoir des éoliennes à vitesse variable, qui permettent d'ajuster leur vitesse de rotation en fonction des variations du vent, afin d'obtenir le coefficient de puissance ( $C_p$ ) le plus élevé possible et, par conséquent, de maximiser la puissance produite [108-109].

Le couple de la turbine peut s'écrire :

$$T_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (III.5)$$

### III.3.2 Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur joue le rôle de liaison entre la turbine et le générateur. Dans cette modélisation, il est considéré comme rigide et représenté par un simple gain. Les effets de l'élasticité et du frottement sont négligés, tandis que les pertes énergétiques au sein de cet élément sont considérées comme négligeables. Le rôle du multiplicateur est d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse du générateur [110].

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \Omega_m = \Omega_t \cdot G \\ T_m = \frac{T_t}{G} \end{cases} \quad (III.6)$$

$T_m$  : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice [rad/s] ;

$T_t$  : Couple de la turbine (aérodynamique) [rad/s] ;

### III.3.3 Modèle de l'arbre mécanique :

La partie mécanique de la turbine est composée de trois pales orientables de longueur  $R$ , fixées sur un arbre d'entraînement qui tourne à une vitesse de rotation  $\Omega_t$ . Cet arbre est relié à un multiplicateur de gain  $G$ , qui entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, nous supposons une répartition uniforme de la vitesse du vent sur l'ensemble des pales, ce qui implique une égalité des forces de poussée exercées sur celles-ci. Par conséquent, il est possible de modéliser les trois pales comme un seul et même système mécanique, caractérisé par la somme des caractéristiques mécaniques de chaque pale.

En ce qui concerne la conception aérodynamique des pales, nous considérons un coefficient de frottement avec l'air très faible, pouvant être négligé. De même, étant donné que la vitesse de rotation de la turbine est très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes de frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, un modèle mécanique composé de deux masses peut être obtenu, comme illustré dans la Figure (III.4). La validité de ce modèle par rapport à la turbine complète a déjà été vérifiée dans des études antérieures [111-112].

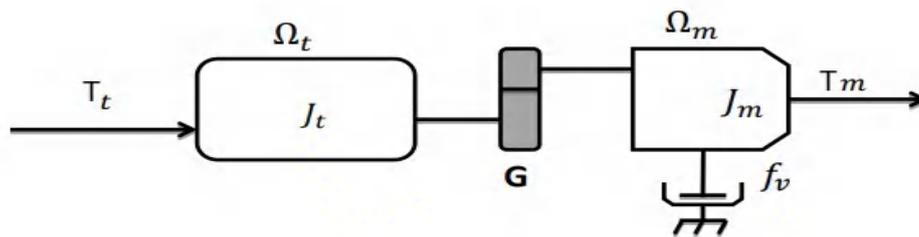


Figure III.4 Modèle mécanique de la turbine éolienne.

D'après la figure III.4, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la machine par :

$$j \frac{d\Omega_m}{dt} + f \cdot \Omega_m = T_m - T_{em} \quad (\text{III.7})$$

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique du générateur.

$J$  : l'inertie totale du système éolien. Elle est constituée de l'inertie de la turbine ( $J_t$ ), du coefficient de multiplicateur ( $G$ ) et de l'inertie du générateur ( $J_g$ ) .

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g (\text{III.8})$$

f : Coefficient de frottement visqueux totale du système éolien.

Le schéma bloc présenté dans la Figure (III.5) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc met en évidence la possibilité de contrôler la vitesse de rotation de la machine, et donc de la turbine, en agissant soit sur l'angle de calage des pales, soit sur le couple électromagnétique de la machine. La vitesse du vent (V) est considérée comme une entrée perturbatrice dans le système [113].

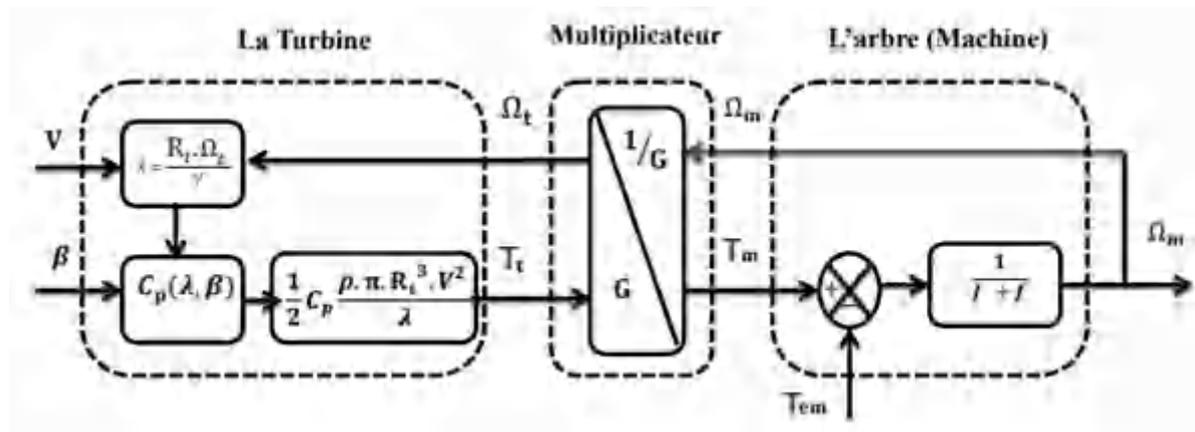


Figure III.5 Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

### III.4 Rappel sur le modèle mathématique de la machine BDFRG (chapitre 2):

Le modèle mathématique de la machine BDFRM dans le repère biphasé (d,q) lié au champ tournant est donné par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{pd} = R_p I_{pd} + \frac{d\Phi_{pd}}{dt} - \omega_p \phi_{pq} \\ V_{pq} = R_p I_{pq} + \frac{d\Phi_{pq}}{dt} + \omega \phi_{pd} \\ V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - (\omega_r - \omega) \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + (\omega_r - \omega) \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{cases} \phi_{pd} = L_p I_{pd} + L_m I_{sd} \\ \phi_{pq} = L_p I_{pq} - L_m I_{sq} \\ \phi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{pd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} - L_m I_{pq} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$T_e = \frac{3P_R L_m}{2L_p} (\phi_{pd} I_{sq} + \phi_{pq} I_{sd}) \quad (\text{III.11})$$

Les puissances active et réactive sont données par :

- Pour le bobinage de puissance :

$$\begin{cases} P_p = \frac{3}{2}(V_{pd}I_{pd} + V_{pq}I_{pq}) \\ Q_p = \frac{3}{2}(V_{pq}I_{pd} - V_{pd}I_{pq}) \end{cases} \quad (III.12)$$

➤ Pour le bobinage de commande :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq}) \end{cases} \quad (III.13)$$

➤ Pour Les puissances envoyées au réseau électrique

$$\begin{cases} P_g = P_p + P_s \\ Q_g = Q_p + Q_s \end{cases} \quad (III.14)$$

### III.5 Modélisation de l'étage de conversion :

Le convertisseur de puissance bidirectionnel PWM-VSI (Back-to-Back) est constitué de deux convertisseurs de source de tension (VSC) à modulation de largeur d'impulsion (PWM) conventionnels, comme illustré dans la Figure III.6. L'un des convertisseurs fonctionne en tant que redresseur, permettant la conversion de courant continu (DC) en courant alternatif (AC), tandis que l'autre convertisseur fonctionne en tant qu'onduleur, effectuant la conversion d'AC en DC. Ces deux convertisseurs sont connectés entre eux via une liaison bus DC constituée d'un condensateur.

Cette topologie offre un contrôle actif et réactif, un facteur de puissance élevé du côté générateur et un rendement élevé. Cependant, elle présente certains inconvénients tels qu'une durée de vie réduite, des pertes de commutation élevées et la présence d'harmoniques de fréquence [114].

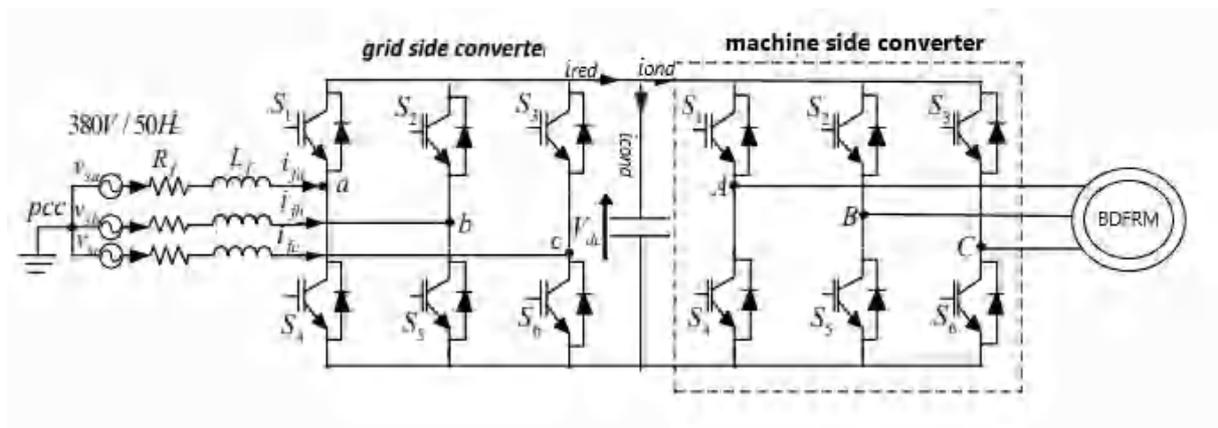


Figure III.6 : Schéma électrique d'une chaîne de conversion d'énergie dans un système éolienne.

#### III.5.1 Modélisation du convertisseur côté réseau :

Le convertisseur côté réseau est utilisé pour assurer la connexion du système éolien au réseau électrique. Son rôle est l'injection de la puissance générée par l'éolienne au réseau tout en respectant les normes et les conditions exigées par ce dernier ; pour cela il est indispensable de choisir une stratégie de contrôle du convertisseur qui doit assurer les objectifs suivants[114] :

- La régulation de la tension de bus continu ; cette tension est généralement déstabilisée par plusieurs facteurs, comme la nature fluctuante de la puissance éolienne causée par le vent, le déséquilibre dans le réseau et les chutes de tension dans les commutations des semi-conducteurs ;
- Le contrôle de la puissance active et réactive transmise au réseau, afin de maintenir un facteur de puissance unitaire ;
- La synchronisation du système, qui permet d'éliminer certains harmoniques et d'équilibrer le réseau électrique [115].

Dans cette partie, nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La Figure III.7 illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique, constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée

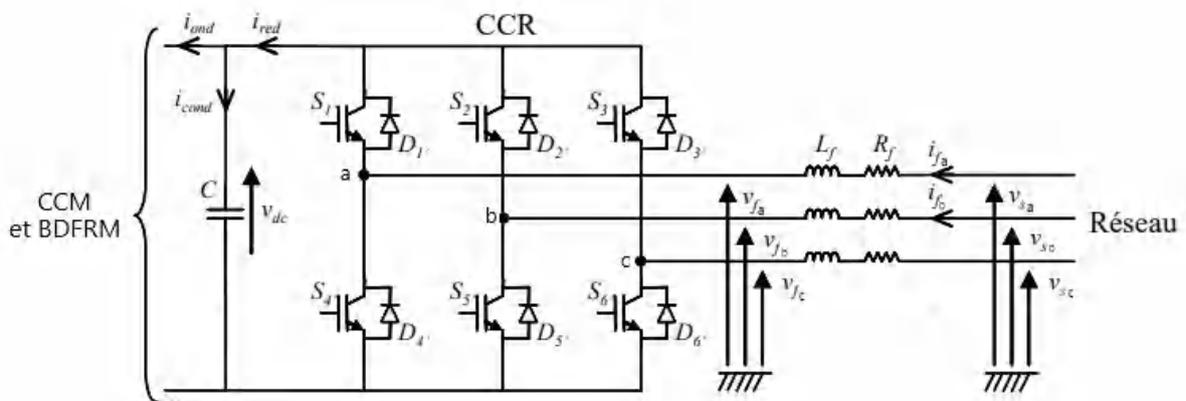


Figure III.7 : Connexion du CCR au réseau électrique.

Avec :

- $i_{ond}$ ,  $i_{red}$  : Les courants modulés par le CCM et le CCR.
- $i_{cond}$  : Le courant traversant le condensateur,
- $V_{dc}$  : La tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur).
- $S_i, D_i$  : Les transistors IGBT et les diodes connectées en antiparallèle ( $i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ),
- $R_f$  et  $L_f$  : La résistance et l'inductance du filtre RL.
- $v_{fa,b,c}$  : Les tensions simples modulées par le CCR.

- $V_{sa,b,c}$  : Les tensions simples du réseau électrique.
- $i_{fa}, i_{fb}$  : Les courants circulant à travers le filtre RL.

D'après la Figure III.7, nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_{fa} = -R_f i_{fa} - L_f \frac{di_{fa}}{dt} + V_{sa} \\ V_{fb} = -R_f i_{fb} - L_f \frac{di_{fb}}{dt} + V_{sb} \\ V_{fc} = -R_f i_{fc} - L_f \frac{di_{fc}}{dt} + V_{sc} \end{cases} \quad (III.15)$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{fd}}{dt} = -R_f I_{fd} + L_f \omega_s I_{fq} + V_{fd} - V_{sd} \\ L_f \frac{dI_{fq}}{dt} = -R_f I_{fq} + L_f \omega_s I_{fd} + V_{fq} - V_{sq} \end{cases} \quad (III.16)$$

$V_{fd,q}$ : Les tensions modulées par le convertisseur dans le repère de Park

$V_{sq,d}$  : Les tensions du réseau dans le repère de Park.

$I_{fd,q}$  : Les composantes directe et quadratique des courants de filtre.

Les puissances active et réactive générées par le CCR sont définies par :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} I_{fd} + V_{sq} I_{fq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} I_{fd} - V_{sd} I_{fq}) \end{cases} \quad (III.17)$$

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_{cond} \quad (III.18)$$

Avec :

$$I_{cond} = I_{red} - I_{ond} \quad (III.19)$$

### III.5.2 Modélisation du convertisseur côté machine

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion de courant continu en courant alternatif. Il fonctionne en commutation forcée et est conçu à base de transistors tels que les IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor). Sa commande peut être réalisée soit par la technique classique, soit par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Dans ce travail, l'onduleur de tension est commandé par la technique MLI.

L'onduleur constitue le cœur du système d'alimentation. Il est composé de trois bras indépendants, chacun comportant deux interrupteurs. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Ces interrupteurs permettent d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [117]. La Figure III.8 représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine (BDFRM).

On peut remplacer chaque groupe transistor-diode de la figure (III.8.A) par des interrupteurs Si avec (i = 1,2,3,4,5,6), on obtient le schéma simplifié pour chaque onduleur comme l'indique la figure (III.8)

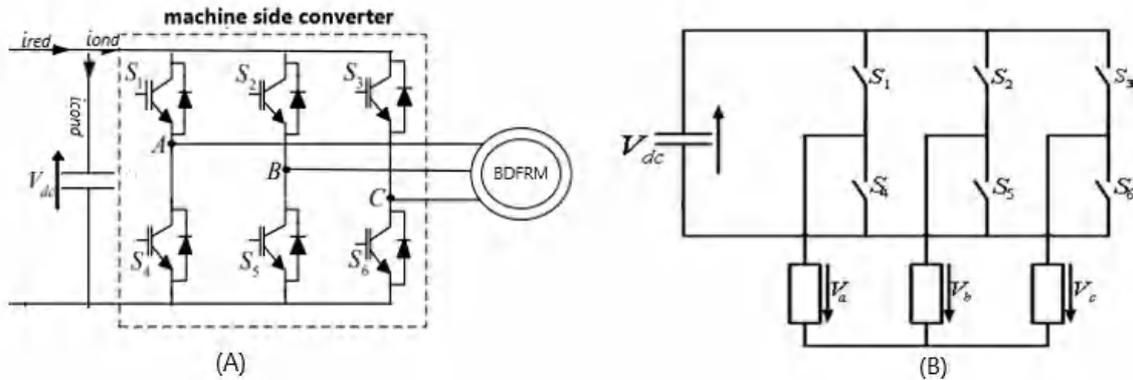


Figure III.8 : Schéma simplifié de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches :

- Branche1 :

$S_a=0$  Si  $S_1$  est ouvert et  $S_4$  est fermé ;

$S_a=1$  Si  $S_1$  est fermé et  $S_4$  est ouvert.

- Branche2 :

$S_b=0$  Si  $S_2$  est ouvert et  $S_5$  est fermé ;

$S_b=1$  Si  $S_2$  est fermé et  $S_5$  est ouvert.

- Branche3 :

$S_c=0$  Si  $S_3$  est ouvert et  $S_6$  est fermé ;

$S_c=1$  Si  $S_3$  est fermé et  $S_6$  est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (III.20)$$

Ou, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (III.21)$$

Il en découle que les tensions statoriques simples s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.22)$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangule sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

### III.5.3 Principe de la MLI

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude  $A_r$  et de fréquence  $F_r$ , avec un signal appelé porteuse d'amplitude  $A_p$  et de fréquence  $F_p$  très élevée [118]. La Figure III.9 illustre cette technique.

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

- La fréquence de la modulation :  $F_r$
- L'indice de modulation :

$$m = \frac{F_p}{F_r} \quad (III.23)$$

Où  $f_p$  est la fréquence de la référence.

- Le coefficient de réglage en tension  $r$  :

$$r = \frac{A_r}{A_p} \quad (III.24)$$

Avec :

$A_r$  : Amplitude de la référence.

$A_p$  : Amplitude de la porteuse [119].

### III.5.4 Algorithme de commande :

L'algorithme de commande de la stratégie triangule sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras  $k$  peut être résumé en 2 étapes :



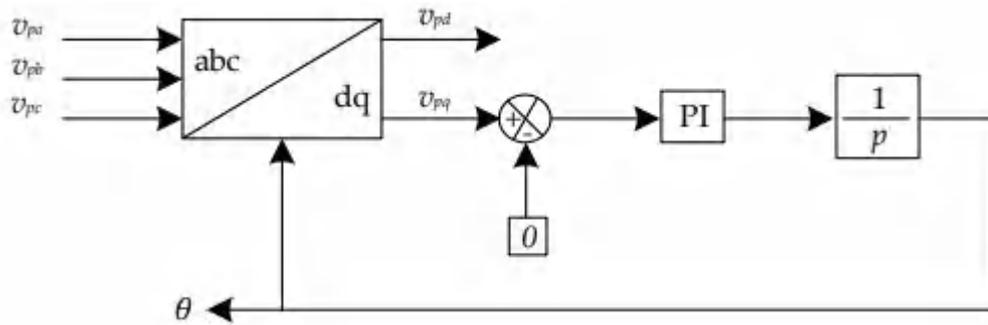


Figure III.11 Schéma fonctionnel d'un PLL.

La fonction de transfert en boucle ouverte de la boucle PLL est défini par :

$$FTBO = kp \left( \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \frac{1}{p} \quad / \tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{III.27})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{K_p - P \quad P + K_i - P}{P^2 + K_p - PLL P + K_i - PLL} \quad (\text{III.28})$$

Par identification de la fonction de transfert FTBF avec la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G(P) = P^2 + K_p - PLL P + K_i - PLL = P^2 + 2\xi\omega_n P + \omega_n^2 \quad (\text{III.29})$$

Finalement, on en déduit les valeurs des constantes du régulateur comme suit :

$$\begin{cases} K_p - PLL = 2\xi\omega_n \\ K_i - PLL = \omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

### III.6.2 Contrôle des courants transitant dans le filtre RL

La stratégie de commande du la PLL impose que la tension  $V_{sq}=0$  soit égale à zéro, ce qui permet le découplage de la puissance active et réactive, donc les équations III.16 et III.17 deviennent :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_{sq} I_{fq} = V_{dc} I_{dc} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_{sq} I_{fd} \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

$$\begin{cases} V_{fd} = L_f \frac{dI_{fd}}{dt} + R_f I_{fd} - e'_q \\ V_{fq} = L_f \frac{dI_{fq}}{dt} + R_f I_{fq} - e'_d \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

$$\begin{cases} e'_q = -L_f \omega_s I_{fq} \\ e'_d = -L_f \omega_s I_{fd} + V \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

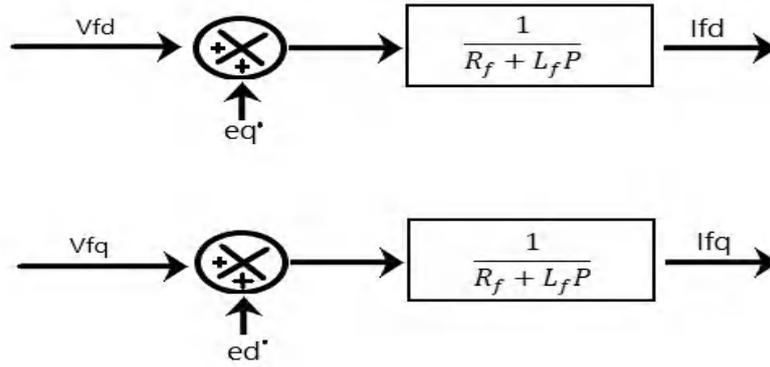


Figure III.12 Schéma bloc du CCR.

À partir de la figure III.12, nous pouvons constater que le contrôle des courants  $I_{fd}$  et  $I_{fq}$  peut être réalisé en régulant les tensions  $V_{fd}$  et  $V_{fq}$ . Cependant, les deux axes d et q sont couplés entre eux ( $ed$ ,  $eq$ ), ce qui rend le contrôle du système plus complexe. Pour cette raison, des tensions identiques mais de signes opposés ont été ajoutées à la sortie des régulateurs de courant (voir la Figure III.10).

On aboutit alors au schéma bloc simple et identique pour les deux axes :

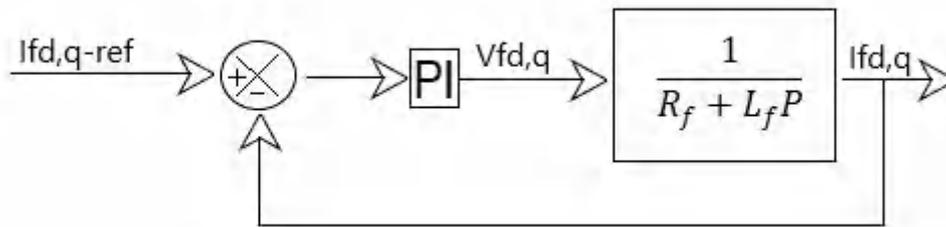


Figure III.13 Boucle de régulation des courants de CCR.

La fonction de transfert en boucle ouverte est:

$$FTBO = k_p \left( \frac{\tau_i p + 1}{\tau_i p} \right) \frac{1/R_f}{1 + \frac{L_f}{R_f} p} \quad (III.34)$$

On adopte la méthode de compensation des pôles, on obtient la forme suivante :

On pose :

$$\tau_i = \frac{L_f}{R_f} \quad (III.35)$$

$$FTBO = \frac{K_p}{L_f p} \quad (III.36)$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{L_f}{K_p} p} \quad (III.37)$$

La constante de temps du système est :

$$\tau_{BF} = \frac{L_f}{K_p} \quad (III.38)$$

Donc :

$$\begin{cases} K_p = \frac{L_f}{\tau_{BF}} \\ K_i = \frac{K_p R_f}{L_f} \end{cases} \quad (III.39)$$

A partir de l'équation (III.31), il est alors possible d'imposer les puissances active et réactive de référence, en imposant les courants de référence suivants la Figure III.10:

$$\begin{cases} I_{fq} = \frac{2}{3V_{sq}} P_{S-re} \\ I_{fd} = \frac{2}{3V_{sq}} Q_{S-r} \end{cases} \quad (III.40)$$

### III.6.3 Contrôle de la tension du bus continu Vdc :

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_{cond} \quad (III.41)$$

On applique la transformation de la place on obtient :

$$V_{dc} = \frac{1}{CP} \cdot I_{cond} \quad (III.42)$$

Donc, la boucle de régulation de la tension continue peut-être représentée par le schéma illustré dans Figure III.14 :

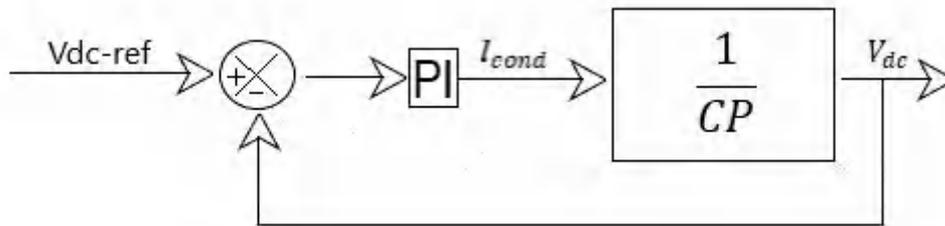


Figure III.14 Boucle de régulation de la tension Vdc.

La fonction de transfert en boucle ouverte est:

$$FTBO = k_p \left( \frac{\tau_{ip} + 1}{\tau_{ip}} \right) \frac{1}{CP} \quad (III.43)$$

La fonction de transfère en boucle fermée sera donc :

$$FTBF = \frac{K_{p-DC} P + K_{i-DC}}{CP^2 + K_{p-DC} P + K_{i-DC}} \quad (III.44)$$

Par identification de la fonction de transfert FTBF avec la fonction de transfert d'un système du deuxième ordre en boucle fermée donnée par :

$$G(P) = CP^2 + K_{p-DC} P + K_{i-DC} = P^2 + 2\xi\omega_n P + \omega_n^2 \quad (III.45)$$

Finalement, on en déduit les valeurs des constantes du régulateur comme suit :

$$\begin{cases} K_{P-DC} = 2\xi\omega_n C \\ K_{i-DC} = C\omega_n^2 \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

### III.7 Extraction du maximum de la puissance du vent

En général, le fonctionnement d'une turbine éolienne à vitesse variable peut être déterminé dans trois zones en fonction de la vitesse du vent, comme montre la Figure III.15 [120-121].

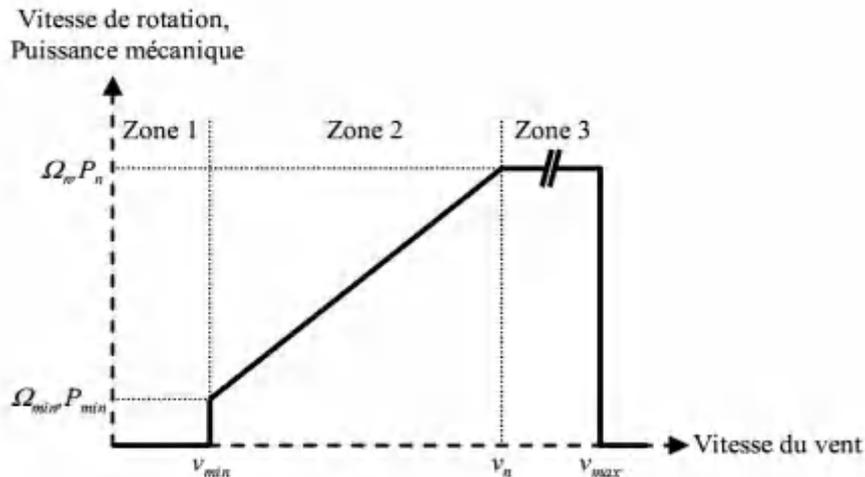


Figure III.15 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [120]

- Zone 01 : Il représente la région de départ où la vitesse du vent est très faible et inférieure au seuil de vitesse requis pour faire fonctionner le générateur.
- Zone 02: Pour une certaine valeur minimale de la vitesse du vent, la génératrice démarre et peut fonctionner entre des vitesses  $\Omega_{min}$  et  $\Omega_n$ , pour extraire le maximum de puissance ; l'angle de calage est maintenu constant (dans notre cas ( $\beta = 0$ )) et un algorithme de commande est appliqué afin de garder un rapport de vitesse optimale  $\lambda_{opt}=8.1$  (voir la Figure III.3) tout en agissant sur le couple électromagnétique afin de contrôler la vitesse de rotation.
- Zone 3 : Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale. La vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Dès que le vent a atteint sa valeur maximale ( $V_{max}$ ), une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la BDFRM afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT [122].

L'objectif principal de cette technique est de maximiser la puissance capturée de la turbine éolienne pour différentes vitesses du vent, le principe étant d'ajuster la vitesse de la turbine tout en gardant le ratio de la vitesse  $\lambda$ -opt maximal.

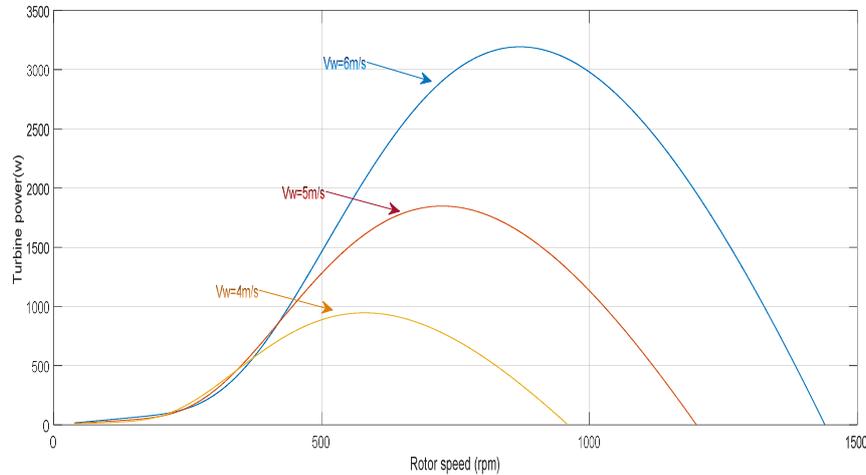


Figure III.16 Courbe de la puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique

Au vu de la figure III.16, nous pouvons constater que pour chaque valeur de la vitesse du vent, il y a un point de puissance maximale où le ratio de vitesse est optimal  $\lambda$ -opt. Pour cela, il faut contrôler et régler la vitesse de la turbine de façon à garder le ratio de la vitesse  $\lambda$  égal à  $\lambda$ -opt et pour s'assurer que la turbine fonctionne toujours dans le point optimal. La Figure III.17 représente le schéma de principe de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

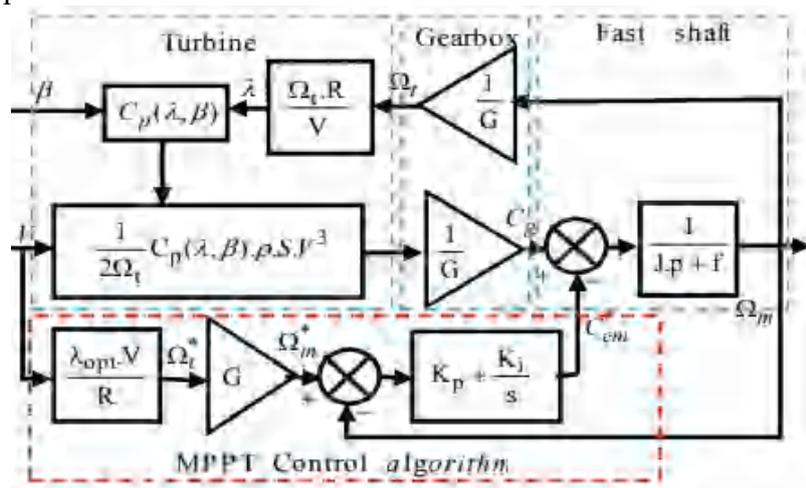


Figure III.17 Commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Pour un point de fonctionnement donné, on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance ( $C_p$ -max),

Celle-ci est obtenue si la vitesse relative ( $\lambda$ ) est égale à sa valeur optimale ( $\lambda_{opt}=8.1$ ) et  $\beta$  constant ( $\beta=0$ ).

La vitesse mécanique de référence de la BDFRM est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{m-ref} = G. \Omega_{t-ref}$$

Avec :

$$\Omega_{t-ref} = \frac{\lambda_{opt}.V}{R}$$

L'ensemble des modèles de la turbine, du multiplicateur de vitesse et de l'arbre mécanique, commandé par la stratégie MPPT a été simulé sous Matlab/Simulink.

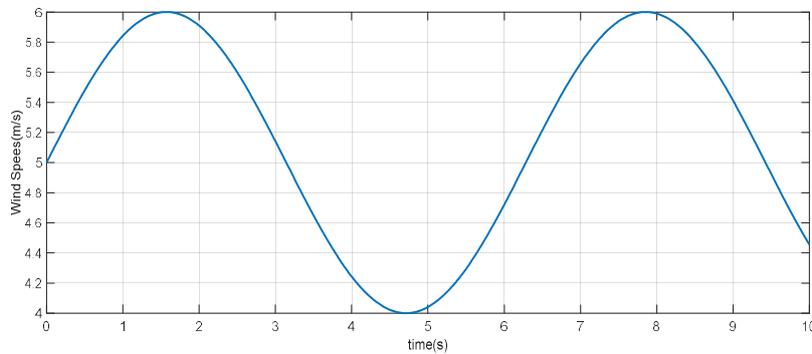


Figure III.18 Variation de la vitesse du vent

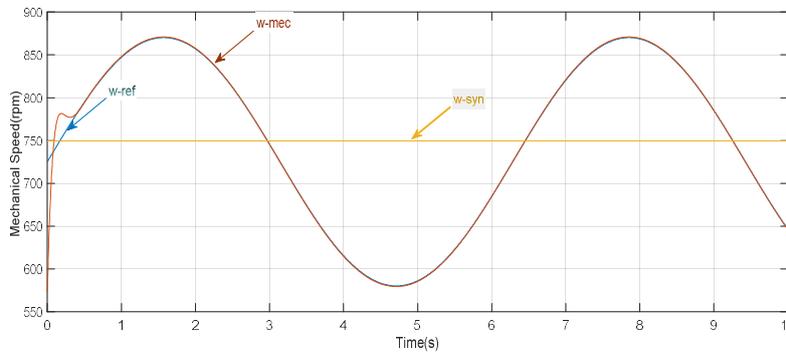


Figure III.19 Vitesse mécanique du générateur

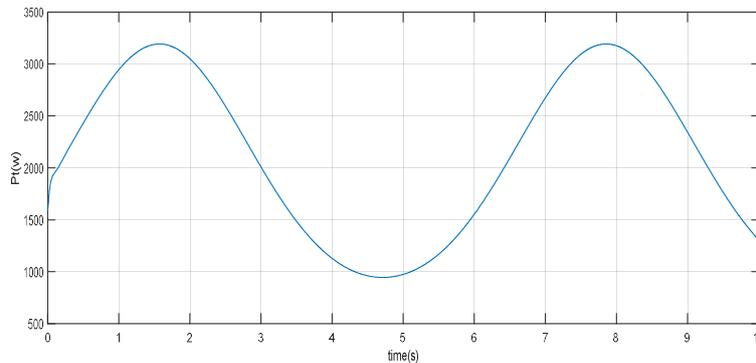


Figure III.20 Puissance de la turbine éolienne

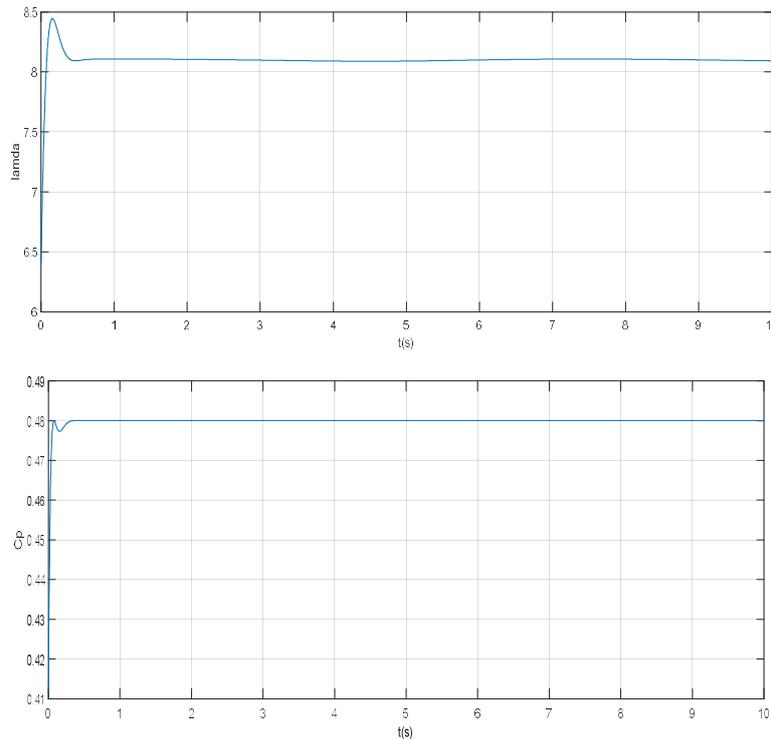


Figure III.21 La vitesse relative ( $\lambda$ ) et le coefficient de puissance ( $C_p$ )

Cette simulation a été effectuée en utilisant le profil du vent montré sur la figure (III.18). La vitesse mécanique du générateur et sa référence sont illustrées dans la figure (III.19). La puissance mécanique disponible au niveau de la turbine ainsi que la vitesse de celle-ci sont montrées dans la figure (III.20). La figure (III.21) présente la variation de la vitesse relative ( $\lambda$ ) et le coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction du temps.

À tout instant, la vitesse mécanique du générateur, passant par les deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone, suit sa référence correctement, de plus, la puissance mécanique produite par la turbine est maximale. La vitesse relative ( $\lambda$ ) et le coefficient de puissance ( $C_p$ ) maintiennent leurs valeurs optimales. Donc, le générateur est parfaitement commandé à sa vitesse de référence optimale permettant d'extraire le maximum de puissance.

D'après ces résultats, on peut conclure que la stratégie de commande MPPT, qui présente de très bonnes performances, permet effectivement d'extraire le maximum de puissance du vent par rapport aux variations de la vitesse de celui-ci dans le temps.

**III.8 Résultats de Simulations :**

Afin de valider les commandes étudiées dans ce chapitre, la commande vectorielle des puissances active et réactive de la génératrice est illustre dans le chapitre 2 et la figure (III.1) représente la configuration du système éolien raccordé au réseau électrique.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

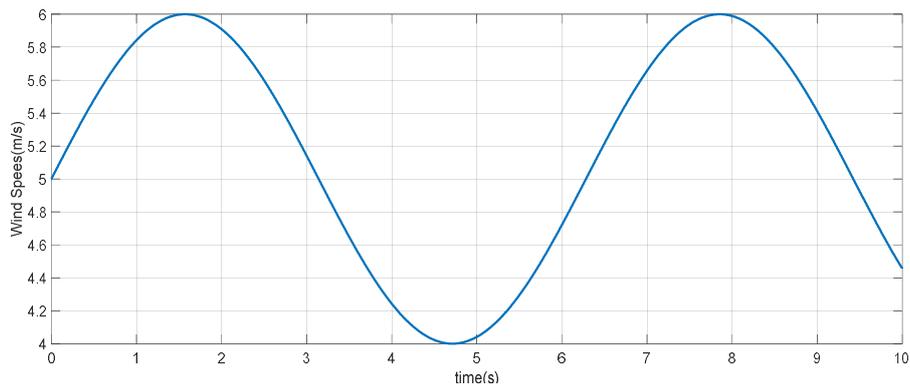


Figure III.22 Variation de la vitesse du vent

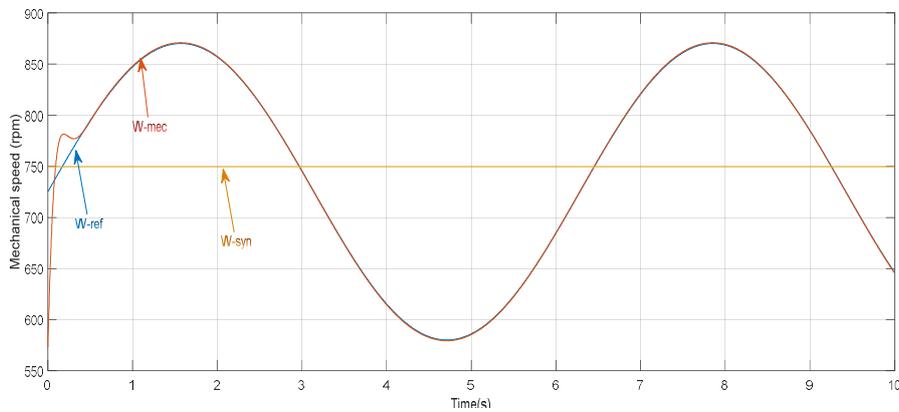
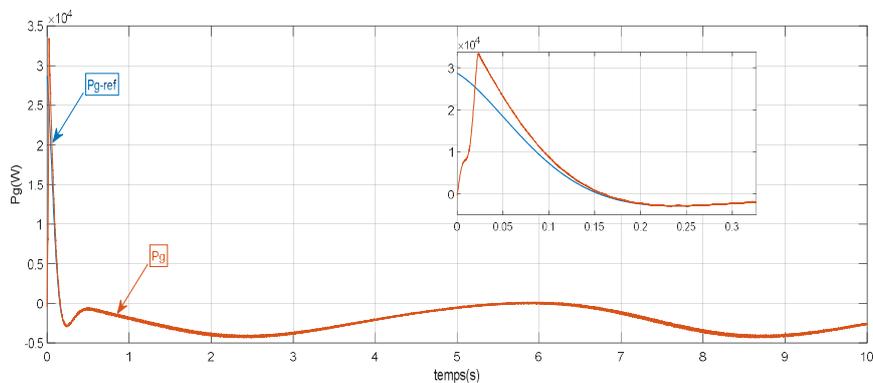


Figure III.23 Vitesse mécanique de la BDFRM.



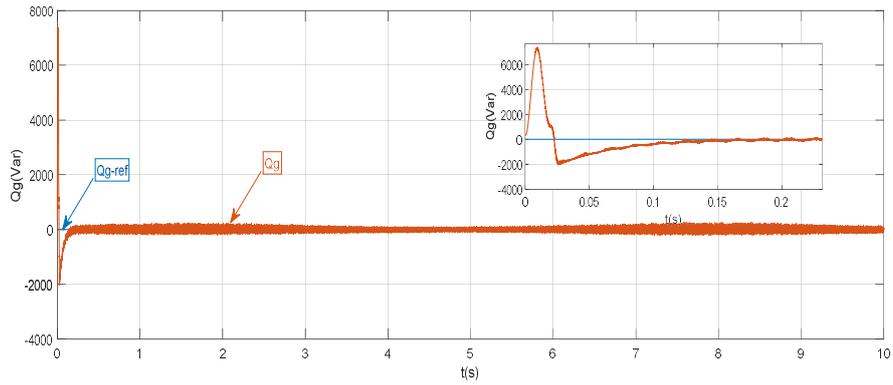


Figure III.24 Puissances active et réactive envoyées au réseau électrique

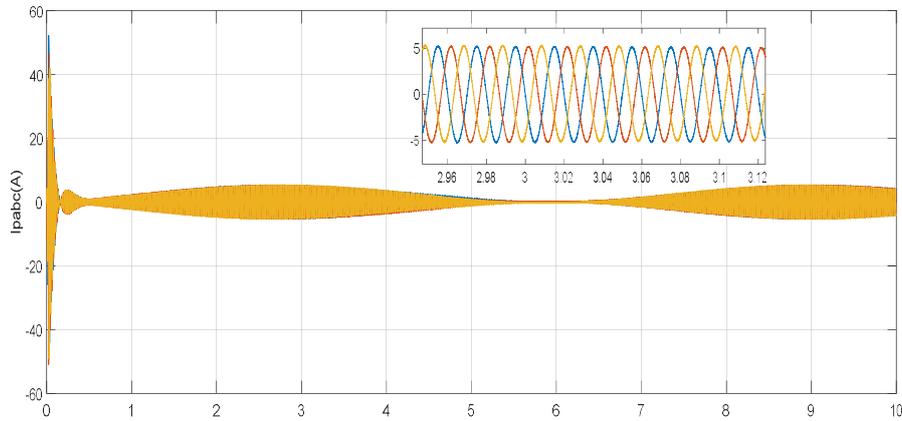


Figure III.25 Courants statoriques primaire

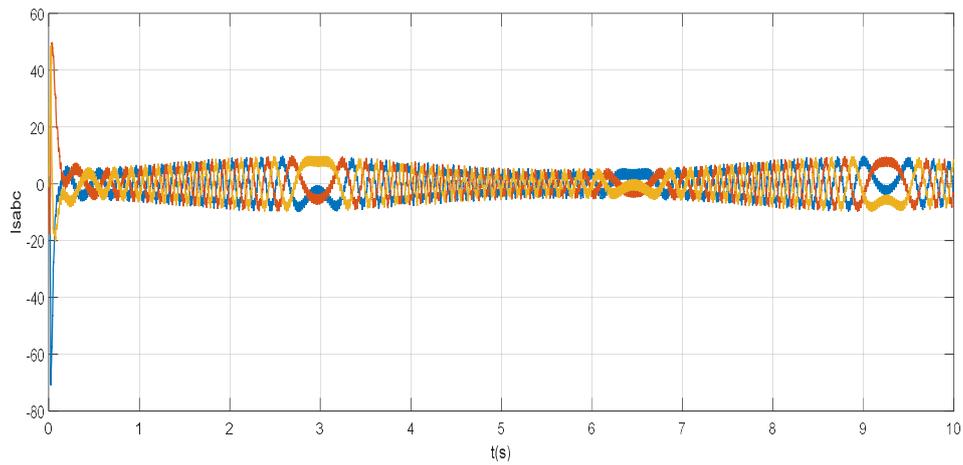


Figure III.26 Courants statoriques secondaire

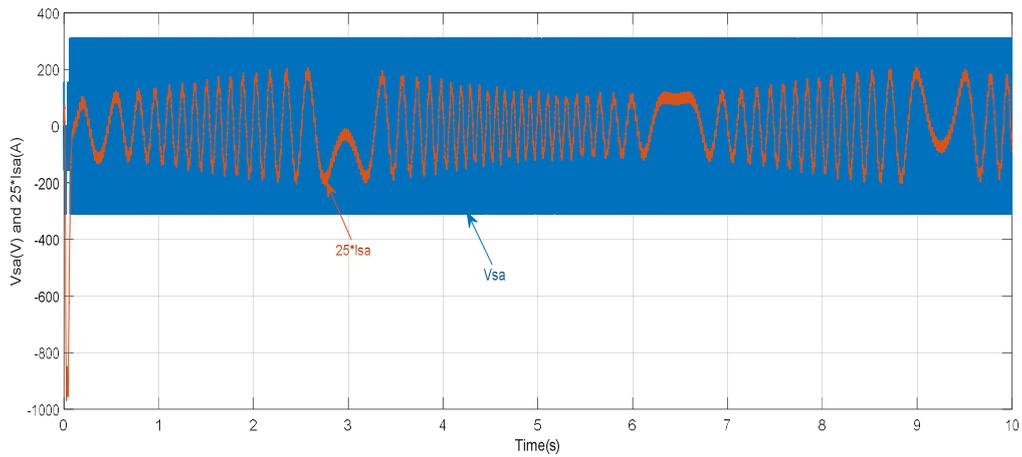


Figure III.27 Tension et courant statorique du bobinage de commande d'une seule phase.

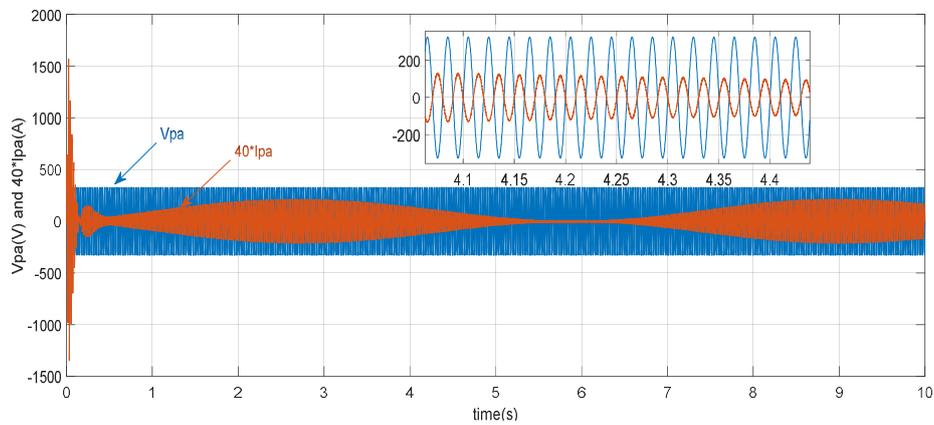


Figure III.28 Tension et courant statorique du bobinage de puissance d'une seule phase

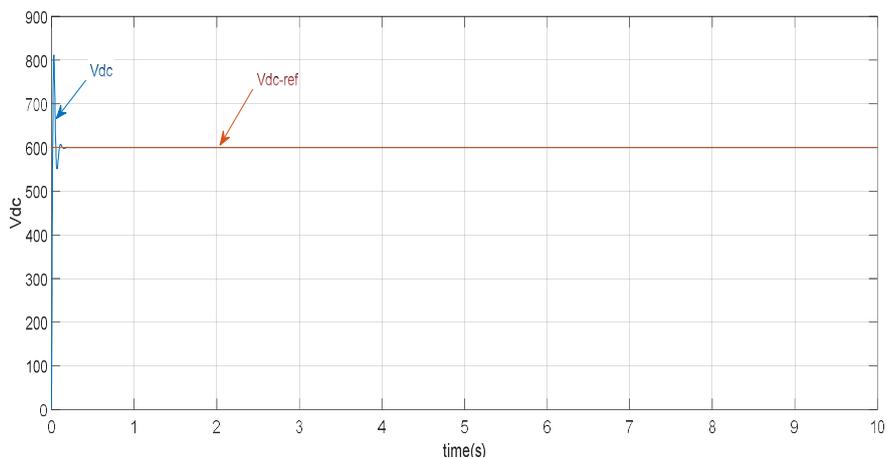


Figure III.29 Tension du bus continu.

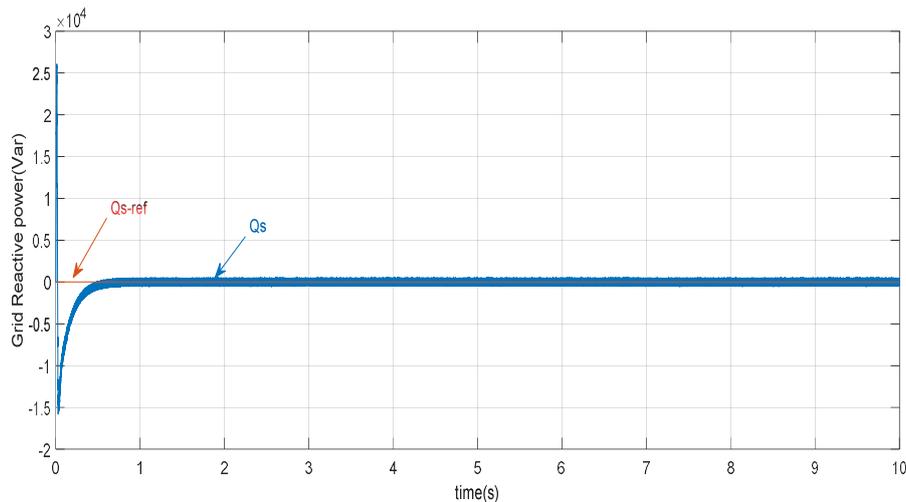


Figure III.30 Puissance réactive du convertisseur cote réseau

Les différentes performances de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne proposée (Figure III.1) ont été obtenues grâce à une application d'un profil du vent (Figure III.22) qui permet de passer par des vitesses au-dessous et au-dessus de la vitesse du synchronisme du générateur pour mettre en évidence les deux modes de fonctionnement (hypo-synchrone et hyper-synchrone).

Nous constatons dans la Figure III.24 que la commande vectorielle utilisant des correcteurs PI démontre un découplage efficace ainsi qu'une régulation précise des puissances active et réactive envoyées au réseau électrique. De plus, cette commande assure une bonne poursuite des valeurs de références imposées dans le cas d'un fonctionnement à vitesse variable de la BDFRM.

Dans la Figure III.26, on observe que la fréquence des courants statoriques secondaires est faible et varie en fonction des fluctuations de la vitesse du vent. À l'instant  $t=3$ s, on peut observer la transition du mode hyper-synchrone au mode hypo-synchrone, tandis qu'à l'instant  $t=6.5$ s, la transition du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone est illustrée.

Figures III.25, III.27 et III.28 présentent les courants des enroulements dans lesquels on observe que tant la fréquence que l'amplitude de ces courants de commande (courants secondaires  $I_s$ ) changent pendant la période de variation des puissances active et réactive. D'autre part, la fréquence du courant de l'enroulement d'alimentation (courants primaires  $I_p$ ) reste constante pour être adaptée à la fréquence d'alimentation du réseau, de sorte que lorsque la référence de la puissance active est modifiée, l'amplitude du courant est également modifiée. La figure (III.28) montre le courant statorique primaire fourni par la machine est en

opposition de phase par rapport à la tension du réseau, puisque la machine n'injecte que la puissance active dans le réseau ( $Q_g=0$ ).

La Figure III.29 montre que la tension du bus continu se stabilise sur sa valeur de référence imposée par la commande. La tension continue en sortie du redresseur est bien contrôlée et quasi insensible aux variations de la vitesse du vent.

La Figure III.30 montre que la puissance réactive côté réseau correspond à la référence clairement sur zéro, avec un bon suivi, de sorte que le facteur de puissance unitaire est assuré par le contrôleur proposé.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles, de la turbine éolienne, de la machine asynchrone double alimentation sans balais à réductance avec l'orientation du flux statorique primaire pilotée par un convertisseur back to back MLI. Nous avons présenté également la stratégie de commande MPPT qui permet d'extraire le maximum de puissance du vent. Ensuite, la commande vectorielle appliquée à la BDFRM a été bien développée. Les résultats de simulation obtenus du générateur éolien prouvent les performances de la commande MPPT. Ils montrent aussi l'efficacité de la commande indépendante des puissances active et réactive envoyées au réseau électrique en utilisant la technique d'orientation du flux statorique. De plus, l'ensemble du générateur et du convertisseur back to back a été capable de fonctionner dans les deux modes (hypo-synchrone et hyper-synchrone).

**Chapitre IV**  
**Commande Par Mode**  
**Glissant d'un Système Eolien**  
**basé sur la machine BDFRM**

## **IV.1 Introduction**

Le contrôle linéaire a rencontré des difficultés en raison de la complexité et de la non-linéarité élevée du système d'éolienne à vitesse variable (VSWT), qui présente de fortes caractéristiques de couplage ainsi qu'une incertitude dans les parties aérodynamiques et électriques. Ainsi, différentes méthodes de contrôle non linéaire des systèmes éoliens ont été proposées, telles que le contrôle  $H_\infty$ , le contrôle robuste, la technique de linéarisation par rétroaction, les réseaux neuronaux [123], le système adaptatif de référence de modèle MRAS [124], le modèle prédictif [125] et le contrôle par mode glissant.

En dehors de ces contrôleurs non linéaires, le contrôle par mode glissant (SMC) à structure variable a suscité une attention particulière pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne (WECS) basés sur le BDFRG, en raison de sa robustesse face aux perturbations externes, qu'elles soient modélisées ou non, aux scénarios de défaillance, aux variations de paramètres, à sa structure simple, à sa faible sensibilité aux paramètres et à sa facilité de mise en œuvre pour l'extraction du vent. Cependant, la méthode classique de mode glissant génère un phénomène de broutage indésirable, qui peut être préjudiciable au système. Il est donc approprié d'explorer l'utilisation d'algorithmes de mode glissant d'ordre supérieur, qui héritent de toutes les propriétés du SMC tout en atténuant le broutage ou les vibrations à haute fréquence de manière contrôlée, réduisant ainsi les contraintes mécaniques dans le système [126].

Récemment, les techniques de modes glissants non linéaires, telles que les techniques de super-twisting sliding mode, sont devenues une option intéressante pour plusieurs types de systèmes. Le contrôle par mode glissant garantit la robustesse et la convergence en temps fini d'un système non linéaire, à condition que la condition d'attractivité soit vérifiée. Plusieurs travaux ont été publiés utilisant cette technique [127].

Ce chapitre sera subdivisé en deux parties. La première partie sera consacrée à la présentation théorique de la commande par mode glissant de premier et de second ordre. La seconde partie sera dédiée à l'application du contrôle par mode glissant de premier et de second ordre au système éolien à vitesse variable basé sur le BDFRM.

## **IV.2 Commande par mode glissant**

La commande par mode glissant est une stratégie de commande à structure variable utilisée dans de nombreux systèmes [128]. Son principe repose sur le fait de ramener la trajectoire de l'état du système vers une surface prédéfinie, puis de la faire évoluer au-dessus de cette

surface en suivant une certaine dynamique jusqu'à atteindre un point d'équilibre. Cette surface est appelée surface de glissement ou de commutation. Le comportement dynamique résultant, connu sous le nom de régime glissant idéal, est entièrement déterminé par les paramètres et les équations qui définissent la surface. L'utilisation de ce régime présente plusieurs avantages : il permet tout d'abord de réduire l'ordre du système, et en outre, il rend le régime glissant insensible aux perturbations qui agissent dans les mêmes directions que les entrées [129].

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande, y compris dans les domaines des commandes hydrauliques ou pneumatiques [130]. Elle est largement utilisée dans les entraînements électriques des machines-outils ou des robots, qui nécessitent un réglage précis de la vitesse de rotation ou de la position. Dans ces applications, le réglage par mode glissant offre un comportement dynamique de haute performance et la capacité de limiter facilement certaines grandeurs, telles que le courant et la vitesse de rotation. Ces avantages sont indéniables lorsqu'il s'agit de choisir une stratégie de réglage [131].

### **IV.3 Principe de la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable**

Le contrôle à structure variable (CSV) utilisant le contrôle par mode glissant (SMC) a été proposé et développé au début des années 1950 en Union soviétique par Emelyanov et plusieurs chercheurs tels que Utkin et Itkis [132]. Au cours des dernières décennies, le contrôle à structure variable et le contrôle par mode glissant ont suscité un vif intérêt au sein de la communauté de recherche en Automatique et Contrôle des systèmes [133].

En tant qu'une forme spécifique de commande à structure variable, la commande par modes glissants (CMG) est largement répandue dans la littérature. Son succès s'explique par sa simplicité de mise en œuvre et sa robustesse face aux variations des paramètres et aux perturbations externes. Le principe consiste à définir une surface de glissement qui représente la dynamique souhaitée, puis à concevoir une loi de commande qui agit sur le système en deux phases. Dans la première phase, on guide le système pour qu'il rejoigne cette surface, puis dans la seconde phase, on maintient le glissement le long de cette surface afin d'atteindre l'origine du plan de phase, comme illustré dans la figure IV.1 [134].

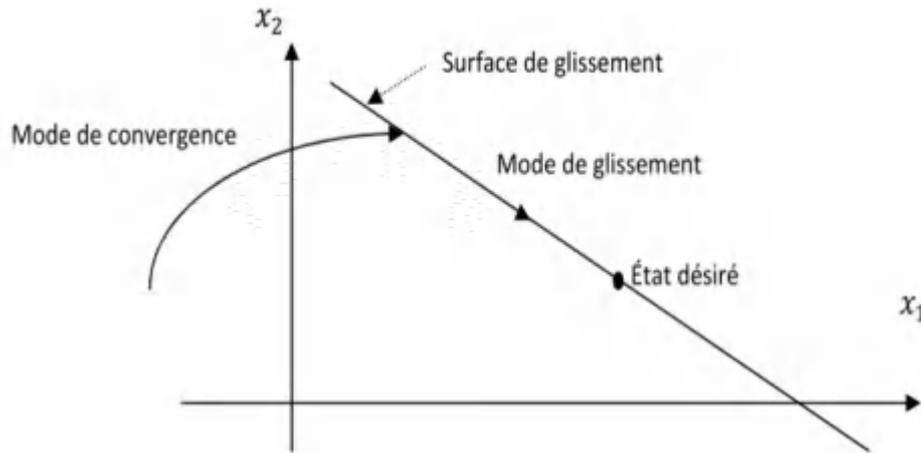


Figure IV.1 : Principe de la commande par mode de glissement [134]

La commande de tels systèmes par mode de glissement a en général trois modes distincts (figure IV.1) :

- Le mode de convergence (MC) : Durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation  $S(x, y)=0$ . Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode glissant : Durant lequel la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x,y)$ .
- Le mode du régime permanent (MRP) : la trajectoire de phase, partant d'une condition initiale quelconque, atteint la surface de commutation en un temps fini, (mode non glissant), puis tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant [135].

#### IV.4 Concept général de la commande par mode glissant

La conception de cette commande peut être divisée en trois étapes principales très dépendantes. Ces étapes concernent:

- Le choix des surfaces.
- L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- La détermination de la loi de commande[136].

##### IV.4.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leur forme en fonction de l'application et l'objectif visé. La surface de glissement est une fonction scalaire telle que l'erreur sur la variable à régler glisse sur cette

surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface représente le comportement dynamique désiré. Dans la littérature, différentes formes de surface sont traitées, dont chacune donne de meilleures performances par certaines utilisations [137].

Dans notre travail, on s'intéresse à une surface de forme non linéaire donnée par J.J.Slotine [138] :

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

Avec :

$e(x)$  : Ecart sur la variable à régler :  $e(x) = x_{ref} - x$

$\lambda$  : Coefficient positif qui interprète la bonde passante du contrôle désiré.

$x_{ref}$  : Valeur désiré de référence.

$r$  : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

$$S(x) = \begin{cases} e(x) & \text{pour } r = 1 \\ \lambda e(x) + \dot{e}(x) & \text{pour } r = 2 \\ \lambda^2 e(x) + 2\lambda \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) & \text{pour } r = 3 \end{cases} \quad (IV.2)$$

L'objectif de cette commande est de garder la surface qui tend vers zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x)=0$ , pour un choix convenable du paramètre  $\lambda$ . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence.

#### **IV.4.2 Conditions de convergence et d'existence**

Cette condition est en fait la condition sous laquelle le mode de glissement existe et sous laquelle la trajectoire d'état va effectivement atteindre la surface de glissement en un temps fini. Afin de déterminer ces conditions d'existence et de convergence du régime glissant [139], les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions, celles-ci correspondent au mode de convergence de l'état du système [140].

##### **1. Fonction directe de commutation :**

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (IV.3)$$

Dans cette condition, il faut introduire pour  $S(x)$  et sa dérivée  $\dot{S}(x)$ , les valeurs justes à gauche et à droite de la surface de commutation. Puisque  $S(x)$  change de signe aux deux cotés de la surface de commutation. La condition (IV.3) est équivalente à exiger que la dérivée  $\dot{S}(x)$  doive aussi changer de signe lorsqu'on passe d'un côté à l'autre de la surface de commutation [141].

## **2. La fonction de Lyapunov :**

Il s'agit de choisir une fonction scalaire positive appelée fonction de Lyapunov qui peut être donnée par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \text{(IV.4)}$$

L'équation (IV.4) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement diminue continuellement, ce qui signifie que l'état du système est attiré vers la surface de glissement. Cela justifie le terme "attractivité" donné à ce phénomène. Cette condition suppose l'existence d'un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie.

La dérivée de la fonction  $V(x)$  est donnée par :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x)S(x) \text{(IV.5)}$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître et converger vers zéro (pour garantir l'existence du mode de glissant), il suffit d'assurer que :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \text{(IV.6)}$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par  $S^2$ , diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal [142].

### **IV.4.3 La détermination de la loi de commande :**

La surface de glissement est déterminée en fonction du système et des performances désirées, indépendamment de la commande. L'obtention du régime glissant nécessite l'utilisation d'une commande discontinue. Cependant, si cette commande est indispensable, il est possible d'ajouter une partie continue pour réduire l'amplitude de la discontinuité. Ainsi, la structure d'un contrôleur comprend deux parties : la première concerne la linéarisation exacte  $U_{eq}$  et la seconde est stabilisante, notée  $U_n$ . Cette deuxième partie est essentielle dans la technique de commande par modes de glissement, car elle est utilisée pour rejeter les perturbations extérieures.

$$U = U_n + U_{eq} \text{(IV.7)}$$

$U_{eq}$  Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin. Elle sert à maintenir l'état sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par  $\dot{S}(x) = 0$ .

La commande discrète  $U_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

Pour mettre en évidence le développement des lois de commande par mode glissement, nous considérons le système défini dans l'espace d'état par l'équation :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \text{ (IV.8)}$$

Il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande U. Nous nous occupons du calcul de la commande équivalente, ensuite de la commande attractive.

Soit la dérivée de la surface S(x) :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} \text{ (IV.9)}$$

En remplaçant (IV.7) et (IV.8) dans (IV.9), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [A][X] + [B][U_{eq}] + \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \text{ (IV.10)}$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle, car la surface elle-même est égale à zéro. Par conséquent, la partie discontinue  $U_n$  est également nulle dans cette condition. Ainsi, nous obtenons :

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial X} [A][X] \right\} \text{ (IV.11)}$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (IV.10), on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface comme suit:

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n \text{ (IV.12)}$$

Et la condition d'attractivité devient :

$$\dot{S}(x)S(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B]U_n S(x) < 0 \text{ (IV.13)}$$

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est de choisir  $U_n$  sous la forme de relais (figure IV.2). Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit [135] :

$$U_n = -K \text{sgn}(S(x)) \text{ (IV.14)}$$

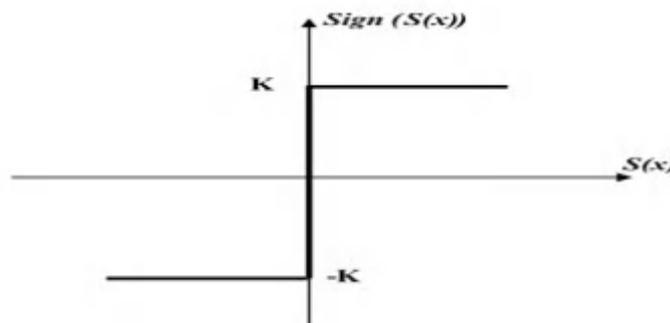


Figure IV.2 : Fonction signe (non linéarité tout ou rien).

Le gain K doit être positif afin de vérifier les conditions de l'attractivité et de la stabilité. Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit, le temps de réponse sera très long, et

s'il est très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering).

#### **IV.5 Phénomène du Chattering et ses solutions**

Dans la pratique, un régime glissant idéal n'existe pas car la fréquence de commutation des organes de commande a une limite finie. Autrement dit, il n'existe aucun organe de commutation pouvant commuter à une fréquence infinie (en effet cet organe devrait délivrer une énergie infinie).

Le caractère discontinu de la commande engendre un comportement dynamique particulier autour d'une couche limite de la surface de glissement qui est communément appelé *chattering* ou phénomène de broutement figure (IV.3). Cette oscillation au voisinage de la surface est due à l'imperfection des éléments de commutation ou des limites technologiques et physiques, telles que les retards au niveau des commutations ou des comportements avec hystérésis, qui peuvent exciter les dynamiques négligées (non modélisées) en haute fréquence.

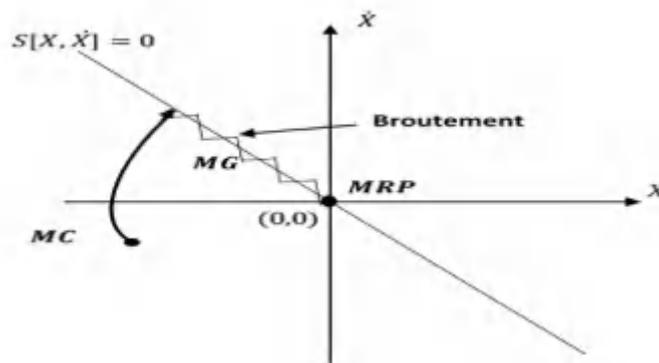


Figure IV.3 : Phénomène de broutement.

Le chattering peut dégrader les performances du système et même conduire à l'instabilité. La réticence implique également d'importantes sollicitations mécaniques au niveau des actionneurs, augmentant la consommation énergétique qui peut endommager les circuits électriques de puissance [143].

##### **IV.5.1 Solutions pour atténuer le phénomène de broutement**

Le phénomène de réticence (broutement) est le principal inconvénient de la commande par mode de glissement classique. Durant les années 80, plusieurs méthodes ont été proposées pour réduire le broutement [144]. Dans [145], les auteurs ont proposé de remplacer la fonction discontinue "signe", par une commande continue comme par exemple, la fonction de saturation, la fonction pseudo-signé, la fonction arc tangente ou la fonction tangente hyperbolique. Ces fonctions rendent le contrôle continu, par contre les trajectoires

convergentes uniquement vers un voisinage de la surface de glissement [146]. Dans [147], les auteurs ont proposé un observateur pour éliminer ce broutement ; Cette méthode est intéressante mais sensible aux incertitudes. Dans [148], les auteurs ont proposé le concept de la commande par mode glissant d'ordre deux, celle-ci assure la convergence de la variable de glissement et de sa première dérivée en temps fini vers zéro. Par la suite, cette approche a été développée par [149], d'une part pour réduire le broutement, et d'autre part pour assurer la robustesse des systèmes de degré relatif quelconque. Des travaux récents proposent des commandes adaptatives par SMC d'ordre 1 et supérieur [150- 151]. Ces lois de commande utilisent des gains dynamiques qui s'adaptent vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du système contrôlé.

**IV.5.2 Solution de couche limite :**

Cette solution, connue aussi sous le nom de « boundary layer solution », consiste à remplacer la fonction signe par une approximation continue, de type grand gain, uniquement dans un voisinage de la surface, Parmi les fonctions utilisées nous citerons la fonction de saturation :

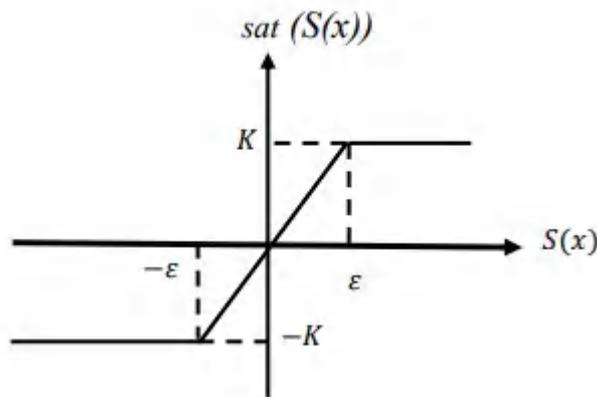


Figure IV.4 : Fonction saturation.

$$sat(S(x)) = \begin{cases} \frac{S(x)}{\epsilon} & \text{si } |S(x)| < \epsilon \\ \text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \epsilon \end{cases} \quad (IV.15)$$

$\epsilon$ : Largeur du seuil de la fonction de saturation.

D'autres fonctions existent telles que les fonctions,  $\tan h(s/\epsilon)$ ,  $2\pi \arctan (s/\epsilon)$ , pseudo-signe...

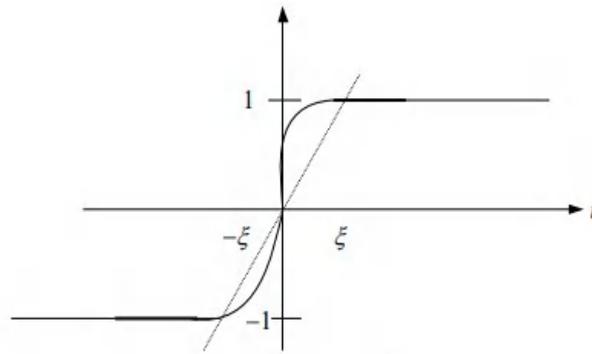


Figure IV.5 : Fonction tangente hyperbolique.

Le système ne converge plus vers la valeur désirée, mais vers un voisinage de cette dernière dans ce cas, le système est dit en régime pseudo-glissant. Bien que cela permette d'atténuer le phénomène de réticence, la précision par rapport à l'objectif fixé, la robustesse de la commande et le temps de réponse s'en trouvent dépréciés. Cette méthode est paramétrée par une constante positive - réglée pour avoir un bon compromis entre réduction du chattering et conservation de la robustesse. Dans les méthodes présentées ici, plus - est petit, plus l'approximation tend vers la fonction signe, et donc meilleure est la robustesse, au détriment de la réduction du chattering [152].

#### IV.5.3 Solution par des lois d'approche :

Par ailleurs, une approche intéressante consiste à concevoir des lois de convergence non linéaires qui permettent une adaptation dynamique d'une composante de la commande en fonction de la variation de la fonction de glissement. Ainsi, plus le vecteur d'état est loin de la surface de glissement, plus cette composante est grande et tend à ramener le vecteur vers la surface, et inversement. Par conséquent, il est théoriquement possible de réduire les commutations haute fréquence en régime établi, sans toutefois affecter le temps de convergence ni même l'erreur de poursuite du système. Gao et Hung ont proposé notamment deux lois d'atteinte possibles pour réduire les commutations.

La première loi d'atteinte contient un terme proportionnel à la fonction de glissement qui permet au système d'atteindre plus rapidement la surface de glissement lorsque celui-ci en est éloigné. De plus, le terme proportionnel allège le travail de la partie discontinue  $\text{sign}(S)$  et permet par conséquent une réduction des commutations sur la commande. Cette loi d'atteinte est donnée par :

$$\dot{s} = -\alpha \cdot \text{sign}(s) - Qs \text{ (IV.16)}$$

Dans la deuxième loi de convergence figure une puissance fractionnaire de la fonction de glissement qui multiplie le signe de celle-ci, comme suit :

$$\dot{s} = -\alpha|s|^\rho \text{sign}(s) \text{ (IV.17)}$$

Où  $\rho$  est un réel strictement compris entre 0 et 1. Il est par ailleurs démontré par Gao et Hung que la loi de convergence engendre un temps d'atteinte fini de la surface de glissement [145]. D'autres approches sont également présentées dans la littérature pour éviter ou réduire le phénomène de chattering, à savoir [146] :

- **Filtres** : grâce à l'utilisation de filtres, le lissage du signal de contrôle est un moyen efficace d'éliminer le chattering. Un filtre passe-bas peut lisser la fonction de commutation et donc éliminer efficacement le chattering et supprimer le bruit haute fréquence.
- **Observateur** : est une autre option pour résoudre le problème de chattering.
- **Mode glissant flou** : la conception de règles floues peut effectivement réduire le chattering dans le contrôle par mode glissant.
- **Mode glissant d'ordre supérieur** : Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le Chattering.

#### **IV.6 Commande par mode de glissement d'ordre supérieur**

Dans la section précédente, nous avons présenté la commande SMC classique qui est limitée par l'exigence de garantir un degré relatif égal à un pour la commande par rapport à la surface de glissement choisie et le phénomène de broutement. Dans le but d'éviter ces problèmes, une nouvelle génération des commandes par mode glissant est proposée dans les dernières années. Cette génération est connue sous le nom de mode glissant d'ordre supérieur (HigherOrderSliding Mode Control HOSMC) . Dans cette approche, la commande discontinue agit sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement. Elle est caractérisée par une grande précision et une grande robustesse par rapport aux techniques classiques de mode glissant tout en conservant les propriétés de convergence en temps fini .

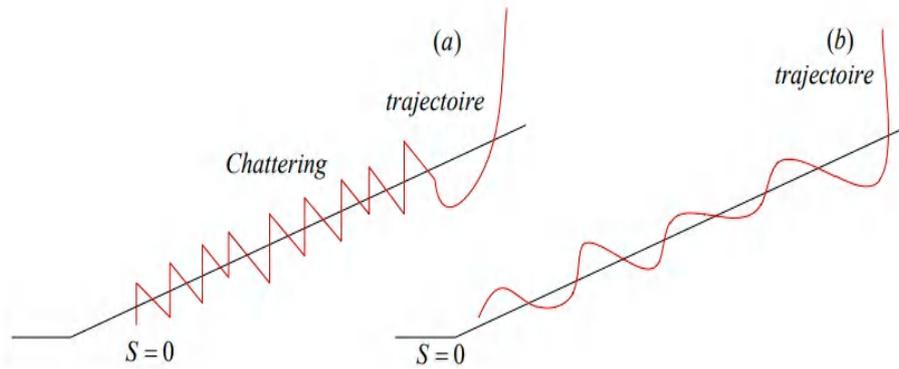


Figure IV.6 : Régime glissant classique (a) et mode glissant d'ordre supérieur (b)

#### IV.6.1 Mode glissant d'ordre deux

Le but de ce type de contrôleurs est de générer un régime glissant du second ordre sur une surface  $\sigma$  par l'annulation de  $S$  elle-même ainsi que de sa dérivée  $\dot{S}$  en un temps fini :  $(S=\dot{S}=0)$ . La caractéristique principale de cette stratégie est que la partie discontinue apparaît sur la dérivée de la commande  $u$ . Finalement lorsque on fait le calcul de la commande du système  $u = \int \dot{u}$ , elle devient continue limitant ainsi le phénomène de réticence [25]. Dans ce qui suit, nous allons décrire ces lois de commande de second ordre ( $r=2$ ), telles que les techniques de Twisting et Super Twisting. Ces algorithmes sont les plus utilisés dans la littérature, du fait qu'ils ont uniquement besoin de la connaissance de la surface  $S$  [148].

Dans la littérature, plusieurs algorithmes modes glissants d'ordre 2 ont été introduits [149]. Parmi ces algorithmes, on cite :

- Algorithme du Twisting.
- Algorithme Sous-Optimal.
- Algorithme du Super Twisting.

##### IV.6.1.1 Algorithme du Twisting :

En plus de la commutation du signe de la commande, on commute son amplitude entre deux valeurs en fonction du quadrant dans lequel se trouve l'état du système. La trajectoire du système dans le plan de phase tourne autour de l'origine en s'en rapprochant à la manière d'une spirale (Figure IV.7).

Son expression pour un système de degré relatif 2 est :

$$u = -r_1 \text{sign}(s) - r_2 \text{sign}(\dot{s}) \quad (\text{IV.18})$$

$r_1$  et  $r_2$  sont des constantes positives réglables, qui doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\begin{cases} r_1 > r_2 > 0 \\ r_1 - r_2 > \frac{C'}{K'_m} \\ K'_m(r_1 + r_2) - C' > K'_M(r_1 - r_2) + C' \end{cases} \quad (\text{IV.19})$$

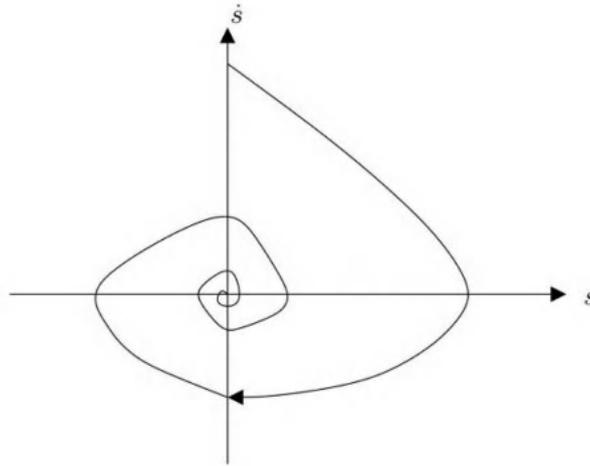


Figure IV.7 : Algorithme du Twisting : plan de phase ( $s, \dot{s}$ )

Où  $C'$ ,  $K'_m$  et  $K'_M$  sont des constantes positives. Plus de détails sur la preuve et la synthèse de la loi de commande peuvent être trouvés dans [150].

L'algorithme du Twisting peut être appliqué aussi sur les systèmes de degré relatif 1 en augmentant le système d'un intégrateur c'est-à-dire en contrôlant  $u$  au lieu de  $\dot{u}$  directement.

#### IV.6.1.2 Algorithme sous-optimal :

L'algorithme sous-optimal est appliqué aux systèmes de degré relatif 1 et 2 par rapport à  $s$  ( $x, t$ ). Cet algorithme est inspiré de la commande optimale de type bang-bang [151]. Il assure la convergence de  $s$  et de  $\dot{s}$  en temps fini vers zéro, en limitant les trajectoires par des arcs paraboliques qui comprennent l'origine (Figure III.8). Dans le cas où le degré relatif de système est égal à 2 par rapport à  $s$  ( $x, t$ ), la loi de commande est définie par :

$$u(t) = -\alpha(t)V_M \text{sign}(s(t) - \frac{1}{2}s_M(t)) \quad (\text{IV.20})$$

Où  $V_M$  est une constante positive réglable et  $s_M$  est défini par :

$$s_M = \begin{cases} s(0) & , 0 < t \leq t_{M1} \\ s(t_{Mi}) & , t_{Mi} < t \leq t_{Mi+1} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{IV.21})$$

Où  $t_{Mi}$  sont les instants où  $\dot{s} = 0$ .

$\alpha(t)$  est défini par :

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha^* & , \text{si } \left[ s(t) - \frac{1}{2}s_M \right] (s_M - s(t)) > 0 \\ 1 & , \text{si } \left[ s(t) - \frac{1}{2}s_M \right] (s_M - s(t)) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{IV.22})$$

où  $\alpha^*$  est une constante positive.

Les conditions suffisantes correspondantes pour la convergence à temps fini sont :

$$\begin{cases} \alpha^* & \in [0,1] \cap (0, \frac{3K'_m}{K'_M}) \\ V_M & = \max(\frac{C'}{\alpha^* K'_m}, \frac{4C'}{3K'_m - \alpha^* K'_M}) \end{cases} \quad (IV.23)$$

Où  $C'$ ,  $K'_m$  et  $K'_M$  sont des constantes positives.

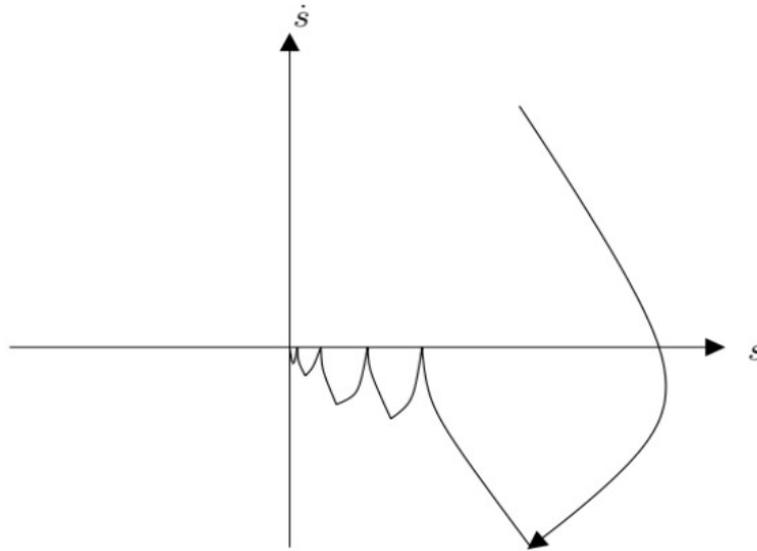


Figure IV.8 : Algorithme sous-optimal : plan de phase  $(s, \dot{s})$ .

L'algorithme sous-optimal peut être aussi proposé pour les systèmes de degré relatif 1 par rapport à la surface de glissement, la loi de commande dans ce cas est donnée par :

$$V(t) = \dot{u} = -\alpha(t)V_M \text{sign}(s(t) - \frac{1}{2}s_M(t)) \quad (IV.24)$$

Pour plus de détails sur la synthèse et la preuve de la convergence de l'algorithme voir [152].

#### **IV.6.1.3 Algorithme du Super Twisting :**

L'algorithme du Super Twisting est l'algorithme le plus utilisé pour la commande par mode glissant d'ordre 2 et a été introduit par Levant en 1993. Cet algorithme peut fournir un contrôle continu en utilisant uniquement les informations sur  $S$  et l'évaluation du signe de  $\dot{S}$  n'est pas nécessaire. La convergence de cet algorithme est également décrite par la rotation autour de l'origine du diagramme de phase  $(S, \dot{S})$ . L'algorithme de super twisting a l'avantage sur les autres algorithmes de ne pas exiger les dérivées temporelles de la variable glissante. La loi de commande du Super-Twisting est formée de deux parties distinctes : la première partie,  $u_1$ , est définie par sa dérivée temporelle, tandis que la seconde partie,  $u_2$ , est une fonction continue et selon la variable glissante [153].

La loi de commande du Super Twisting est donnée par l'équation suivante :

$$u = u_1 + u_2 \quad (IV.25)$$

Avec :

$$\begin{cases} u_1 = -\alpha|S|^\tau \text{sign}(S) \\ \dot{u}_2 = -\beta \text{sign}(S) \end{cases} \tau \in ]0,0.5[ \text{ (IV.26)}$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes positives.

La preuve de la stabilisation et de la convergence du système est présentée dans [154]. Les conditions suffisantes des paramètres du contrôleur, pour assurer la convergence, sont données comme suit:

$$\begin{cases} \beta > \frac{C_0}{K_m} \\ \alpha^2 > \frac{4C_0K_M(\alpha+C_0)}{K_m^2K_m(\alpha-C_0)} \end{cases} \text{ (IV.27)}$$

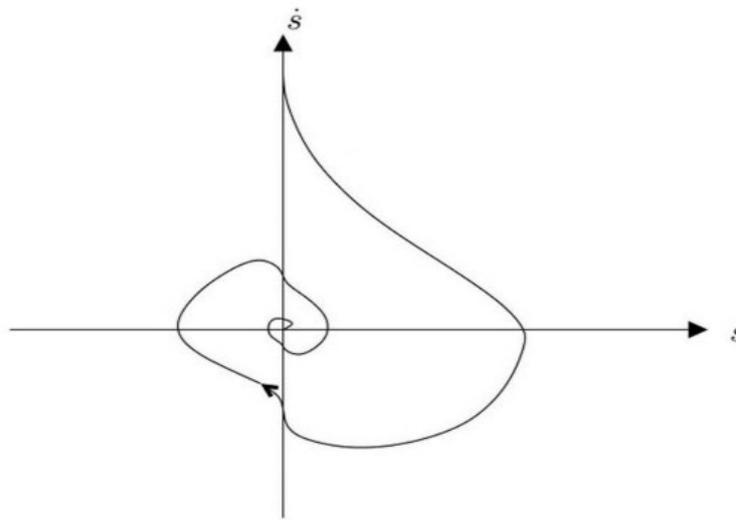


Figure IV.9 : Algorithme du Super Twisting : plan de phase ( $s, \dot{s}$ ).

#### **IV.7 Application de la commande par mode glissant sur le système éolien à base de BDFRG :**

Dans cette partie, nous intéressons à l'application de deux stratégies de commande afin d'améliorer les performances dynamiques du système étudié ; entre autres, la commande par mode glissant du premier ordre et celle du second ordre basé sur l'algorithme du Super Twisting.

##### **IV.7.1 Commande par mode glissant d'ordre un des puissances active et réactive :**

On reprend le modèle des tensions statorique secondaire (Equation (II.64)) :

$$\begin{cases} V_{sd} = -AR_s Q_g - A\sigma L_s \frac{dQ_g}{dt} + eq + ev \\ V_{sq} = AR_s P_g + A\sigma L_s \frac{dP_g}{dt} + ed + e\phi \end{cases} \text{ (IV.28)}$$

Alors, les puissances active et réactive délivrées au réseau électrique peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \dot{P}_g = \frac{V_{sq}}{AL_s\sigma} - \frac{R_s}{L_s\sigma} P_g - \frac{ed}{AL_s\sigma} - \frac{e\varphi}{AL_s\sigma} \\ \dot{Q}_g = \frac{-V_{sd}}{AL_s\sigma} - \frac{R_s}{L_s\sigma} Q_g + \frac{eq}{AL_s\sigma} + \frac{ev}{AL_s\sigma} \end{cases} \quad (IV.29)$$

Ce modèle d'équation possède deux vecteurs de contrôle (Vsd et Vsq), donc nous allons définir deux surfaces de glissement (pour r=1) : la première est réservée à la puissance active (Pg) et la deuxième concerne la puissance réactive (Qg) :

$$\begin{cases} S(P_g) = e(P_g) = P_{g-ref} - P_g \\ S(Q_g) = e(Q_g) = Q_{g-ref} - Q_g \end{cases} \quad (IV.30)$$

En dérivant les surfaces :

$$\begin{cases} \dot{S}(P_g) = \dot{e}(P_g) = \dot{P}_{g-ref} - \dot{P}_g \\ \dot{S}(Q_g) = \dot{e}(Q_g) = \dot{Q}_{g-ref} - \dot{Q}_g \end{cases} \quad (IV.31)$$

En remplaçant les puissances  $\dot{P}_g$  &  $\dot{Q}_g$  par leurs expressions (IV.29) dans l'équation précédente, on trouve :

$$\begin{cases} \dot{S}(P_g) = \dot{e}(P_g) = \dot{P}_{g-ref} - \left( \frac{V_{sq}}{AL_s\sigma} - \frac{R_s}{L_s\sigma} P_g - \frac{ed}{AL_s\sigma} - \frac{e\varphi}{AL_s\sigma} \right) \\ \dot{S}(Q_g) = \dot{e}(Q_g) = \dot{Q}_{g-ref} - \left( \frac{-V_{sd}}{AL_s\sigma} - \frac{R_s}{L_s\sigma} Q_g + \frac{eq}{AL_s\sigma} + \frac{ev}{AL_s\sigma} \right) \end{cases} \quad (IV.32)$$

En remplaçant les tensions Vsq et Vsd par les tensions de commande Vsq=Vsreq+Vsqn et Vsd=Vsdeq+Vsdn dans l'équation (IV.32), on aura :

$$\begin{cases} \dot{S}(P_g) = \dot{P}_{g-ref} - \left( \frac{V_{sreq}+V_{sqn}}{AL_s\sigma} - \frac{R_s}{L_s\sigma} P_g - \frac{ed}{AL_s\sigma} - \frac{e\varphi}{AL_s\sigma} \right) \\ \dot{S}(Q_g) = \dot{Q}_{g-ref} - \left( \frac{-V_{sdeq}+V_{sdn}}{AL_s\sigma} - \frac{R_s}{L_s\sigma} Q_g + \frac{eq}{AL_s\sigma} + \frac{ev}{AL_s\sigma} \right) \end{cases} \quad (IV.33)$$

Durant le mode de glissement, les surfaces sont nulles (S(Pg)= 0 et S(Qg)=0), et par conséquent  $\dot{S}(P_g) = 0$  & ,  $\dot{S}(Q_g) = 0$  & , Vsqn= 0 et Vsdn=0. Donc, les expressions de commandes équivalentes à partir de l'équation (IV.33) s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sq-e} = A\sigma L_s \dot{P}_{g-ref} + AR_s P_g - (ed - e\varphi) \\ V_{sd-} = -A\sigma L_s \dot{Q}_{g-ref} - AR_s Q_g + (eq + ev) \end{cases} \quad (IV.34)$$

En remplaçant les commandes équivalentes par leurs expressions dans (IV.33), on obtient les nouvelles expressions qui expriment les dérivées de surfaces comme suit :

$$\begin{cases} \dot{S}(P_g) = \frac{-1}{A\sigma L_s} V_{sqn} \\ \dot{S}(Q_g) = \frac{1}{A\sigma L_s} V_{sdn} \end{cases} \quad (IV.35)$$

À partir de la condition d'attractivité exprimée par  $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$ , on peut écrire :

$$\begin{cases} \frac{-1}{A\sigma L_s} V_{sqn} S(P_g) < 0 \\ \frac{1}{A\sigma L_s} V_{sdn} S(Q_g) < 0 \end{cases} \quad (IV.36)$$

Afin de satisfaire ces conditions, le signe de  $V_{sqn}$  et  $V_{sdn}$  doit être opposé à celui de  $\frac{-1}{A\sigma L_s} S(P_g)$  et  $\frac{1}{A\sigma L_s} S(Q_g)$  respectivement. Donc on peut adopter la commande d'un relais ayant la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sqn} = -k_1 \text{sgn}\left(\frac{-1}{A\sigma L_s} S(P_g)\right) \\ V_{sdn} = -k_2 \text{sgn}\left(\frac{1}{A\sigma L_s} S(Q_g)\right) \end{cases} \quad (IV.37)$$

Les expressions globales des vecteurs de contrôle des puissances active et réactive envoyées au réseau électrique sont données finalement par l'équation suivante :

$$\begin{cases} V_{sq} = A\sigma L_s \dot{P}_{g-ref} + AR_s P_g - (ed - e\phi) - k_1 \text{sgn}\left(\frac{-1}{A\sigma L_s} S(P_g)\right) \\ V_{sd} = -A\sigma L_s \dot{Q}_{g-ref} - AR_s Q_g + (eq + ev) - k_2 \text{sgn}\left(\frac{1}{A\sigma L_s} S(Q_g)\right) \end{cases} \quad (IV.38)$$

Les commandes globales en mode glissant du système sont illustrées sur la figure (IV.10).

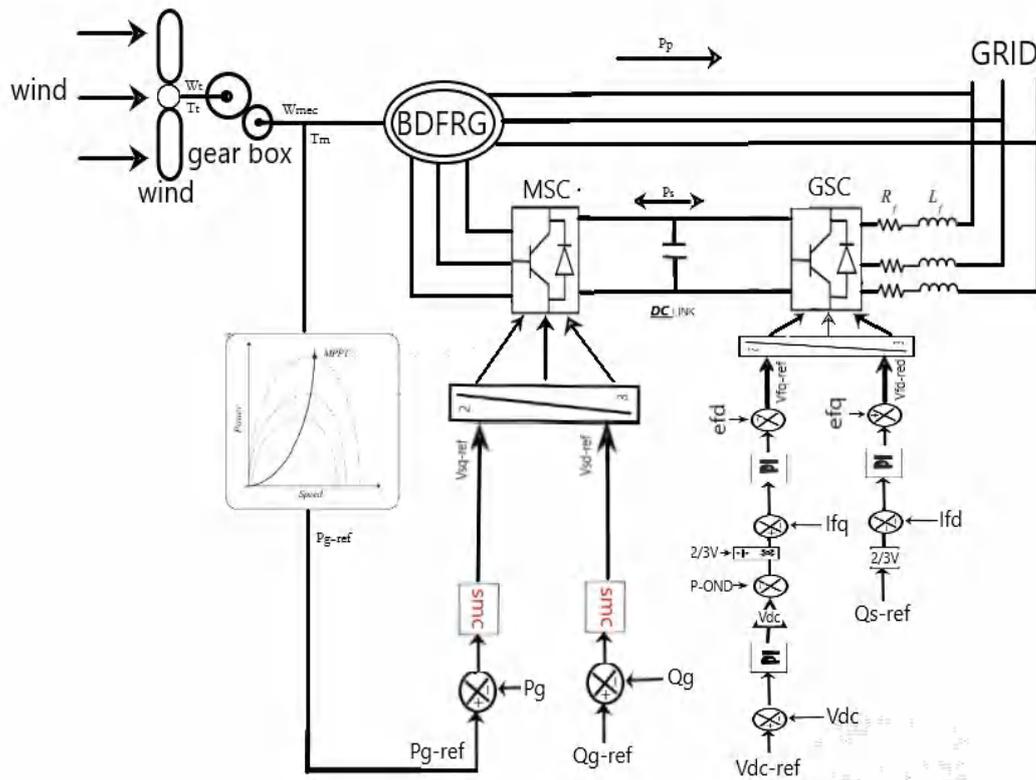


Figure IV.10 Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.

#### IV.7.2 Commande par mode glissant du second ordre des puissances active et réactive :

La stratégie de commande proposée est basée sur l'algorithme du Super Twisting. Dans ce cadre, nous considérons les surfaces de glissement suivantes :

$$\begin{cases} S(P_g) = e(P_g) = P_{g-ref} - P_g \\ S(Q_g) = e(Q_g) = Q_{g-ref} - Q_g \end{cases} \quad (IV.39)$$

La loi de commande Super Twisting est comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = u_2 + \alpha_1 |S(Q_g)|^\tau \text{sign}(S(Q_g)) \\ \dot{u}_2 = \beta_1 \text{sign}(S(Q_g)) \\ V_{sq} = w_2 + \alpha_2 |S(P_g)|^\tau \text{sign}(S(P_g)) \\ \dot{w}_2 = \beta_2 \text{sign}(S(P_g)) \\ \tau \in ]0,0.5[ \end{cases} \quad (IV.40)$$

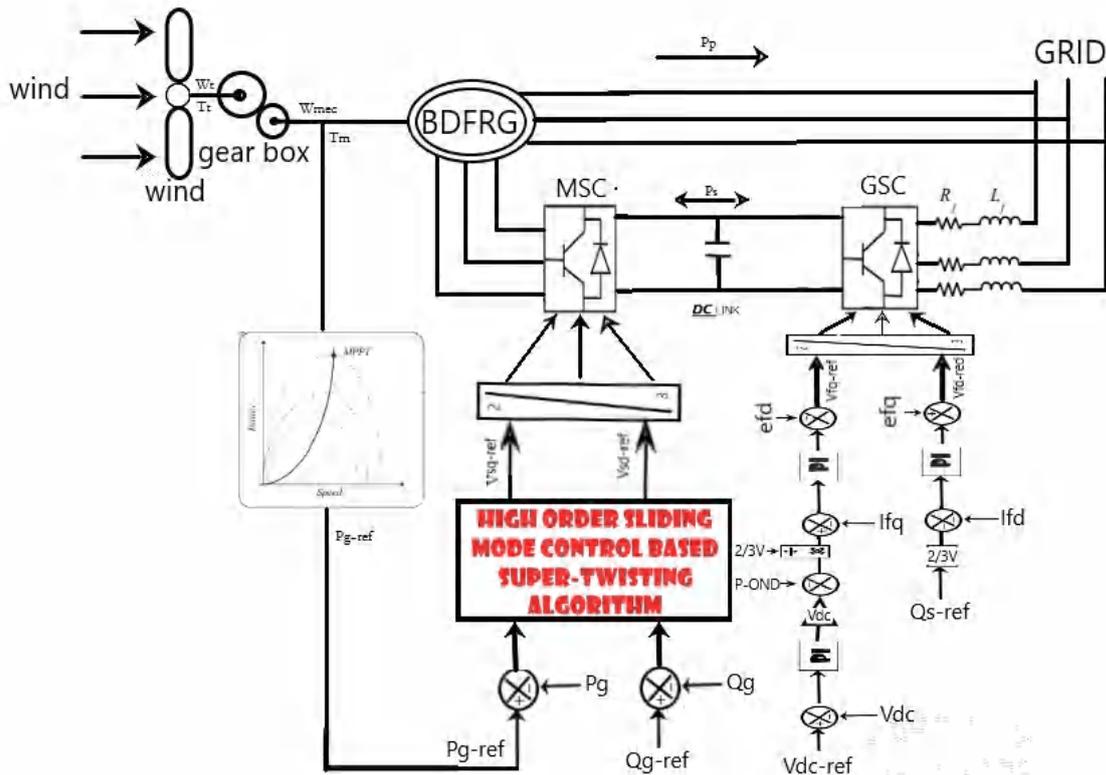


Figure IV.11 Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant d'ordre deux.

La figure (IV.11) présente le schéma de principe général de la commande par mode glissant d'ordre deux.

#### IV.8 Résultats de simulation :

Afin d'évaluer les performances de la commande par mode glissant du premier ordre et du second ordre appliquées au système éolien à base de la machine BDFRM, un ensemble de simulation a été effectué dans les mêmes conditions que celles utilisées dans le chapitre précédent.

Le système éolien proposé (Figure (IV.10 et 11)) a été implémenté et simulé sous Matlab/Simulink.

IV.8.1 Résultats de simulation du système par la commande par mode glissant d'ordre un :

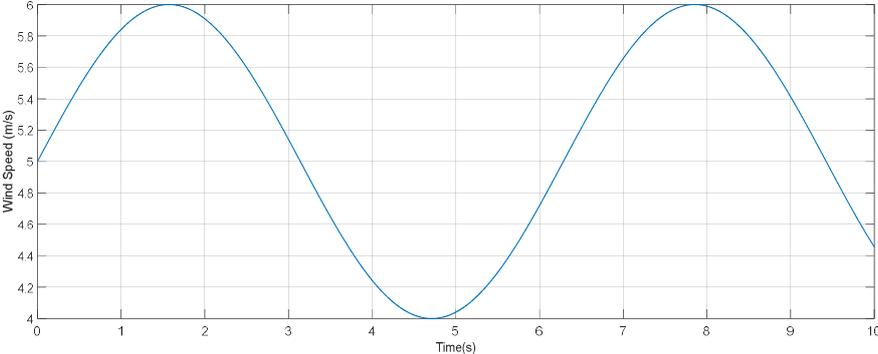


Figure IV.12 Variation de la vitesse du vent

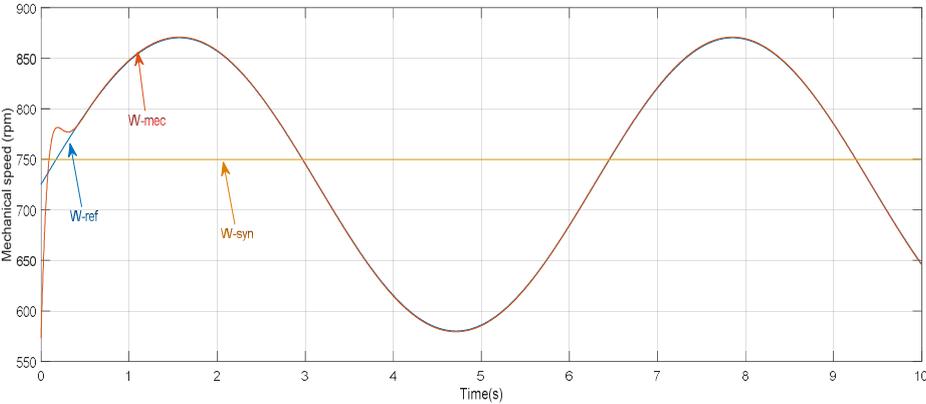
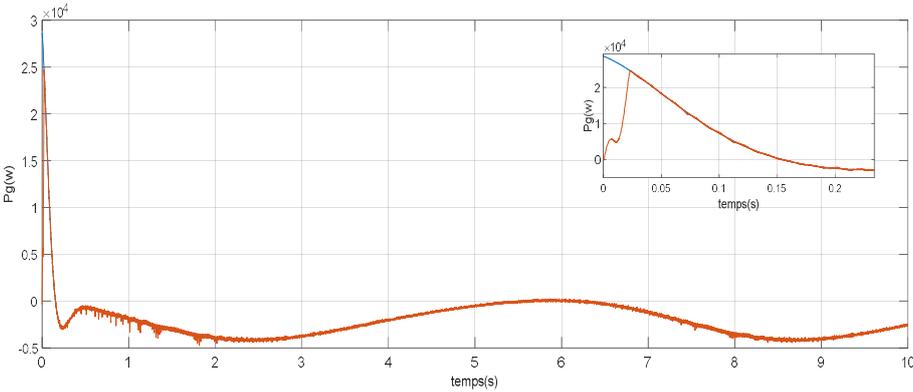


Figure IV.13 Vitesse mécanique de la BDFRM



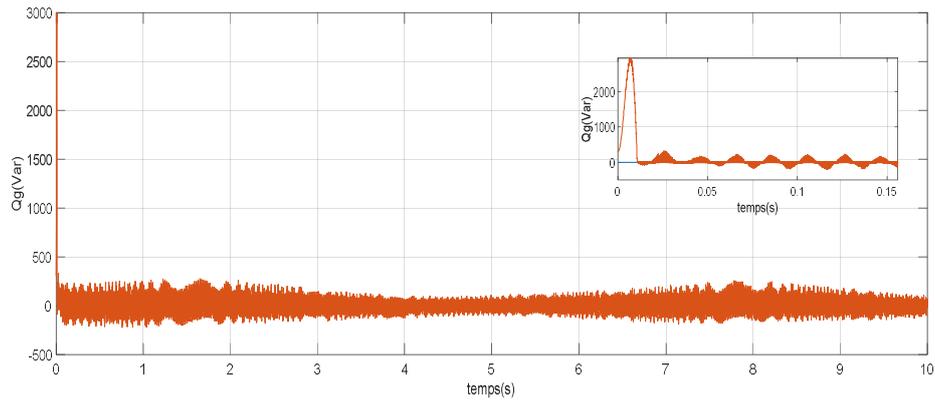


Figure IV.14 Puissances active et réactive envoyées au réseau électrique

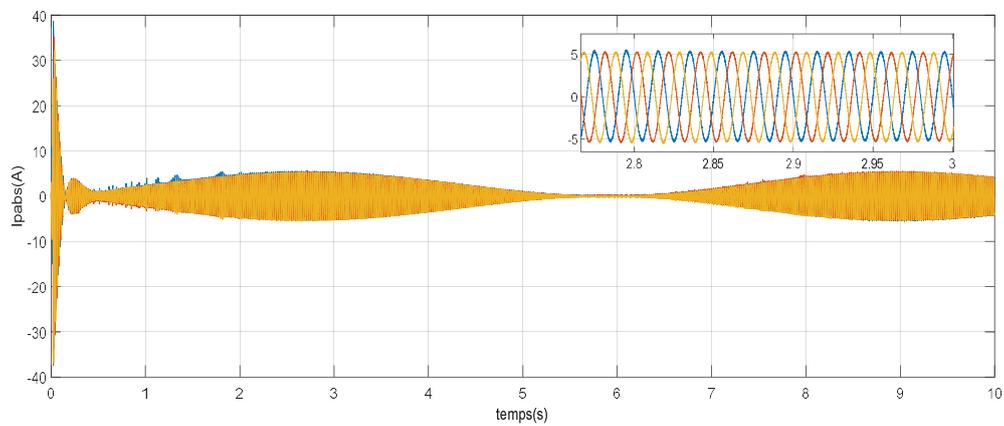


Figure IV.15 Courants statoriques primaire

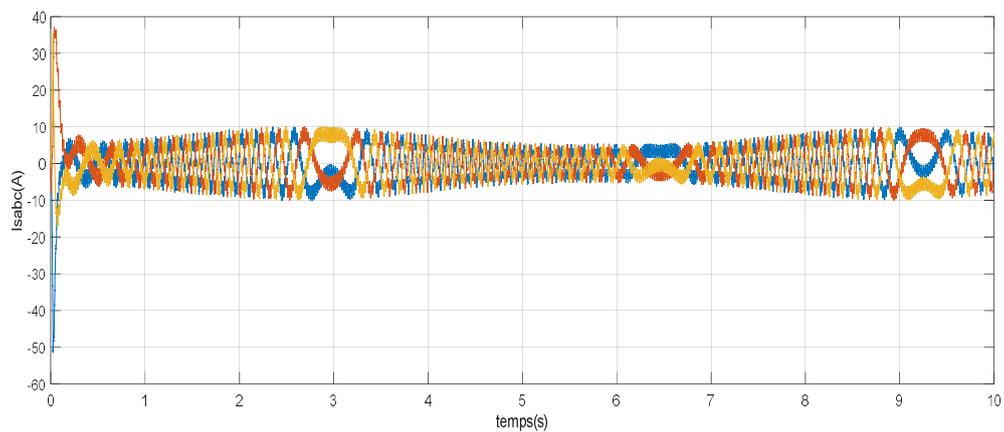


Figure IV.16 Courants statoriques secondaire

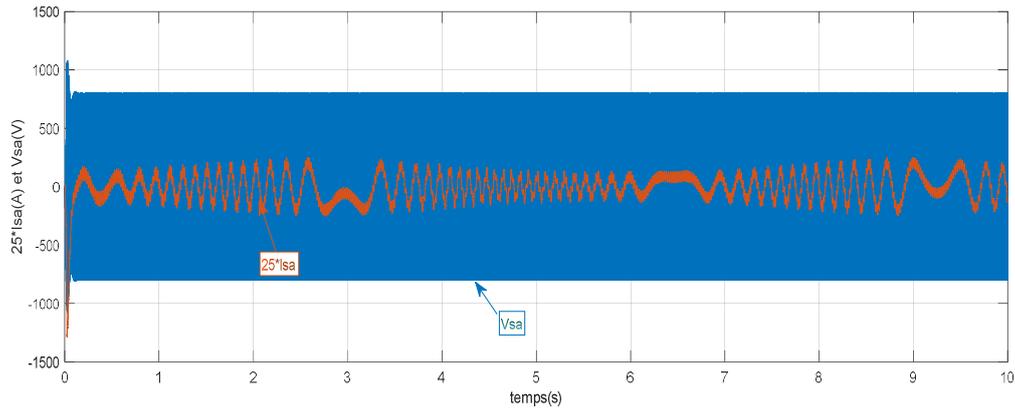


Figure IV.17 Tension et courant statorique du bobinage de commande d'une seule phase.

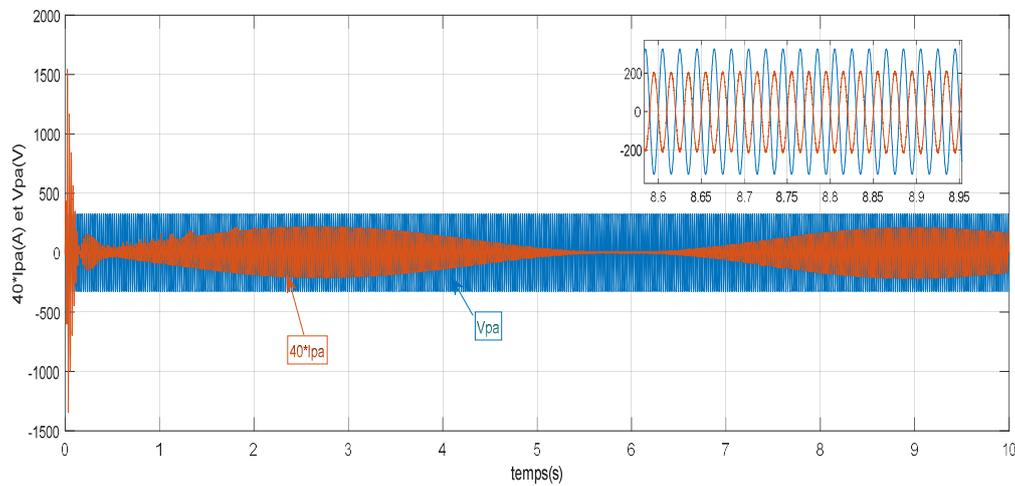
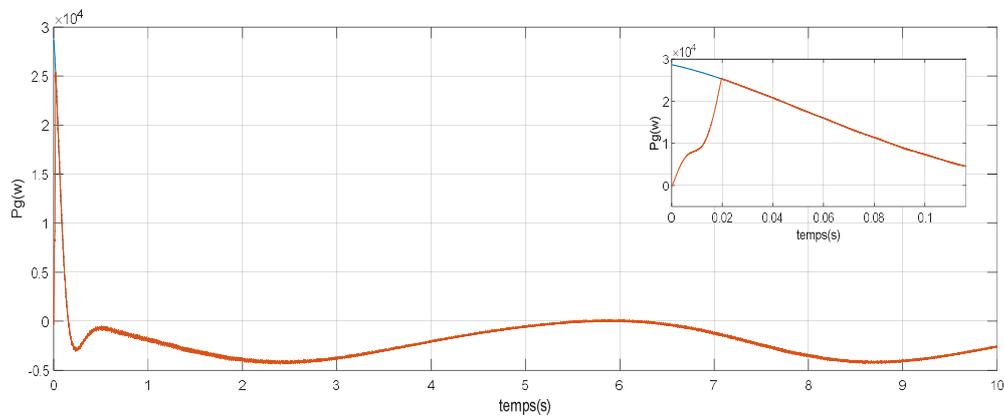


Figure IV.18 Tension et courant statorique du bobinage de puissance d'une seule phase

#### IV.8.2 Résultats de simulation du système par la commande mode glissant d'ordre deux :



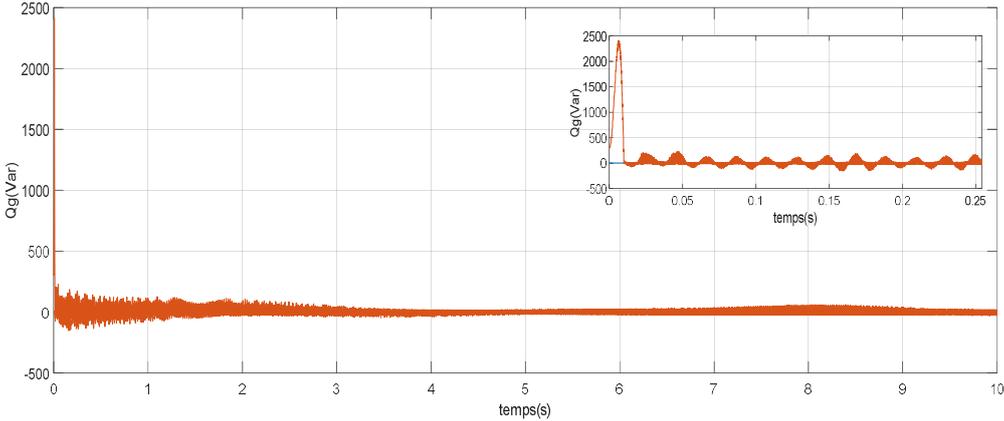


Figure IV.19 Puissances active et réactive envoyées au réseau électrique

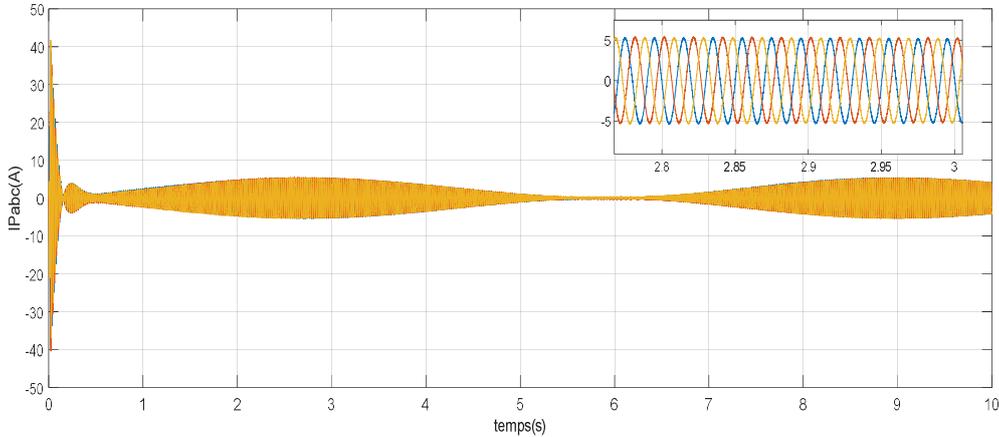


Figure IV.20 Courants statoriques primaire

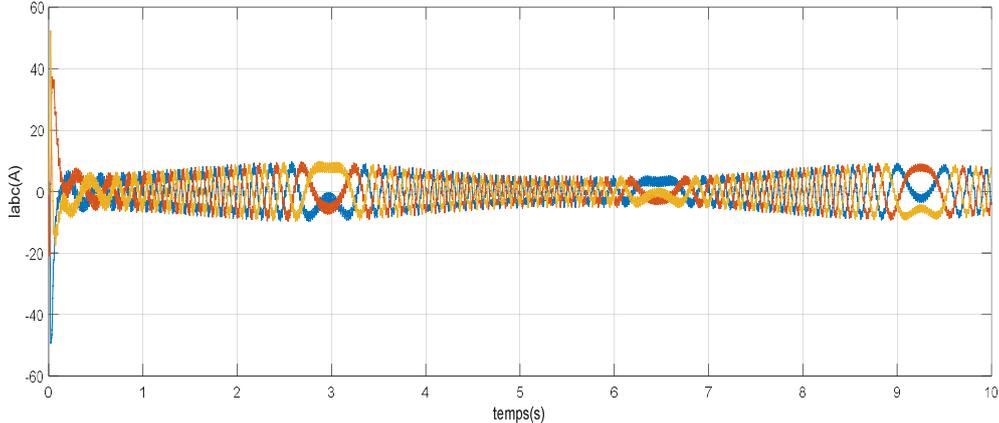


Figure IV.21 Courants statoriques secondaire

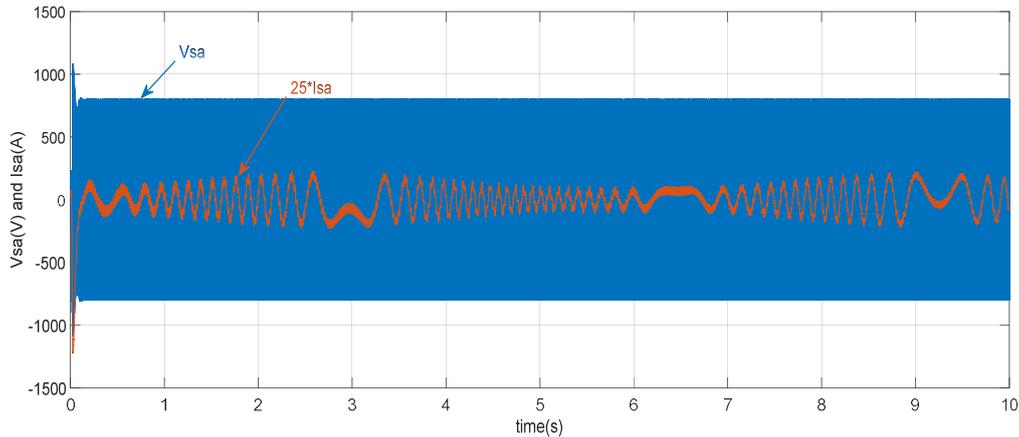


Figure IV.22 Tension et courant statorique du bobinage de commande d'une seule phase.

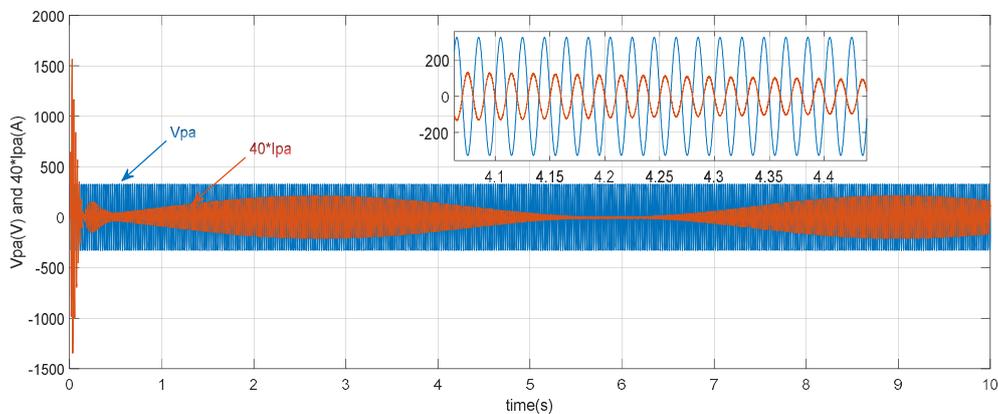


Figure IV.23 Tension et courant statorique du bobinage de puissance d'une seule phase

En se basant sur les résultats de simulations obtenus, il nous est apparu nécessaire de procéder à une comparaison globale entre les deux stratégies de commande.

Les différentes performances de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne proposée (Figure IV.10 et 11) ont été obtenues grâce à une application d'un profil du vent (Figure IV.12).

Les Figures (IV.19) et (IV.14) montrent que les deux stratégies de commande assurent un découplage entre les deux puissances statoriques (actif et réactif).

Les résultats obtenus montrent également que l'utilisation des deux commandes permet de maintenir les puissances active et réactive aux valeurs recherchées, de même qu'un bon suivi de consigne avec une rapidité et précision remarquable, tout en observant l'apparition du phénomène de chattering (Figure (IV.14)). Par ailleurs, nous remarquons que les résultats de la technique de commande par mode glissant d'ordre deux (HOSMC) sont plus performants que ceux de la commande par mode glissant d'ordre un. Nous voyons également en cas de

décalage de référence que le HOSMC ne dispose d'aucun dépassement des deux puissances active et réactive lors du phénomène transitoire.

Les figures (IV.23) et (IV.18) illustrent la tension et le courant de la première phase statorique du bobinage de puissance et le déphasage entre eux, ce qui traduit la production de l'énergie électrique sous un facteur de puissance unitaire. Le facteur de puissance unitaire est assuré par le contrôleur proposé.

Les figures (IV.15), (IV.16), (IV.17), (IV.20), (IV.21) et (IV.22) présentent les courants de bobinage dans lesquels nous constatons que la fréquence et l'amplitude de ces courants de commande changent pendant la période de variation des puissances active et réactive. D'autre part, la fréquence du courant de bobinage de puissance reste constante pour être adaptée à la fréquence d'alimentation du réseau. Ainsi, lorsque la référence de la puissance active change, l'amplitude du courant change également.

#### **IV.9 Conclusion :**

Ce chapitre a pour objectif de présenter les deux stratégies de commande par mode glissant de premier et de second ordre à un système éolien à vitesse variable basé sur la machine BDFRM pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive générées.

En premier lieu, nous avons présenté l'aspect théorique de la commande par mode glissant d'ordre un à savoir : sa définition, son principe de commande, et sa conception (choix de la surface de commutation et la loi de commande). Par la suite, on a présenté l'approche au moyen de laquelle on peut réduire le phénomène de chattering qui résulte de la loi de commande. La stratégie de commande par mode glissant de second ordre proposé est basée sur un algorithme Super-Twisting. L'application de ces commandes à flux orienté sur le système a permis de régler indépendamment les puissances produites par la machine BDFRM. Les résultats de simulation numérique obtenus lors de l'application de ces deux commandes sur le système entraîné avec une vitesse variable ont démontré leur efficacité respective. Nous avons observé que la technique du mode glissant d'ordre deux produit de meilleurs résultats et une performance supérieure par rapport au mode glissant d'ordre un, en termes de dépassement, de temps de réponse et de précision de poursuite. En plus de ces avantages, cette technique assure à l'utilisateur de la BDFRM une robustesse et une fiabilité élevées, ainsi qu'une insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.



# Conclusion générale

Dans le contexte mondial pour réduire l'émission de gaz à effet de serre et l'échauffement de la planète, le besoin de l'énergie renouvelable est indispensable.

L'objectif de cette thèse est de concevoir une chaîne de conversion de l'énergie éolienne qui atteint un équilibre optimal entre le coût, le rendement énergétique, les performances du système et la qualité de l'énergie injectée dans le réseau électrique. Au début, nous avons fait l'analyse des systèmes de production basés sur l'énergie éolienne est au cœur de cette thèse. Dans ce contexte, le premier chapitre présente un état de l'art de ces systèmes. Il débute par un rappel des notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion, suivi d'une description des différents types d'éoliennes et de leurs modes de fonctionnement. Ensuite, une présentation des machines électriques adaptées aux systèmes éoliens et de leurs convertisseurs associés est réalisée. Deux grandes familles de machines sont ainsi abordées : les machines asynchrones, les machines synchrones.

On a conclu que Le dispositif du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais à réluctance (BDFRM) partage tous les avantages des machines doublement alimentées - la flexibilité du mode de fonctionnement, la plus grande liberté de contrôle et la possibilité de fonctionner à des vitesses sub-synchrones et super-synchrones dans les deux régimes de motorisation et de génération, la BDFRM est considérée comme une machine de 3<sup>ème</sup> génération dans les systèmes éoliens.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit deux parties essentielles la première partie nous avons présentée la modélisation de la machine BDFRM qui peut fonctionner en générateur et en moteur. Dans la deuxième partie, nous avons également abordé la modélisation et la commande vectorielle indirecte de la machine. De plus, en contrôlant les tensions du stator secondaire, nous avons pu réguler indépendamment la puissance active et réactive fournie au réseau électrique par la machine BDFRM en mode générateur, ainsi que la vitesse et la puissance réactive du stator de la machine en mode moteur.

Et dans le troisième chapitre, nous avons présenté les modèles, de la turbine éolienne, de la machine asynchrone double alimentation sans balais à réluctance avec l'orientation du flux statorique primaire pilotée par un convertisseur back to back MLI. Nous avons présenté également la stratégie de commande MPPT qui permet d'extraire le maximum de puissance du vent. Ensuite, la commande vectorielle appliquée à la BDFRM a été bien développée. Les résultats de simulation obtenus du générateur éolien prouvent les performances de la

## *Conclusion Générale*

commande MPPT. Ils montrent aussi l'efficacité de la commande indépendante des puissances active et réactive envoyées au réseau électrique.

Le quatrième et dernier chapitre vise à introduire deux stratégies de commande par mode glissant de premier et de second ordre pour un système éolien à vitesse variable utilisant la machine BDFRM. L'objectif est de permettre un contrôle indépendant des puissances active et réactive générées. Nous avons d'abord exposé la théorie de la commande par mode glissant d'ordre un. Ensuite, nous avons présenté une approche visant à réduire le phénomène de chattering induit par la loi de commande. La stratégie de commande par mode glissant d'ordre deux proposée repose sur l'utilisation d'un algorithme Super-Twisting.

Les méthodes de commande non linéaires examinées dans cette étude ont démontré des performances élevées dans le contrôle du système de conversion d'énergie éolienne. Les résultats de simulation ont confirmé l'efficacité et la robustesse de chaque méthode en termes de suivi, de fonctionnement à facteur de puissance unitaire, de découplage, de temps de réponse et de qualité du courant.

## Références

- [1] P. Rault, "Dynamic modeling and control of multi-terminal HVDC grids," Thèse de Doctorat, École Centrale de Lille, Mars 2014
- [2] A. Mirecki, "Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [3] B. Bhandari, K.-T. Lee, G.-Y. Lee, Y.-M. Cho, et S.-H. Ahn, "Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 2, no 1, p. 99–112, 2015.
- [4] H. Louie and K. Strunz, "Energy market-integrative wind plant modeling for wind plant integration economic analysis," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-8
- [5] SAMI, KAHLA. *Modélisation et commande d'un système éolienne*. 2018. Thèse de doctorat. Université 8 mai 1945 de Guelma.
- [6] Kerboua, Abdelfettah, and Mohamed ABID. "Régulation des puissances d'une éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau électrique." *UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Algerie* (2013).
- [7] BELTRAN, Brice. *Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur*. 2010. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale-Brest.
- [8] L. Xu, Y. Tang, and L. Ye. Comparison study of rotor structures of doubly excited brushless reluctance machine by finite element analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(1):165–172, Mar 1994.
- [9] A.R.W Broadway. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, 118(11):1593–1600, November 1971.
- [10] A. K. Wallace, R. Spee, and G. C. Alexander. The brushless doubly-fed machine: its advantages, applications and design methods. In *Electrical Machines and Drives*, 1993. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 376), pages 511–517, Sep 1993.
- [11] L. Haiyan, K. Yanli, F. Chuanglin, and L. Maoxun, "Wind energy resources exploitation and large-scale, non-grid-connection wind-powered industrial bases, construction in China Northwest Territories," in *World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*, 2009. WNWEC 2009, 2009, pp. 1-5
- [12] E. Lerch, "Storage of fluctuating wind energy," in *Power Electronics and Applications*, 2007 European Conference on, 2007, pp. 1-8.
- [13] S. White, "Germany scraps nuclear power after Fukushima disaster," in *Daily Mirror*, 2011.
- [14] Hasan, M. S. (2014). *Control of Brushless Doubly-Fed Reluctance Machines under Normal and Faulty Operating Conditions*. University of Northumbria at Newcastle (United Kingdom).
- [15] H. Louie and K. Strunz, "Energy market-integrative wind plant modeling for wind plant integration economic analysis," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-8
- [16] MIRECKI, Adam. *Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*. 2005. Thèse de doctorat.
- [17] LE DOEUFF, Pr René. "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne." (2003).
- [18] Kheirallah, Mohamed, and Ouled Ali. *ETUDE D'UN SYSTEME EOLIEN INJECTE SUR LE RESEAU DE TRANSPORT DE L'ELECTRICITE*. Diss. Université Ahmed Draïa-Adrar, 2014.

## Références

- [19] MIDA, Dris. *Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Electrique Hybride «Éolien-Photovoltaïque»*. 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [20] SAULNIER, Bernard et REID, Réal. *L'éolien au coeur de l'incontournable révolution énergétique*. Éditions MultiMondes, 2011.
- [21] <https://wwindea.org/world-market-for-wind-power-saw-another-record-year-in-2021-973-gigawatt-of-new-capacity-added/>
- [22] Wagner, Hermann-Josef, and Jyotirmay Mathur. "Wind Energy Today." *Introduction to Wind Energy Systems*. Springer, Cham, 2018. 1-6.
- [23] Hau, Erich. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] LARABI, Abdelkader. *Conception de la commande d'une machine asynchrone destinée à l'énergie renouvelable*. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf d'Oran.
- [25] MANWELL, James F., MCGOWAN, Jon G., et ROGERS, Anthony L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons, 2010.
- [26] PARASCHIVOIU, Ion. *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*. Presses inter Polytechnique, 2002.
- [27] E. Hau. *Wind turbines*. 2nd Edition Springer, 2006
- [28] MOURAD, Loucif. *Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur*. 2016. Thèse de doctorat. Ph. D. thesis, Université Aboubakr Belkaid–Tlemcen–Faculté de Technologie.
- [29] SIDDO, A. Moussa et NOUHOU, I. Soumana. Étude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. *Mémoire de fin étude d'ingénieur en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach*, 2007.
- [30] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines ", Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.
- [31] DIF, Sofiane. *Conception et modélisation par éléments finis d'une pâle d'éolienne à axe horizontal*. 2013. Thèse de doctorat.
- [32] HANSEN, Anca D. et HANSEN, Lars H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995–2004). *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 2007, vol. 10, no 1, p. 81-97.
- [33] Bose BK (2001) *Modern power electronics and AC drives*. Prentice–Hall, Englewood Cliffs, NJ, U.S.A
- [34] Ackerman T (ed.) (2005) *Wind power in power systems*. John Wiley & Sons, Chichester, U.K
- [35] Iov F (2003) *Contributions to modelling, analysis and simulation of AC drive systems. Application to large wind turbines*. Ph.D. Thesis, "Dunărea de Jos" University of Galați, Galați, Romania
- [36] MUNTEANU, Iulian, BRATCU, Antoneta Iuliana, CEANGĂ, Emil, et al. *Optimal control of wind energy systems: towards a global approach*. London : Springer, 2008.
- [37] CAMBLONG, Haritza. *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*. 2003. Thèse de doctorat. Paris, ENSAM.
- [38] Rekioua, Djamila. "Wind power electric systems." *Green Energy and Technology* (2014).
- [39] POITIERS, F. *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne* english version: "Study and control of asynchronous generators for wind energy utilization". 2003. Thèse de doctorat. Doctorat thesis, Nante University, France.
- [40] Idjdarene K (2010) *Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes*. PhD, University of Bejaia-USTL de Lille

## Références

- [41] A. Abdelli, "Optimisation Multicritères d'une chaîne éolienne passive", Thèse de Doctorat en Electrotechniques, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007
- [42] MAZOUZ, FARIDA. *Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents*. 2013. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [43] TOUAL, Belkacem. *Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable*. 2010. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [44] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2006.
- [45] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.
- [46] ROUABHI, Riyadh. *Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée*. 2016. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [47] Errami, Y.; Maaroufi, M.; Ouassaid, M, « Variable Structure Direct Torque Control and grid connected for wind energy conversion system based on the PMSG ». Complex Systems (ICCS), 2012 International Conference on, vol., no., pp.1,6, 5-6 Nov. 2012
- [48] BOUMASSATA, Abderraouf. « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion Eolienne ». Thèse de doctorat. 2016.
- [49] MASSOUM, Sarra, *et al.* *Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation*. 2018. Thèse de doctorat.
- [50] D. Aguglia, "Conception Globale des générateurs asynchrones à double alimentation pour éoliennes"; Thèse Doctorale en Génie Electrique, Université Laval, Québec, Canada, Décembre 2010.
- [51] H. Li, et Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons", IET Renewable Power Generation, vol. 2, no 2, p. 123-138, 2008.
- [52] Xu, Longya et Cheng, Wei, "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme", Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 31, no 3, p. 636-642, 1995
- [53] HASSAD, Mohamed Amine. *Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques*. 2016. Thèse de doctorat.
- [54] MOUALDIA, Abdelhafidh. POLYCOPIE DE COURS DES AÉROGÉNÉRATEURS.
- [55] Cheng, Ming, Rensong Luo, and Xinchu Wei. "Design and analysis of current control methods for brushless doubly fed induction machines." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66.1 (2018): 717-727.
- [56] Han, Peng, et al. "Analytical analysis and performance characterization of brushless doubly fed induction machines based on general air-gap field modulation theory." *Chinese Journal of Electrical Engineering* 7.3 (2021): 4-19.
- [57] BETZ, Robert E., and M. G. Jovanović. "Introduction to the space vector modeling of the brushless doubly fed reluctance machine." *Electric Power Components and Systems* 31.8 (2003): 729-755.
- [58] Liangzhou, Ji, and Yang Xiangyu. "Optimization design on salient pole rotor of BDFRM using the Taguchi method." *2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*. IEEE, 2011.
- [59] Khaliq, Salman, et al. "Rotor pole optimization of novel axial-flux brushless doubly fed reluctance machine for torque enhancement." *IEEE Transactions on Magnetics* 52.7 (2016): 1-4.
- [60] P.E. VIDAL « Commande non linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation » Thèse de doctorat, INP de TOULOUSE, 2004

## Références

- [61] F. J. POZA LOBO « Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable » These de Doctorant. Ins Nat. Poly Grenoble. 2003.
- [62] RAHAB, Abderrezak et BENALLA, Hocine. *Stratégies de commande des convertisseurs statiques dédiés à une production décentralisée de type éolien*. Thèse de doctorat. جامعة الإخوة منتوري قسنطينة.
- [63] MAHBOUB, Mohamed-abdelbasset. *Modélisation et commande d'un système éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais*. 2018. Thèse de doctorat.
- [64] A.R.W Broadway. Cageless induction machine. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 118(11):1593-1600, November 1971.
- [65] L. Xu, Y. Tang, and L. Ye. Comparison study of rotor structures of doubly excited brushless reluctance machine by finite element analysis. IEEE Transactions on Energy Conversion, 9(1):165-172, Mar 1994.
- [66] M. Jovanovic, 2005, juin. Control of Brushless Doubly-Fed Reluctance Motors . in Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, (pp. 1667-1672).
- [67] S. Ademi et M. G. Jovanović, 2015, janv. Vector Control Methods for Brushless Doubly Fed Reluctance Machines .IEEE Transactions on Industrial Electronics (pp. 96-104).
- [68] M. G. Jovanovic et R. E. Betz, 2000. Power factor control using brushless doubly fed reluctance machines. in Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129), Rome, Italy (p. 523-530).
- [69] M. G. Jovanovic, R. E. Betz, et Jian Yu, 2002, nov. The use of doubly fed reluctance machines for large pumps and wind turbines. IEEE Transactions on Industry Applications (pp. 1508-1516)
- [70] M. R. Altimania, "Modeling of doubly-fed induction generators connected to distribution system based on eMEGASim® real-time digital simulator", 2014
- [71] H. S. Kim et D. D.-C. Lu, "Review on wind turbine generators and power electronic converters with the grid-connection issues", in Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian, 2010, p. 1–6.
- [72] CHEN, Zhe, GUERRERO, Josep M., et BLAABJERG, Frede. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Transactions on power electronics*, 2009, vol. 24, no 8, p. 1859-1875.
- [73] MICHALKE, Gabriele et HANSEN, Anca D. Modelling and control of variable speed wind turbines for power system studies. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 2010, vol. 13, no 4, p. 307-322.
- [74] Altın, Müfit, et al. "Overview of recent grid codes for wind power integration." *2010 12th international conference on optimization of electrical and electronic equipment*. IEEE, 2010.
- [75] Muller, Set, M. Deicke, and Rik W. De Doncker. "Doubly fed induction generator systems for wind turbines." *IEEE Industry applications magazine* 8.3 (2002): 26-33.
- [76] Erickson, Robert W., and Dragan Maksimovic. *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [77] Letcher, Trevor M. *Wind energy engineering: A handbook for onshore and offshore wind turbines*. Academic Press, 2017.
- [78] L. Xu, Y. Tang, and L. Ye. Comparison study of rotor structures of doubly excited brushless reluctance machine by finite element analysis. IEEE Transactions on Energy Conversion, 9(1):165–172, Mar 1994.
- [79] A.R.W Broadway. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 118(11):1593–1600, November 1971.

## Références

- [80] A. K. Wallace, R. Spee, and G. C. Alexander. The brushless doubly-fed machine: its advantages, applications and design methods. In *Electrical Machines and Drives*, 1993. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 376), pages 511–517, Sep 1993.
- [81] BETZ, Robert E. et JOVANOVIĆ, M. G. Introduction to the space vector modeling of the brushless doubly fed reluctance machine. *Electric Power Components and Systems*, 2003, vol. 31, no 8, p. 729-755.
- [82] STAUDT, Tiago. *Brushless doubly-fed reluctance machine modeling, design and optimization*. 2015. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes (ComUE).
- [83] MOUSSAOUI TAHA YACINE «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de fin étude en génie électrique, Université d'EL-Oued, 09 sept 2015.
- [84] HAMZA, Mr MESAI AHMED, KAIS, Mr NADIR, et EN ELECTROTECHNIQUE, Master. Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle.
- [85] MOUSSA, Oussama. *Contribution au contrôle d'un système éolien basé sur une MADA sans balais*. 2020. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [86] KERDOUN, Djallel et BOUMASSATA, Abderraouf. Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne. 2017.
- [87] IBRAHIM, Ahmed K., MAREI, Mostafa I., et EL-GOHAREY, H. S. Transient Model of Brushless Doubly Fed Reluctance Machine using ABC Reference Frame. *Int. J. Recent Trends Eng. Res*, 2018, vol. 4, p. 26-32.
- [88] CHAAL, Hamza et JOVANOVIĆ, Milutin. Flux observer algorithms for direct torque control of brushless doubly-fed reluctance machines. In : *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. IEEE, 2009. p. 4440-4445.
- [89] BETZ, R. et JOVANOVIĆ, Milutin. Introduction to brushless doubly fed reluctance machines-the basic equations. *Aalborg University: Aalborg, Denmark*, 1998.
- [90] M. Pinard, « Commande électronique des moteurs électriques ». DUNOD, Série EEA, 2004.
- [91] F. Merrahi, « Alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) », Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [92] ROUMMANI, Kheira. *Modélisation et commande par mode glissant flou d'un système éolien à base d'un aérogénérateur*. 2013. Thèse de doctorat. Ecole nationale polytechnique d'Oran-Maurice Audin.
- [93] OUALAH, O., KERDOUN, Djallel, et BOUMASSATA, Abderraouf. Comparative study between sliding mode control and the vector control of a brushless doubly fed reluctance generator based on wind energy conversion systems. *Электротехника и электромеханика*, 2022, no 1 (eng), p. 51-58.
- [94] ELBIA, Y. Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté. Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [95] ZIDANI, Mohamed Yazid. *Contribution à la commande d'un MADA Apport des techniques de l'intelligence artificielle*. 2019. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [96] YOUB, LAMIA et CRĂCIUNESCU, AURELIAN. Commande directe du couple et commande vectorielle de la machine asynchrone. *Rev. Roum. Sci. Techn.–Électrotechn. et Énerg.*, 2008, vol. 53, no 1, p. 87-98.
- [97] LAHMAR, Badis. Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents. 2017.
- [98] S. Kunte, M. Bhawalkar, N. Gopalakrishnan, et Y. P. Nerkar, 2016, sept. Brushless doubly fed reluctance machine and its control. in 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT).

## Références

- [99] D. Casadei, F. Filippetti, C. Rossi, A. Stefani, A. Yazidi, and G. Andre Capolino, "Diagnostic Technique Based on Rotor Modulating Signals Signature Analysis for Doubly Fed Induction Machines in Wind Generator Systems ", IEEE, pp. 1525-1532, 2006
- [100] MIMOUNE, Souaad et DILMI, Thami. *Implémentation de la commande vectorielle (à flux orienté) sans capteur d'un moteur sans balais (BLDC) sur le processeur TMS320F2802F*. 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila.
- [101] N. Taib, Nabil, B. Metidji, et T. Rekioua, "Performance and efficiency control enhancement of wind power generation system based on DFIG using three-level sparse matrix converter", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 53, p. 287-296, 2013.
- [102] REDOUANE, Meziane et NADIR, Ouerdi. *Etude et commande de la machine asynchrone*. 2008. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [103] EL AIMANI, Salma. *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [104] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'école centrale de Lille (ECL) , 2005
- [105] SINGH, Bhim, SINGH, B. P., et DWIVEDI, S. A state of art on different configurations of permanent magnet brushless machines. *JOURNAL-INSTITUTION OF ENGINEERS INDIA PART EL ELECTRICAL ENGINEERING DIVISION*, 2006, vol. 87, p. 63.
- [106] BELTRAN, Brice, AHMED-ALI, Tarek, et BENBOUZID, Mohamed El Hachemi. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on energy conversion*, 2008, vol. 23, no 2, p. 551-558.
- [107] GUENOUNE, Ibrahim. *Commandes non linéaires robustes de systèmes éoliens*. 2018. Thèse de doctorat. École centrale de Nantes; Université Abou BekrBelkaid (Tlemcen, Algérie).
- [108] H. Shariatpanah, R. Fadaeinedjad, and M. Rashidinejad, "A new model for pmsgbased wind turbine with yaw control," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 28, no. 4, pp. pp. 929–937, 2013.
- [109] BRATCU, Antoneta Iuliana, MUNTEANU, Iulian, et CEANGA, Emil. Optimal control of wind energy conversion systems: From energy optimization to multi-purpose criteria-A short survey. In : *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE, 2008. p. 759-766.
- [110] BOULEGROUNE, Islam Jar Allah. *Etude et réalisation d'une turbine éolienne*.2020
- [111] BOUSLIMANI, Samir. *Commande et Diagnostic d'un Système Non-linéaire: Application à la Génératrice Synchrone Dans une Production Eolienne en Présence de Défauts*. 2019. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [112] J. Usaola, P. Ledesma , and all "Transient Stability Studies in Grids With Great Wind Power Penetration". Modeling issues and operation requirements Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution ,(USA), 2003
- [113] Gaillard. "Système Eolien Basé sur une MADA : Contribution à l'Etude de la Qualité de l'Energie Electrique et de la Continuité de Service". Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2010.
- [114] REKIOUA, Djamila. Wind power electric systems. *Green Energy and Technology*, 2014.
- [115] BERHAIL, Abdelkader. *Commande d'une éolienne à base de GSAP connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux*. 2020. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [116] MAHBOUB, Mohamed-abdelbasset. *Modélisation et commande d'un système éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais*. 2018. Thèse de doctorat.
- [117] MAHBOUB, Mohamed-abdelbasset. *Modélisation et commande d'un système éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais*. 2018. Thèse de doctorat.
- [118] BOUAKAZ OUAHID, "Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone", Mémoire MAGISTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2006.

## Références

- [119] BOUDJERDA, Nasserline. *Réduction des Perturbations Conduites dans les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance par une Commande en MLI Aléatoire*. 2018. Thèse de doctorat.
- [120] A. Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010
- [121] A. Aloraini, M. Sayed-Mouchaweh, « Graphical Model Based Approach for Fault Diagnosis of Wind Turbines », 13th International Conference on Machine Learning and Applications. IEEE, 2014
- [122] GAILLARD, Arnaud. *Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service*. 2010. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1.
- [123] Liu, Xiangjie, Yaozhen Han, and Chengcheng Wang, .Second-order sliding mode control for power optimisation of DFIG-based variable speed wind turbine. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11.2: 408-418 <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0403>
- [124] K. Kiran, S. Das and A. Sahu. Sensorless speed estimation and control of brushless doubly-fed reluctance machine drive using model reference adaptive system. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2016, pp. 1-6, **doi: 10.1109/PEDES.2016.7914480**.
- [125] K. Kiran, S. Das and D. Singh. Model predictive field oriented speed control of brushless doubly-fed reluctance motor drive. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2018 , pp. 1-6, **doi: 10.1109/PICC.2018.8384760**.
- [126] Boubzizi, S., Abid, H., El hajjaji, A. *et al.* Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system. *Prot Control Mod Power Syst*, 2018, **3**, 21 <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0096-y>
- [127] Kelkoul, Bahia, and Abdelmadjid Boumediene. Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine. *Energy*, 2021, 214 :118871 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118871>
- [128] Levine, W.S (1996). *The Control Handbook*. CRC Press, 941-951.
- [129] KAHLA, SAMI. *Modélisation et commande d'un système éolien*. 2018. Thèse de doctorat.
- [130] GUI, Yonghao, LEE, Young Ok, HAN, Young seong, et al, 'Passivity-based control with nonlinear damping for STATCOM system', In : Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on. IEEE, 2012. p. 1715-1720.
- [131] ZHANG, Chao, AIMIN, Zhang, HANG, Zhang, et al, 'An advanced adaptive backstepping control method for STATCOM', In: Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese. IEEE, 2014. p. 1822-1827.
- [132] Itkis, U (1976). *Control System of Variable Structure*, Wiley, New York.
- [133] Hung, J.Y., Gao, W., Hung, J.C (1993). Variable structure control: a survey, *IEEE Trans. Ind. Electronics* 40 (1) , 2-22.
- [134] A Hussain., "Contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants"., Université de Reims Champagne Ardenne, 2009.
- [135] BENAKCHA, Meryem. *Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE'*. 2019. Thèse de doctorat. Université de M'sila.
- [136] A Boumediene., "Recherche et développement de nouvelles approches de commandes d'une machine synchrone autopilotée alimentée en tension"., Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2007.
- [137] J. J.E. Slotine, « Sliding controller design for nonlinear systems », *Int. J. of Cont.* Vol. 4, No. 02, pp. 421–434, 1984.
- [138] P.E. Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation, », Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [139] H Amimeur., "Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement"., Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.

## Références

- [140] S Khoujet El Khil., “Commande vectorielle d’une machine asynchrone doublement alimentée MADA” .,Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [141] A Boumededienne., “Recherche et développement de nouvelles approches de commandes d'une machine synchrone autopilotée alimentée en tension” ., Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2007
- [142] TRIA, Fatma Zahra. *Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien*. 2018. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- [143] BENDAAS, Ismail. *Contribution à la Commande Hybride par Mode Glissant Floue Appliquée à un Moteur à Induction. Apport des Techniques de L'intelligence Artificielle*. 2016. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [144] DEGHBOUDJ, Imen et BOUTAMINA, Brahim. *Commande des systemes non lineaires par mode glissant d'ordre superieur*. 2017.
- [145] FARID, Challal et LILA, Zemihi. *Commande par mode glissant neuronal d'un pendule inversé*. 2016. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [146] M. Taleb, A. Levant, and F. Plestan. “Pneumatic actuator control: "Solution based on adaptive twisting and experimentation", *Control Engineering Practice*, 21(5) :727– 736, 2013.
- [147] N. Bounasla and K. E. Hemsas, “Second order sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor”, *STA 14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control*, Tunisia, 2013.
- [148] I. Deghboudj, “ Commande des systemes non lineaires par mode glissant d'ordre superieur ”, Thèse de Magister, Université de Constantine 1, 2013
- [149] Slotine, J.-J. E., & Li, W. ”*Applied Nonlinear Control*”. London:Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [150] Levant, A. (1993). Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International journal of control*, 58(6), 1247-1263.
- [151] Lewis, F. L., & Lewis, F. L. (1986). *Optimal estimation: with an introduction to stochastic control theory* (pp. 88-94). New York:Wiley
- [152] Bartolini, G., Pisano, A., Punta, E., & Usai, E. (2003). A survey of applications of secondorder sliding mode control to mechanical systems. *International Journal of control*, 76(9- 10), 875-892.
- [153] KIYYOUR, Brahim. *Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile*. 2020. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider–Biskra.
- [154] Kunusch, C., Puleston, P., &Mayosky, M. (2012). *Sliding-Mode control of PEM fuel cells*. Springer Science & Business Media.

## **Annexe**

Les paramètres de la machine BDFRM (4,5 KW)[93]:

$$R_p = 3.781 \Omega$$

$$R_s = 2.441 \Omega$$

$$L_p = 0.41 \text{ H}$$

$$L_s = 0.316 \text{ H}$$

$$L_m = 0.3 \text{ H}$$

$$J = 0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$Pr = 4$$

Les paramètres du générateur éolien [93]:

Nombre de pales = 3

$$R = 4 \text{ m}$$

$$G = 7.5$$

$$J_t = 1.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$