



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Projet de Fin d'Étude

Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité: MACHINE ÉLECTRIQUE

Thème

**Modélisation et commande d'un system
éolien à base d'une génératrice double
alimentation sans balais.**

Présenté par:

- MOURIDA Messaoud
- MADANI Bilal
- REBBOH Abd elaziz

Devant le jury composé de :

Président :

Examineur :

Encadreur: TRIAA FATIMA EL ZOUHRA

Année universitaire: 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

قال تعالى: "لئن شكرتم لأزيدنكم"

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم

"من لم يشكر الناس لم يشكر الله" حديث شريف

فالحمد والشكر لله عز وجل أولاً وقبل كل شيء على تيسيره وتوفيقه

لنا في أتمام هذا العمل

تتقدم بجزيل الشكر إلى الأستاذة الدكتور "تربعة فاطمة الزهراء" على

مراقبتها لنا في أنجاز هذا البحث والأشراف على كل جزء وخطوة منه.

وتحملها عناء البحث وأفادتنا بكل صغيرة وكبيرة لا تمام

هذه المذكرة واتمنى من الله أن يجعل هذا العمل في ميزان حسناتنا وحسناتها، وأن

يجعله في خدمة العلم ومرض عطاء لطلبة علوم وتكنولوجيا عامة والماكنات

الكهربائية خاصة.

وإلى كل أساتذة كلية الهندسة الكهربائية وإلى كل من له الفضل في

إعانتنا على أنجاز هذا العمل.

Dedicace

بسم الله الرحمن الرحيم

(قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

لك الحمد ربي على عظيم فضلك وكثير عطائك

اما بعد :

إنه لا يسعني في هذا المقام المبارك أن أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع:

إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة وكشف الغمة نبي الرحمة ومعلم البشرية ومنبع العلم

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى أبي رحمة الله عليه

إلى مالكي في الحياة . . إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني . . إلى بسمه الحياة وسر الوجود إلى من كان

دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى فضاء المحبة وبحر الحنان، ربحانة الدنيا

وبهجتها: (أمي الغالية حفظها الله واطال في عمرها)

إلى من حبهم يجري في عروقي ويلهج بذكراهم فؤادي الأعمدة التي أظل ارتكز عليها للصمود :

إخواني وأخواتي

إلى من علمونا حروفا من ذهب وكلمات من درر وعبارات من أسمى وأجلى عبارات في العلم

إلى من صاغوا لنا علمهم حروفا ومن فكرهم منارة تنير لنا سيرة العلم والنجاح إلى أساتذتنا الكرام.

إلى من حمل هذه الرسالة وانتفع بها بعدي.

إلى الشعب الفلسطيني الأبي

الطالب موريدة مسعود

Dedicace

أحمد الله عز وجل على منحه وعونه لإتمام هذا البحث
إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له آماله، إلى من كان يدفعني قدما نحو الأمام لنيل
المبتغى، إلى الإنسان الذي امتلك الإنسانية بكل قوة، إلى الذي سهر على تعليمي بتضحيات جسام
مترجمة في تقديسه للعلم، إلى مدرستي الأولى في الحياة،
أبي الغالي على قلبي أطال الله في عمره؛
إلى التي وهبت فلذة كبدها كل العطاء والحنان، إلى التي صبرت على كل شيء، التي رعتني
حق الرعاية وكانت سندي في الشدائد، وكانت دعواها لي بالتوفيق، تتبعني خطوة خطوة
في عملي، إلى من ارتحت كلما تذكرت ابتسامتها في وجهي نبع الحنان أمني أعز ملاك على
القلب والعين جزاها الله عني خير الجزاء في الدارين؛
إليهما أهدي هذا العمل المتواضع لكي أدخل على قلبيهما شيئاً من السعادة إلى إخوتي
وأخواتي الذين تقاسموا معي عبء الحياة؛
كما أهدي ثمرة جهدي لأساتذتنا الكرام الذين كلما تظلمت الطريق
أمامي لجأت إليهم فزرعوا فيا الأمل لأسير قدما
والى كل من يؤمن بأن بذور نجاح التغيير هي في ذواتنا وفي أنفسنا قبل أن تكون في
أشياء أخرى...

قال الله تعالى: "إن الله لا يغير ما بقوم حتى يغيروا ما بأنفسهم...."

الآية 11 من سورة الرعد

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل

إلى الشعب الفلسطيني الابي

الطالب مدني بلال

Dedicace

أهدي ثمرة جهدي إلى من قال في حقهما الرحمن " واخفض لهما
جناح الذل من الرحمة وقل ربي ارحمهما كما ربياني صغيرا "
الوالدين الكريمين

وإلى من يجري في عروقي دمهم وينبض قلبي بجهم إخوتي الأعزاء كل واحد باسمو
وإلى كل من مد لنا يد العون في إنجاح هذا العمل
إلى الأساتذة الأفاضل أساتذة قسم الهندسة الكهربائية
إلى أصدقاء الدرب العلمي أعضاء المذكرة "
لكم جميعاً أهدي ثمرة جهدي هذا

إلى الشعب الفلسطيني الأبدي

الطالب ربوح عبد العزيز

Résumé

Ce travail présente l'étude et la commande d'un système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB) entraînée par une turbine éolienne à vitesse variable. Le stator de puissance de la machine est directement relié au réseau électrique, par contre le stator de commande est alimenté par un convertisseur bidirectionnel. Les MADASB promettent des avantages significatifs pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne en raison de leurs faibles coûts et une plus grande fiabilité par rapport aux machines asynchrones à double alimentation classiques (MADA). L'ensemble du système est simulé le système dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Motsclés:

Energie éolienne, MPPT, MADASB, commande vectorielle, puissance active et réactive

Sommaire

Sommaire

Remerciements.....	I
Dedicace.....	II
Dedicace.....	III
Dedicace.....	IV
Résumé.....	V
Sommaire.....	VII
Liste des figures	X
Liste des Tableau	XIII
Liste des symboles.....	XIV
Introduction générale	1
Chapitre I: CONTEXTE THEORIQUE DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE	
I.1Introduction	4
I.2 Historique.....	4
I.3Principedefonctionnementdel'énergieéolienne:.....	5
I.4 Descriptiond'uneéolienne	6
I.5 Différents types	8
I.5.1Eolienne à axe vertical :.....	8
I.5.2 Leséoliennesà axehorizontal	9
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	11
I.6.1Avantages :.....	11
I.6.2 Inconvénients :	12
I.7 Classification selon la taille :	12
I.8 l'énergie éolienne de le monde :	14
I.8.1 Les prémices d'un développement remarquable de l'énergie éolienne :.....	14
I.8.2 Capacité totale de production d'énergie éolienne :	15
I.9 Les prévisions du GWEC d'ici à 2027 :.....	17
I.10 Application des éoliennes:	17
I.11 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliennes.....	18

I.12 Evolution des systèmes de (G VV) vers la double alimentation.	19
I.13 Les principaux points forts de la MADA sont les suivants [LOP 06]:	21
I.14 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade:	22
I.15 Machine Asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB).	23
I.16 Les Avantages et les Inconvénients de la MADA :	25
I.17 Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur:	32
Conclusion:	34
Chapitre II: MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE	
II.1 Introduction :	36
II.2 MODÉLISATION DE LA PARTIE MÉCANIQUE DE L'EOLIENNE	36
II.3 Modélisation de la turbine.....	36
II.3.1 Modèle mécanique simplifié de la turbine	38
II.3.2 Le coefficient de puissance:	38
II.4 Stratégie de commande de la turbine éolienne:	40
II.4.1 Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable:	40
II.4.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation:	41
II.5 Contrôles sans asservissement de la vitesse de rotation:	42
II.6 Description de la MADA Sans Balais (BDFIG)	42
II.7 Contraintes constructives et d'alimentation pour le fonctionnement correct de la MADASB	43
II.8 Modélisation de la MADA Sans Balais (BDFIG)	44
II.9 Transformation de abc à d,q.....	44
II.9.1. Transformation de Park	44
II.9.2 Modèle d'état de la MADASB	45
II.10 Résultats de simulation.....	46
Conclusion	49

Chapitre III: COMMANDE VECTORIELLE DE Le GADASB

III.1 Introduction	51
III.2 Architecture du dispositif de commande	51
III.3 Principe de la commande vectorielle à flux orienté	52
III.3.1 L'orientation de flux de la MADASB.....	53
III.4 Stratégie de commande en puissances active et réactive de la MADASB :	54
III.4.1 Commande indirecte de la MADASB.....	57
III.4.2 Calcul des courants de référence de la commande.....	57
III.4.3 Schéma synoptique du contrôle de la machine	57
III.5 MISE EN PLACE DE LA REGULATION	58
III.5.1 Synthèse de la régulation PI.....	59
III.6 Modélisation de l'onduleur de tension MLI :	59
III.7 Stratégie de commande de l'onduleur	61
III.7.1 Modulation de largeur d'impulsions(MLI).....	61
III.7.2 Les paramètre de la MLI	61
III.8 SIMULATION DU SYSTEME EOLIEN BASE SUR UNE MADASB.....	62
III.8.1 Commande indirecte des Puissances P_p et Q_p des BP :	62
III.9 Résultat de simulation et interprétation	63
CONCLUSION	68
Conclusion générale.....	70
Références bibliographique	72

Liste des figures

FigureI-1: Un ancien moulin à vent antique dans les îles britanniques.....	5
FigureI.2: principe de la conversion d'énergie.....	6
FigureI.3: éléments constituant une éolienne.....	6
FigureI.4: deux types de éoliennes.....	8
FigureI.5 Rotor de Savonius.....	9
FigureI.6 Rotor de Darrieus.....	9
FigureI.7: Eolienne lente	10
Figure I.8: Eolienne rapide.....	10
FigureI-9: Eolienne multipale.....	10
FigureI-10: Eolienne rapide.....	11
FigureI-11: Illustration de la relation entre le diamètre du rotor et la puissance électrique de sortie basée sur les données techniques de 62 modèles récents d'éoliennes. [www04].....	13
FigureI-12: Evolution de la taille des éoliens (hauteur du mat et diamètre du rotor et la puissance de sortie nominal.	14
FigureI-13: [www03].....	15
FigureI-14: Capacité totale de production d'énergie éolienne dans le monde entre 2008 et 2022.....	15
FigureI-15: Capacité mondiale installée en GW [www06]	16
FigureI-16: prévisions du GWEC d'ici à 2027 [www01].....	17
FigureI-17: Génératrice synchrone à vitesse variable avec convertisseurs MLI.....	19
FigureI-18: schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée par le rotor.....	21
FigureI-19: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	22
FigureI-20: Cascade hypo synchrone.	23
FigureI-21: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.	23
FigureI-22: Schéma de couplage croisé entre les deux stators.....	25
FigureI-23: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	27
FigureI-24: Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....	28
FigureI-25: Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles...31	31
FigureI-26: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.	31
FigureI-27: Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.....	32
FigureII.1: Schéma d'un système éolien à base d'une (MADA SB) ou (BDFIG).....	36

Figure II.2: Schéma de conception d'une turbine éolienne	37
FigureII. 3:Modèle mécanique simplifié de la turbine	38
Figure II.4: Coefficient de puissance pour différents types d'aérogénérateurs	39
FigureII.5: Caractéristique $C_p=f(\lambda)$ pour $\beta=2^\circ$	39
FigureII.6: Modèle de l'aérogénérateur	40
FigureII.7: Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	40
FigureII.8: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation	41
FigureII.9: Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation	42
FigureII.10: Structure de la MADAS sans balais (BDFIG)	43
Figure II.11 Schéma bloc du GADASB sous Matlab/Simulink	47
figure II.12: couple électromagnétique	48
figure II.13: vitesse mécanique	48
figure II.14: courant de bobinage de BP avec zoom	48
figure II.15: courant de BC	48
figure II.16: Flux de bobinage de puissance avec zoom	49
Figure . III. 1: Schéma global du système basé sur une MDASB	51
Figure. III. 2: Schéma du principe de découplage pour la MADASB par analogie avec la machine à C.C.	52
Figure. III. 3: Schémas du contrôle de la MADASB	53
Figure. III. 4: Position du référentiel par rapport au flux	53
Figure. III. 5: Schéma bloc de la MADASB	57
Figure. III. 6: Schéma synoptique du contrôle de la MADA Sans Balais	58
Figure. III.7: Schéma bloc de la commande indirecte (PS en haut, QS en bas)	58
Figure. III. 8 Système régulé par un PI.	59
Figure. III. 9 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux	60
Figure. III. 10: Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulaire sinusoïdale à une porteuse	62
Figure. III.11: Structures des régulateurs et la MLI appliquée sur le MADASB	62
Figure III.12 Schéma bloc de la commande indirecte du GADASB sous Matlab/Simulink	63
Figure III.13 Le schéma bloc interne de la commande indirecte sous Matlab/Simulink	63
Figure. III. 14 La vitesse du vent	64
Figure. III. 15 La puissance active de BP)	65
Figure. III. 16 La puissance réactive de BP	65
Figure. III. 17 Les composants quadrature de courant i_{sc}	65
Figure. III. 18 Le composant direct de courant i_{sc}	65

Figure.III.19. Flux d,q des BP	65
Figure. III.20. Le couple électromagnétique	65
Figure. III.21.Le courant triphasé de BC.....	66
Figure. III.22. Zoom de courant de BC	66
Figure. III.23. Tension et courant par phase de BC.....	66
Figure. III.24.Le courant triphasé de BC avec zoom.....	66
Figure. III.25Courant et tension par phase de BP.....	66
Figure. III.26 Le coefficient de puissance CP	67
Figure. III.27la vitesse specifique λ	67
Figure. III.28 la vitesse mecanique.....	67

Liste des Tableau

Tableau I.1: Classificationdesturbineséoliennes.	8
Tableau I.2: Quadrants de fonctionnement de la MADA.....	27
Tableau I.3: Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE,,.....	29
Tableau I.4: Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur	33

Liste des symboles

la turbine

(v_0) : Vitesse du vent

V : Vitesse moyenne du vent

$V_t(t)$: Composante de la turbulence du vent

P_t : puissance de l'éolienne

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne

λ : Vitesse spécifique (relative) de l'éolienne

β : Angle de calage des pales de la turbine

ρ : la masse volumique de l'air 15°C.

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.

R_t : Rayon de la turbine.

J_m : Le moment d'inertie de la machine.

J_t : Le moment d'inertie de la turbine .

F_v : Coefficient de frottement visqueux.,

G_m : Le couple sur l'arbre de la machine .

G : Gain du multiplicateur.

C_t : Le couple mécanique sur l'arbre de la turbine.

Ω_m : La vitesse de rotation de la machine, Référentiel

(α, β) : Référentiel lié au stator

(d, q) : Référentiel lié au champ tournant

(X, Y) : Référentiel lié au rotor.

R_r : Résistance rotorique de la MADASB

R_{sp} : Résistance statorique de la MADASB (BP)

R_{sc} : Résistance statorique de la MADASB (BC)

P_p, P_c : Nombre de paires de pôles de la de la BP, BC

ω_{sp} : Pulsation électrique statorique (.BP)

ω_{sc} : Pulsation électrique statorique (.BC)

ω_r : Pulsation rotorique de la MADASB

Commande de la MASDSB

P^*_{sp} : Puissance active de référence

Q^*_{sp} : Puissance réactive de référence

i^*_{sp} : Courant statorique(BP) de référence

i^*_{sc} : Courant statorique(BC) de référence
 V_{sc} : tension statorique(BC) de référence
 C_{em} : couple électromagnétique de référence
 F_p : fréquence de la porteuse.
 i_{ond}, i_{red} : les courants modulés par le CCM et CCR
 m, r : indice de modulation, indice d'amplitude
 i_{cond} : le courant traversant le condensateur,
 v_{dc} : la tension du bus continu
 R_f : la résistance du filtre RL
 L_f : l'inductance du filtre RL
 P_{res} : la puissance transitée par le CCR
 P_c : la puissance emmagasinée dans le condensateur

la MADA sans balais

$V_{sap}, V_{sbp}, V_{scp}$: tensions triphasées au stator (BP)
 $i_{sap}, i_{sbp}, i_{scp}$: courants triphasées au stator (BP)
 $V_{sac}, V_{sbc}, V_{scc}$: tensions triphasées au stator (BC)
 $i_{sac}, i_{sbc}, i_{scc}$: courants triphasées au stator (BC)
 $\psi_{sap}, \psi_{sbp}, \psi_{scp}$: flux propres circulants au stator (BP)
 $\psi_{sac}, \psi_{sbc}, \psi_{scc}$: flux propres circulants au stator (BC)
 L_{sp}, L_{sc} : Inductances cycliques de la MADASB
 L_r : Inductances cycliques rotorique de la MADASB

Acronymes

BDFIG :Brushless Doubly-fed induction generator

BP , BC: Bobinage de Puissance et Bobinage de Commande

CCI: curent controlled inverter

CCM: convertisseur côté machine

CCR: convertisseur côté réseau

CDER: Centre de Développement d'Energie

FEM: Force électromotrice

FTBF: Fonction de Transfer en Boucle fermé

FTBO: Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.

GACE: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

GEIC: groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

GVV: Génération à Vitesse Variable

IGBT: insulated Gate Bipolar Transistor

IPCC :Intergovernmental Panel on Climate Change

PI: Proportionnel – Intégrale

P et O: Algorithme de perturbation et observation

MAC: Machine Asynchrone à cage

MADA: Machine Asynchrone à Double Alimentation

MADAC: Machine Asynchrone à Double Alimentation en Cascade

MADASB: Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais

MASDS: Machine asynchrone à double stator

MCC Machine à courant continu

MLI :Modulation de large d'impulsion

MSAP: Machine Synchrone à Aimant Permanent

MSRB: Machine Synchrone à Rotor Bobiné

SCE: Systèmes De Conversion Eoliens

VSI: voltage source inverter.

L'objectif de ce travail :

-Contrôle de la puissance via commande vectorielle

L'objectif est de concevoir un système d'énergies basé sur une génératrice doublement alimentée sans balais avec une efficacité et une fiabilité élevées, capable de fournir une énergie de haute qualité tout en respectant les exigences du réseau électrique.

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, la demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter. Les différentes centrales traditionnelles de production d'électricité (nucléaire, hydraulique, thermique) utilisent des sources fossiles et naturelles telles que: l'uranium, les hydrocarbures et l'eau.

Les centrales thermiques sont responsables de rejets des gaz atmosphériques. L'énergie nucléaire présente un avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution, mais le risque d'accident nucléaire demeure. Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Pour faire face à ces différents problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. En effet, ces pays se sont engagés, à moyen terme, à augmenter dans leur production d'énergie électrique la part d'énergie d'origine renouvelable. [47].

Parmi ces énergies renouvelables, on trouve l'énergie éolienne est celle qui a le potentiel énergétique le plus important après l'énergie hydraulique. La puissance des éoliennes installées dans le monde augmentant de plus en plus tous les ans. Actuellement, les systèmes éoliens à vitesse variable basés sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) sont les plus utilisés dans ce domaine [47]. Cette technologie est, maintenant, le meilleur choix. Dans la MADA, le contact glissant des bobinages de rotor de la MADA présente le major inconvénient dans ce système

La première solution de cet inconvénient, c'est la cascade de deux MADA: Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages du MAC et de la MADA., la structure en cascade peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée [48]. Deuxième solution c'est le système (MADASB), celui-ci fera l'objet de notre travail. Elle est constituée par un rotor à cage spéciale et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance, est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande, est alimenté par un convertisseur de puissance bidirectionnel.

Les avantages potentiels de cette machine (MADASB) sont: Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA).

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données

Introduction générale

montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, ainsi que les différents générateurs qui sont utilisés dans les systèmes éoliens. En fin ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

Le deuxième chapitre est basé sur la modélisation et la simulation de la MADASB,

Dans la troisième et dernière partie, nous présenterons La commande MLI de ce dernier sera étudiée. Dans le troisième chapitre, nous avons proposé une loi de commande pour la MADASB basée sur l'orientation du flux statorique de la machine, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques de la machine (bobinage de puissance) et les grandeurs statoriques (bobinage de commande). Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux statoriques de la machine (BC), en vue de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator de la machine (BP) et le réseau tout en maintenant la fréquence de 50 Hz.

Finalement, nous concluons ce travail par une conclusion générale en proposant quelques perspectives pour les futurs travaux de recherche.

Chapitre I

CONTEXTE THEORIQUE DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelables sont actuellement utilisées pour produire de l'énergie électrique. Ces sources d'énergie sont considérées comme naturelles, propres et gratuites, et constituent de bonnes alternatives aux ressources fossiles. Face à l'épuisement prévu des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution d'avenir pour répondre durablement aux besoins énergétiques mondiaux.

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre développée par de nombreux pays, notamment l'Algérie. Elle a connu une croissance très importante ces dernières années. [1]

Les éoliennes doivent comprendre :

- Systèmes permettant le contrôle électrique (moteurs liés au contrôle).
- Les systèmes permettant le contrôle mécanique (orientation des roulements d'éoliennes, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement aux différents types d'éoliennes, à leurs principes de construction et de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et des différents types de générateurs.

La dernière partie du chapitre explique les différentes structures des moteurs asynchrones à double alimentation, leurs principes de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt.[2]

I.2 Historique

L'énergie éolienne est utilisée depuis des siècles pour fournir des travaux mécaniques. L'exemple le plus célèbre est le moulin à vent utilisé par les meuniers pour transformer le blé en farine. [3]

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, outre le bois-énergie, l'énergie éolienne a été la première à être utilisée par l'homme. Depuis l'Antiquité, il est utilisé pour propulser les navires, les moulins à blé et les bâtiments de pompage d'eau. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à environ 2000 avant JC.[4][5][6][7]

À cette époque, les Babyloniens concevaient un projet complet visant à utiliser l'énergie éolienne pour irriguer la Mésopotamie. Ce n'est qu'au Moyen Âge que les moulins à vent ont été introduits en Europe, où ils étaient utilisés pour moudre le blé et sécher les terres inondées des Pays-Bas.

En 1890 Paul La Cour a l'idée de combiner une éolienne avec un générateur.[8]

Au cours des décennies suivantes, l'énergie éolienne a été utilisée pour produire de l'électricité dans des zones reculées et n'est donc pas connectée au réseau. La maîtrise du stockage d'énergie par la batterie permet de stocker cette énergie pour pouvoir l'utiliser lorsqu'il n'y a pas de vent. Ce type d'installation concerne uniquement les besoins domestiques et n'est pas adapté à l'industrie.[3]

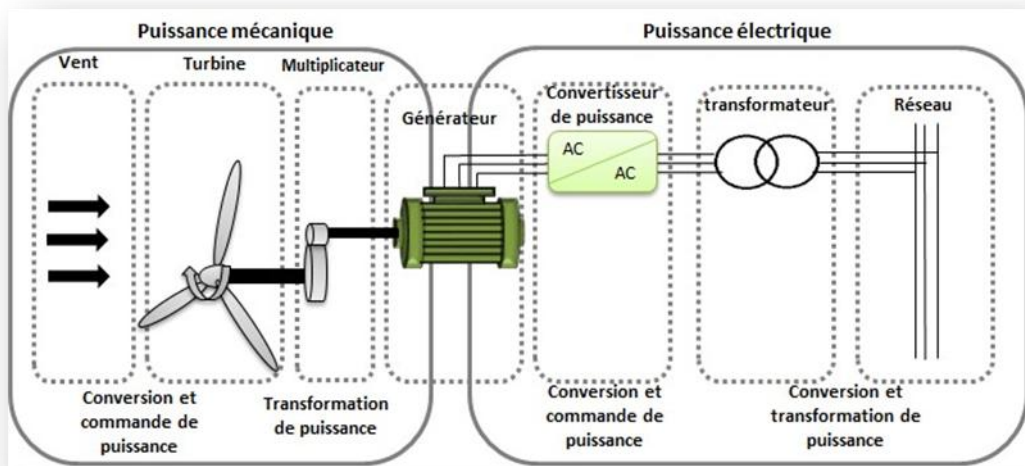


FigureI -1: Unancien moulin à ventantique dans lesîles britanniques.[4]

I.3Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne:

Une éolienne est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique utilisable sur un arbre d'entraînement puis en énergie électrique via un générateur.

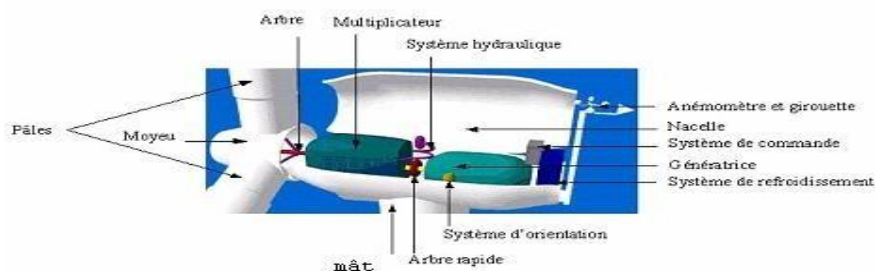
L'énergie éolienne est une source d'énergie qui ne produit aucune émission atmosphérique ni déchet radioactif. C'est l'un des nouveaux moyens de production électrique décentralisée, offrant une alternative viable à l'énergie nucléaire, mais ne prétend pas la remplacer (la quantité d'énergie produite est bien moindre en ampleur).



FigureI.2: principe de la conversion d'énergie

I.4 Description d'une éolienne

Il existe de nombreuses configurations possibles d'éoliennes, et elles peuvent différer considérablement. Or, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux [12] :



FigureI.3: éléments constituant une éolienne

➤ Le mât "tour"

La tour est l'un des principaux composants de l'éolienne. D'une part, son rôle est de supporter l'ensemble (nacelle et rotor) et d'éviter que les pales ne touchent le sol. En même temps, elle place également le rotor à une hauteur suffisante pour que le rotor soit le plus éloigné possible du sol et du gradient du vent, améliorant ainsi la captation d'énergie. Par conséquent, certains fabricants proposent différentes hauteurs de tour pour un même composant (nacelle et rotor) afin de s'adapter au mieux aux différents emplacements d'installation. Sa hauteur varie d'un minimum de 40 m (~ 400 kW) à un maximum de 140 m (~ 3,5 MW). [4][8]

On peut trouver trois principaux types de tours :

✚ Mât haubané: de structure simple, mais principalement utilisé sur des machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la salle des machines nécessite généralement l'abaissement du mât. Il présente cependant l'avantage de pouvoir protéger les éoliennes des conditions climatiques extrêmes (fortes tempêtes, cyclones) où l'empreinte du hauban peut être un obstacle à son utilisation ;

✚ Tour en treillis: Son avantage essentiel est sa structure simple, attractive pour les pays en développement. Pour les machines plus grandes, son aspect inesthétique devient un obstacle important ;

✚ Tour tubulaire: Bien que de structure plus complexe, elle est privilégiée par les constructeurs car elle permet d'accueillir certains réglages ou commandes et offre une protection visible au personnel d'entretien qui doit monter dans la cabine (facile d'installer une échelle ou même Il s'agit d'un ascenseur). Son aspect esthétique est également un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne. [8]

➤ **La nacelle**

Les arbres à vitesses variables, les roulements et le multiplicateur sont tous des composants mécaniques qui servent à relier le rotor de l'éolienne au générateur électrique. Contrairement au frein aérodynamique, qui sert à arrêter le système en cas de surcharge, le frein à disque remplit cette fonction. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone, et les systèmes hydrauliques ou électriques orientent les pales (pour le frein aérodynamique) et la nacelle (pour maintenir la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). De plus, un système de refroidissement par air ou par eau est souvent utilisé, tout comme un anémomètre et un système électronique de gestion de l'éolienne.[13]

➤ **Le rotor**

Le rotor est constitué des pales assemblées dans leur moyeu.

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3, le rotor à trois pales étant le plus courant car il représente un compromis avantageux en termes de coût, de comportement vibratoire, de pollution visuelle et de bruit.

I.5 Différents types

D'éoliennes: Le tableau suivant répertorie la classification des turbines :

Tableau I.1: Classification des turbines éoliennes[3][4].

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne Grand	12m à 45m	De 40kW à 1Mw
	46m et plus	1Mw et plus

Les éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel l'hélice est montée. Il existe deux principaux types d'éoliennes :

- Turbine à axe vertical.
- Turbine à axe horizontal.

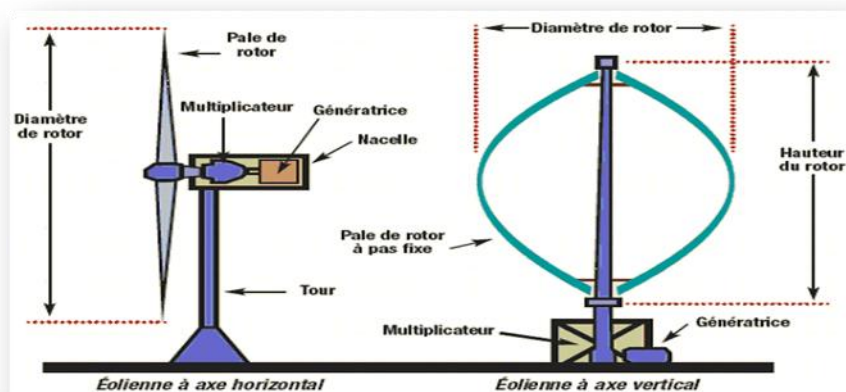


Figure I.4: deux types des éoliennes[6]

I.5.1 Eolienne à axe vertical :

Les éoliennes de ce type (Fig. 1.2) ont fait l'objet de nombreuses études. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de disposer d'éléments mécaniques (multiplicateurs et générateurs) au sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. Cependant, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et au mât et sont souvent très lourdes. et supportent de fortes contraintes mécaniques, incitant ainsi les constructeurs à abandonner quasiment ces éoliennes (sauf celles de très faible puissance) au profit des éoliennes à axe horizontal [6].

De nombreuses variantes techniques ont été testées, parmi lesquelles seules deux

structures ont atteint le stade industriel, le rotor Savonius, Figure I.5 et le rotor Darrieus, [10]
Figure I.6



Figure I.5 Rotor de Savonius



Figure I.6 Rotor de Darrieus

Les bénéfices d'une éolienne à axe vertical :

- ✚ incluent la disposition qui place le multiplicateur, le générateur et les équipements de commande directement au sol.
- ✚ Son axe vertical possède une symétrie de révolution, lui permettant de fonctionner dans n'importe quelle direction du vent sans devoir orienter le rotor.
- ✚ Sa conception est simple, solide et requiert un entretien minimal[18].

Les désavantages d'une éolienne à axe vertical :

- ✚ incluent une performance moindre par rapport aux éoliennes à axe horizontal.
- ✚ La conception verticale de ce type d'éolienne signifie qu'elle doit fonctionner avec un vent plus faible, car il est freiné par le relief et donc plus proche du sol.
- ✚ De plus, leur implantation nécessite l'utilisation de tirants qui doivent passer au-dessus des pales, ce qui occupe davantage de surface par rapport à une éolienne à tour[18].

I.5.2 Les éoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes modernes sont à axe horizontal (ou à hélice), et ce sont de loin les modèles commerciaux les plus répandus car leur conception est plus simple et plus efficace que tous les autres modèles. Ils ont généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau. [10][16]

Selon le nombre de pales de l'hélice, elles peuvent être divisées en deux catégories: les « multipales » à rotation lente et les « éoliennes » à rotation rapide.



FigureI.7: Eolienne lente [3]



FigureI.8: Eolienne rapide[19]

a-Eolienneslentes: Les éoliennes « multiples » à rotation lente sont fabriquées aux États-Unis depuis 1870 et peuvent comporter de 12 à 30 pales. Pour la plupart, ces éoliennes sont petites: le diamètre des roues est généralement de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes peuvent encore fonctionner normalement avec des vitesses de vent de 7 à 8 m/s ; en plus de cela, il est nécessaire de prévoir un dispositif d'arrêt et de mise à l'abri qui doit assurer la sécurité de la machine. Ces éoliennes sont équipées de gouvernails qui orientent le disque normalement dans la direction du vent. La masse importante de la turbine et sa faible vitesse de rotation (par rapport à son diamètre) signifient que ces machines de faible puissance sont principalement utilisées pour pomper de l'eau. [11][16]



FigureI-9: Eolienne multipale.[11]

b-éoliennes rapides [17]

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales plutôt faible, variant généralement entre 2 et 4 pales. Ils sont les plus utilisés dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (plus légers que les éoliennes plus lentes de même puissance) et de leur rendement élevé. Ils présentent cependant l'inconvénient d'être difficiles à démarrer.

Formule pratique pour les éoliennes rapides à axe horizontal :

$$P=0,2.D^2.V^3$$



FigureI-10: Eolienne rapide

Avantages d'une éolienne à axe horizontal :

- ✚ Une empreinte au sol très réduite par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✚ Cette conception capte des vents en hauteur, plus forts et plus constants que ceux près du sol.
- ✚ Le générateur et les équipements de contrôle sont placés dans la nacelle située au sommet de la tour.

Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prévoir un bâtiment supplémentaire pour loger les équipements [18].

Inconvénients d'une éolienne à axe horizontal

- ✚ Coût de construction élevé.
- ✚ Les équipements se trouvant au sommet de la tour peuvent entraver les opérations en cas d'incident [18].

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.6.1Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une forme d'énergie respectueuse de l'environnement: Les effets néfastes de certaines activités humaines sur la nature sont désormais reconnus par

de nombreux experts. Certaines sources d'énergie en particulier contribuent au changement climatique mondial, aux pluies acides et à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25 % depuis l'ère préindustrielle et il est prévu qu'elle double d'ici 2050.[20]

L'énergie éolienne n'est pas non plus une source d'énergie à risque comme peut l'être l'énergie nucléaire, et ne génère évidemment pas de déchets radioactifs dont la durée de vie est connue. C'est une source d'énergie locale qui permet de minimiser les pertes sur les lignes de transport vers des endroits généralement très proches. C'est également l'énergie renouvelable la moins chère.[21]

Enfin, contrairement à d'autres procédés thermiques ou nucléaires continus, l'exploitation de l'énergie éolienne est un événement ponctuel qui peut être facilement arrêté.

I.6.2 Inconvénients :

Le niveau sonore a considérablement baissé, en particulier le bruit mécanique qui a quasiment disparu grâce aux avancées réalisées au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique, quant à lui, est lié à la vitesse de rotation du rotor, et cette dernière doit donc être limitée.,[20]

Comparé aux sources d'énergie classiques, le coût de l'énergie éolienne peut être compétitif sur les meilleurs sites, là où le vent est le plus fort. Cependant, sur les sites moins ventés, le coût de l'énergie éolienne reste encore plus élevé que celui des sources d'énergie classiques.[21]

L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale[4] 2023.

I.7 Classification selon la taille :

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât, L , soit égale au diamètre du rotor, D . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées. Attention, il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance. Le but est uniquement de se donner une idée. En outre, cette puissance n'a de sens que si on a défini la vitesse de vent à laquelle elle est délivrée. [www04].

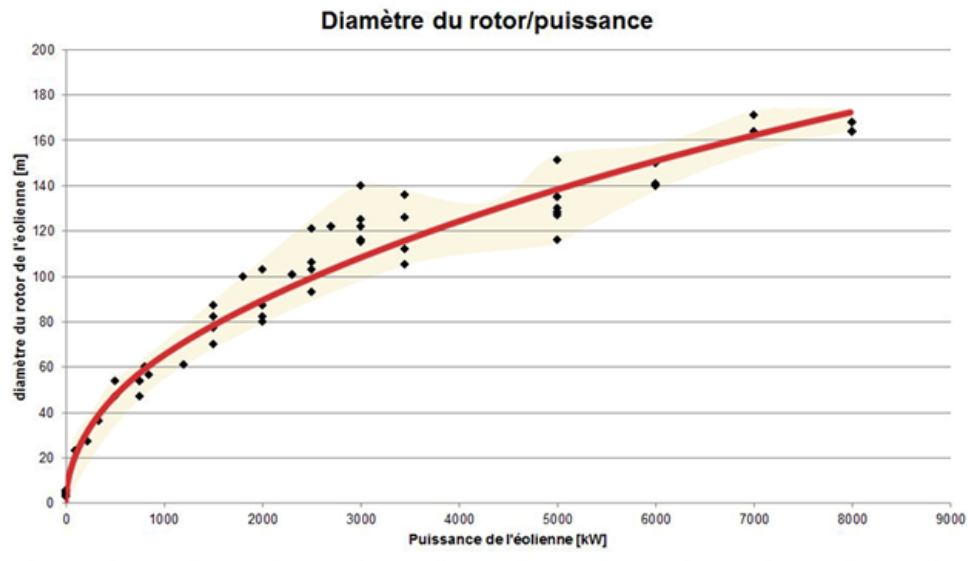


Figure I-11: Illustration de la relation entre le diamètre du rotor et la puissance électrique de sortie basée sur les données techniques de 62 modèles récents d'éoliennes.[www04].

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m²]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.1-0.4
Mini	1.25-3	1.2-7.1	0.4-2
Domestique	3-10	7-79	2-30
Petite commerciale	10-20	79-314	30-120
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	120-750
Grande commerciale	50-100	1 963-7854	750-3 000
Géante commerciale	100-170	7 854-22 686	3 000-8 000

Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

✚ **Micro-éoliennes:** en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).

✚ **Mini-éoliennes:** essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).

✚ **Eoliennes domestiques:** elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.

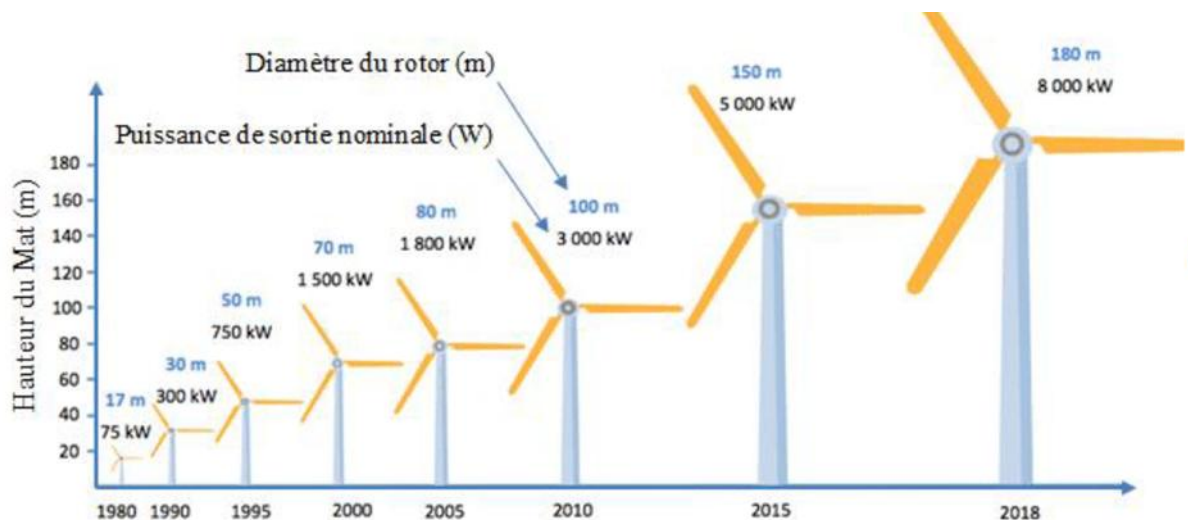
✚ **Petites éoliennes commerciales:** elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.

✚ **Moyennes éoliennes commerciales:** elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.

✚ **Eoliennes grands commerciales:** ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.

✚ **Eoliennes commerciales géantes:** ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes et également en offshore, elles sont très efficaces et issues des dernières générations technologiques.

Dans la course au gigantisme, l'éolien ne fait pas figure d'exception. Si les modèles de 9 MW sont déjà à l'ordre du jour, certaines sociétés n'hésitent pas à parler de diamètres avoisinant les 400 m (!) pour atteindre des puissances de 50 MW !!! [www04].



FigureI-12: Evolution de la taille des éoliens (hauteur du mat et diamètre du rotor et la puissance de sortie nominal.

I.8 l'énergie éolienne de le monde :

✚ On commence en général :

I.8.1 Les prémices d'un développement remarquable de l'énergie éolienne :

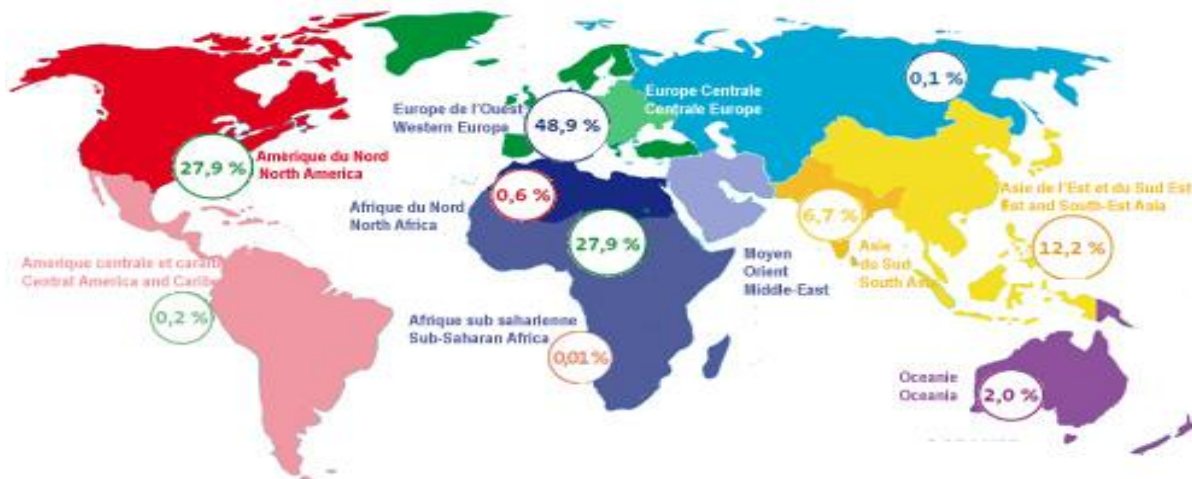
Depuis 2009, l'énergie éolienne est la seconde source de production d'électricité renouvelable (268,2Tw h) mais reste encore très loin de l'énergie d'origine hydrolique.

Elle représente 1,3 % de la production d'électricité totale et 7% de l'électricité renouvelable. Près de la moitié (48,9%) est produite en Europe de l'Ouest. Les autres grandes régions de production sont l'Amérique du nord (27,9%), l'Asie de l'Est et du Sud Est (12,2%) et l'Asie du Sud (6,7%) .

La croissance de la filière éolienne est la plus dynamique après celle su photovoltaïque.

Chapitre I CONTEXTE THEORIQUE DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

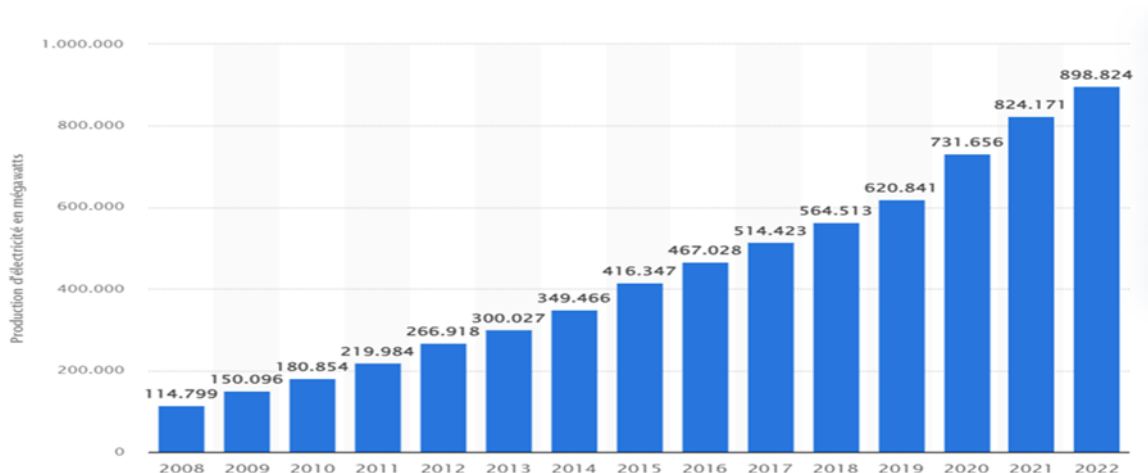
En effet, toutes les régions du monde disposent d'une filière éolienne connaissant une croissance à deux chiffres sur la période 1999-2009. L'énergie éolienne est actuellement l'énergie renouvelable la plus à même de concurrencer l'énergie hydraulique [www03](#).



FigureI-13: [[www03](#)]

I.8.2 Capacité totale de production d'énergie éolienne :

🚩 Capacité totale de production d'énergie éolienne dans le monde entre 2008 et 2022 (en mégawatts) Cette statistique représente la capacité totale de production d'énergie éolienne dans le monde, en mégawatts, entre 2008 et 2022. La capacité de production mondiale d'une telle énergie était ainsi en hausse au cours de cette période. En 2022, le parc éolien mondial représentait ainsi une capacité totale de production d'électricité de plus de 898 gigawatts. <https://fr.statista.com>.



FigureI-14: Capacité totale de production d'énergie éolienne dans le monde entre 2008 et 2022.

Chapitre I CONTEXTE THEORIQUE DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE

La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne 2022 a été la troisième meilleure année jamais enregistrée pour la nouvelle capacité avec 78 GW ajoutés dans le monde [www06].

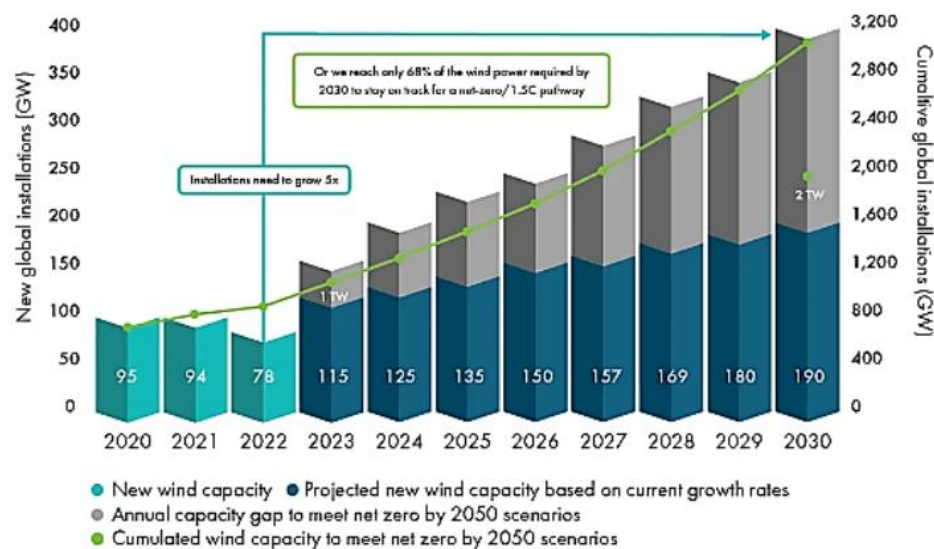
La capacité mondiale totale installée est passée à 906 GW. Cela représente une croissance annuelle de 9% [www06]

2023 devrait être la toute première année à dépasser les 100 GW de nouvelles capacités ajoutées à l'échelle mondiale avec ceci sur le même fait. GWEC Market Intelligence prévoit une croissance annuelle de 15% [www06]

. GWEC Market Intelligence prévoit 680 GW de nouvelle capacité au cours des cinq prochaines années (2023-27). Cela représente 136 GW par an jusqu'en 2027 [www06]

GWEC Market Intelligence a des perspectives positives jusqu'en 2030, avec 143 GW supplémentaires attendus d'ici la fin de la décennie, 13% supérieur aux prévisions précédentes. Nous avons précédemment prévu que 1078 GW seraient construits entre 2022 et 2030, ce qui devrait maintenant être 1221 GW de nouvelle capacité ajoutée entre 2023 et 2030 [www06]

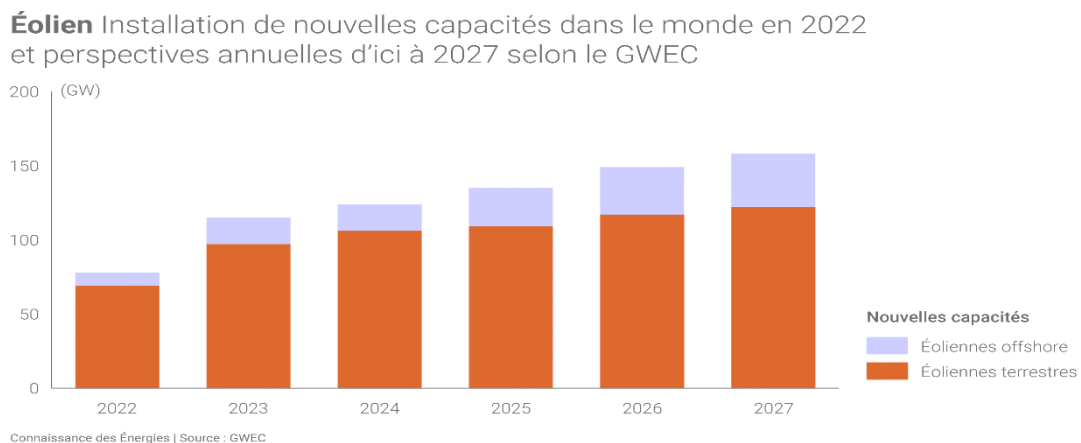
. Au total, ils représentaient 71% des installations mondiales l'année dernière, soit collectivement 3,7% de moins qu'en 2021. Cela était principalement dû aux deux plus grands marchés du monde, la Chine et les États-Unis, perdant une part de marché combinée de 5% par rapport à l'année précédente - la deuxième année consécutive où les deux pays ont perdu des parts de marché[www06]



FigureI-15: Capacité mondiale installée en GW [www06]

I.9 Les prévisions du GWEC d'ici à 2027 :

D'ici à 2024, les experts du GWEC s'attendent à ce que les installations d'éoliennes terrestres passent le cap des 100 GW annuels, tandis que plus de 25 GW de capacités offshore pourraient être installées en une seule année pour la première fois en 2025 ». Au total, le GWEC estime que près de 680 GW de capacités éoliennes pourraient être installées dans le monde au cours des 5 prochaines années (2023 à 2027), dont 130 GW en offshore[www01].



FigureI-16: prévisions du GWEC d'ici à 2027 [www01]

I.10 Application des éoliennes:

🔧 Systemes Isolés :

En général, les systèmes isolés utilisent diverses formes de stockage d'énergie. Ce stockage peut être réalisé à l'aide de batteries, pour lesquelles un dispositif de régulation de la charge et de la décharge est nécessaire. Le contrôleur de charge vise principalement à prévenir les dommages au système de batterie causés par des surcharges ou des décharges profondes. Pour alimenter des équipements fonctionnant sur un réseau alternatif, l'utilisation d'un onduleur est indispensable[24].

🔧 Systemes Hybrides:

Les systèmes hybrides intègrent plusieurs sources d'énergie telles que des turbines éoliennes, des générateurs Diesel et des modules photovoltaïques, entre autres. Cette diversité de sources d'énergie[24].

🔧 Systemes Liés au Réseau :

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne [38]. est connectée à de grands réseaux électriques. Cette préférence s'explique par les nombreux avantages du fonctionnement des centrales éoliennes sur les réseaux: la puissance des turbines éoliennes n'a

pas besoin d'être ajustée en fonction de la demande instantanée d'un client spécifique, et le manque de puissance fournie par les éoliennes est compensé par les centrales conventionnelles[24].

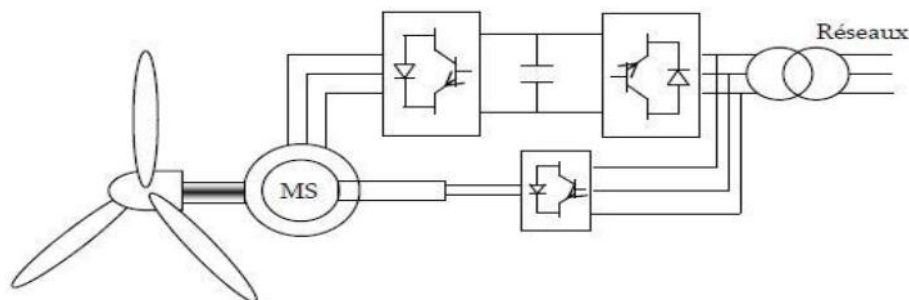
I.11 Types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliennes

➤ à vitesse variable :

✚ Système utilisant une génératrice synchrone :

Le principal inconvénient des éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné est que le rotor ou l'inducteur bobiné nécessite un système de bagues lisses, de balais ou un système à diodes rotatives sans contact, comme dans les alternateurs classiques de production, pour produire du courant continu. Pour pallier ces inconvénients, certains fabricants ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles, directement couplées à la turbine, évitant ainsi l'utilisation d'un multiplicateur. De plus, si la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais peut être éliminé. Cependant, l'inconvénient de cette structure est qu'elle nécessite des convertisseurs de puissance pour se connecter au réseau.

Dimensionnés pour correspondre à la puissance nominale de la génératrice, cet inconvénient peut néanmoins être considéré comme un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement maîtrisé via le convertisseur connecté à ce dernier, tandis que le convertisseur relié à la génératrice permet de contrôler la puissance produite en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent[15], [16].





 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné.

Lorsqu'elle est directement connectée au réseau électrique, la vitesse du MSRB est fixe et déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine.

L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système sans balais avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système. [38].

Générateur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP).

La capacité d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, le rendant ainsi adapté à une utilisation dans les systèmes de génération éolienne. En fait, parmi les petites turbines, sa rentabilité et sa simplicité en font le générateur le plus largement utilisé. Cependant, pour des applications de plus grande puissance, la présence d'aimants et le convertisseur (qui doit gérer toute la puissance générée) le rendent moins compétitif [38].

I.12 Evolution des systèmes de (G VV) vers la double alimentation.

Le système idéal de GVV éolien doit se composer d'un nombre minimal d'éléments capables d'optimiser le transfert de l'énergie éolienne. La réduction de la puissance du convertisseur statique permet de minimiser les composants de filtrage et de conversion, d'améliorer la fiabilité de l'électronique, de réduire les coûts et d'améliorer la qualité de l'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et à l'augmentation de la fréquence de hachage). Cette topologie est le choix optimal des fabricants. [44].

générateur asynchrone.

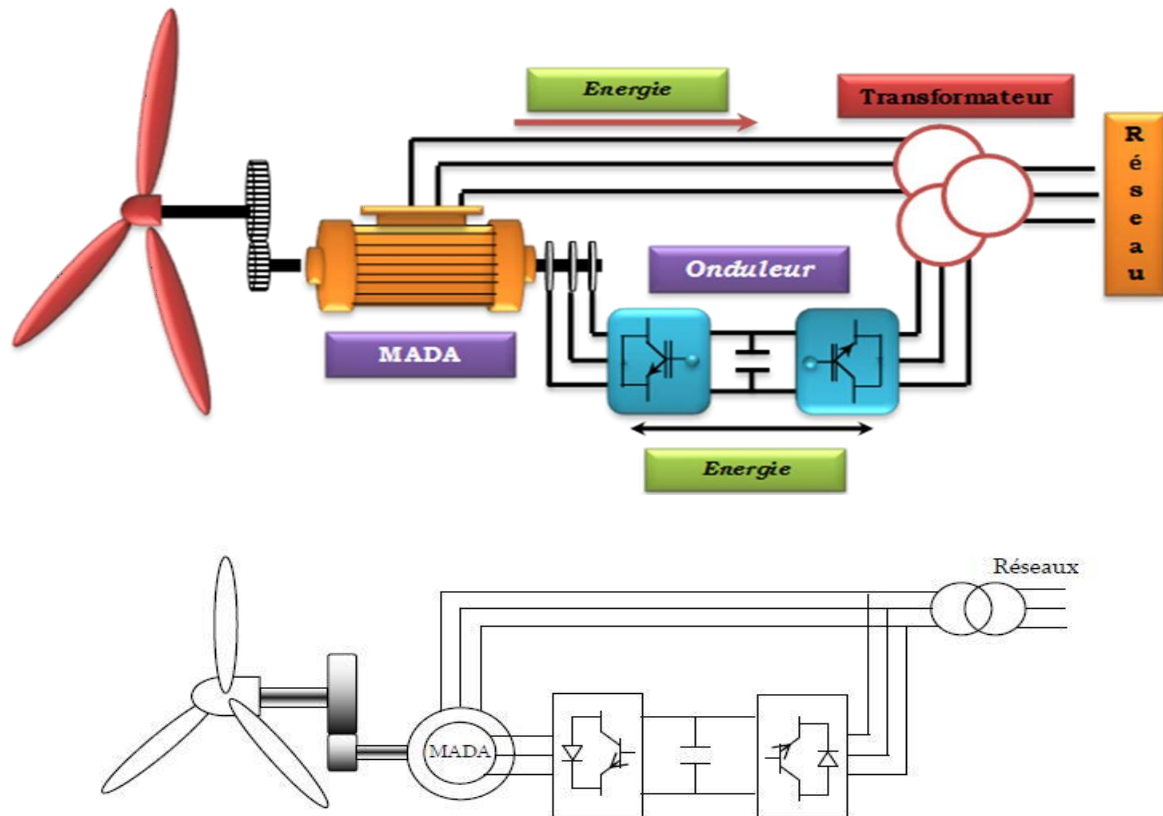
La plupart des générateurs utilisés dans les éoliennes sont des générateurs asynchrones triphasés. Ils présentent plusieurs avantages: ils sont robustes, peu coûteux et mécaniquement simples. De plus, ils présentent l'inconvénient de consommer de l'énergie réactive, soit prélevée sur le réseau, soit compensée par un ensemble de condensateurs et pouvant ainsi fonctionner de manière autonome. Il existe deux types de moteurs asynchrones: les moteurs asynchrones à cage d'écureuil et les moteurs asynchrones à rotor bobiné.

Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné.

Ce genre d'éolienne a connu un développement récent car la double alimentation de la machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [49]. Le stator est directement connecté au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont contrôlées par un convertisseur statique (Figure I.19).

L'ajustement de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et à l'amplitude nominale du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [44]. Le dimensionnement du convertisseur est proportionnel au glissement maximal du rotor, autrement dit, il dépend de l'écart maximal entre la vitesse de synchronisme et la vitesse réelle du rotor, [37], [44], [38].

Si, par exemple, une plage de variation de vitesse de $\pm 30\%$ autour du synchronisme est prévue, il sera nécessaire de choisir un convertisseur d'une puissance quatre fois inférieure à la puissance nominale de génération (la plage de vitesses utiles de la MADA se situe entre 25% et 50% de la vitesse nominale), [44], [37]. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage, avec lesquelles elles ont en commun le besoin d'un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de systèmes à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines, [50]



FigureI-18: schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée par le rotor.

I.13 Les principaux points forts de la MADA sont les suivants [38]:

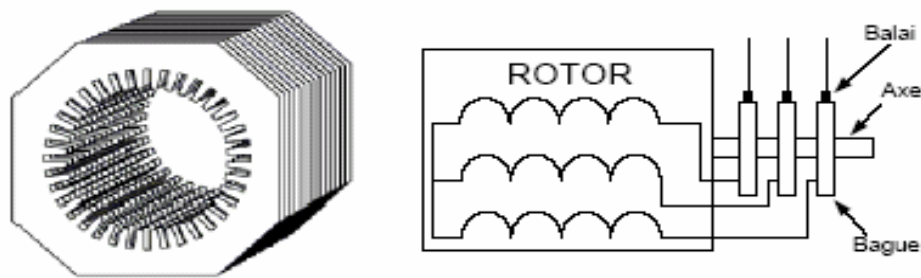
- Sa capacité à commander la puissance réactive, permettant ainsi de dissocier la commande des puissances active et réactive.
 - Sa capacité à s'aimanter à partir du rotor sans prélever la puissance réactive nécessaire sur le réseau.
 - Sa capacité d'échange de puissance réactive avec le réseau pour réguler la tension.
 - La capacité du convertisseur dépend non seulement de la puissance totale du générateur, mais également de la plage de vitesse sélectionnée. En réalité, le coût du convertisseur augmente avec l'élargissement de la plage de vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
 - Son inconvénient réside dans l'obligation d'avoir des bagues et des balais.
- *Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.
- Afin de résoudre le problème de la présence de bague-balais, les chercheurs: [51], [52], [53], [44],

Ils présentent une alternative sous la forme d'une machine asynchrone à double alimentation sans balais (brushless). On envisage même d'utiliser deux machines sur le même arbre, l'une pour la production électrique et l'autre pour l'alimentation des enroulements rotoriques, [54].

I.14 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade:

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements [21].

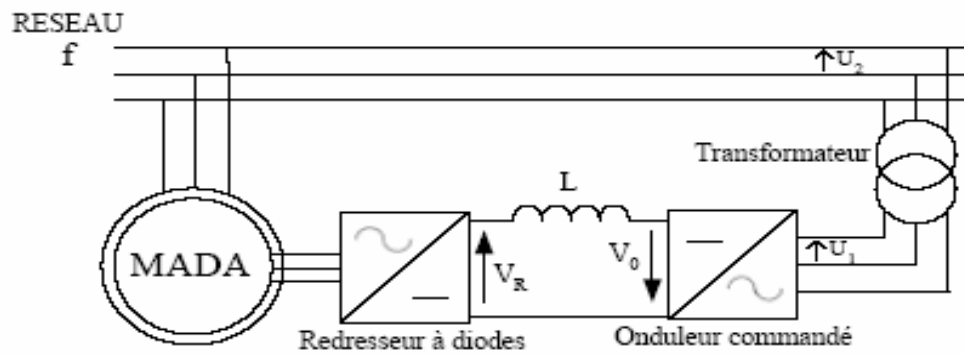
La particularité de cette machine réside dans le fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil moulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais qu'il est constitué de trois enroulements connectés en étoile, dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices. Lorsque la machine tourne, des balais viennent frotter ces bagues conductrices (figure 1.13).



FigureI-19: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [2]

Lorsqu'il est en marche, la principale utilité du moteur asynchrone à rotor bobiné réside dans sa capacité à modifier les caractéristiques du bobinage rotorique, notamment en connectant des rhéostats pour limiter le courant et accroître le couple au démarrage, ainsi que pour élargir la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone[1].

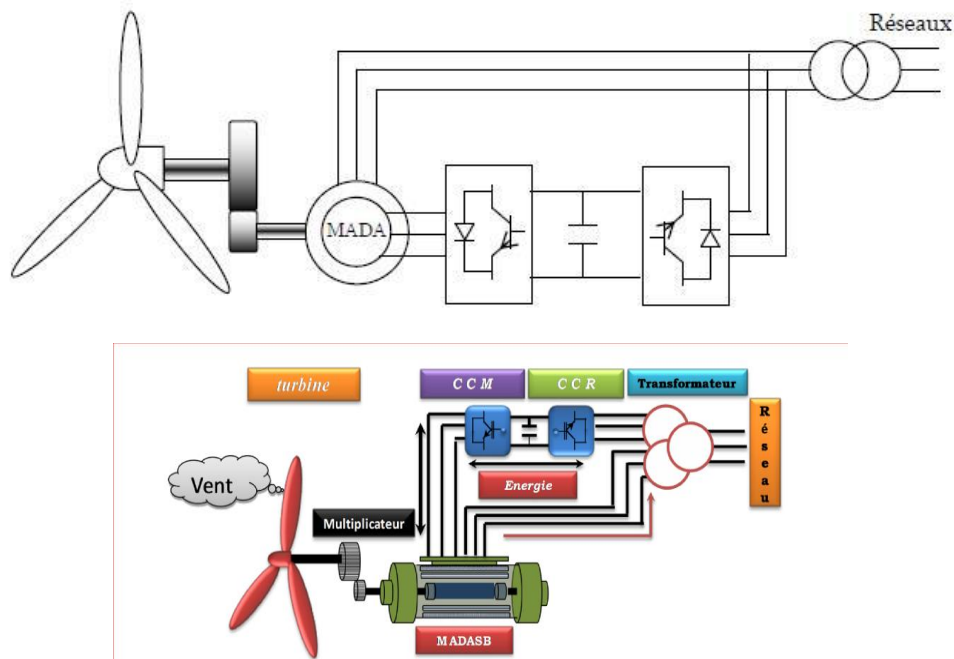


FigureI-20: Cascade hypo synchrone.

Il y a différentes technologies de double alimentation asynchrone et plusieurs options d'alimentation possibles. Chaque configuration présente ses propres avantages et inconvénients.

I.15 Machine Asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB).

Un rotor à double enroulement offre un avantage majeur à une machine à induction. Son principe est dérivé de la cascade hyposynchrone: le stator (ou rotor) est connecté au réseau à tension et fréquence constantes tandis que le rotor (ou ballast) est connecté au réseau via un convertisseur de fréquence (plus ou moins répandu). Si la différence de vitesse requise est réduite à environ la même vitesse il est alors possible de réduire la taille du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) [17].



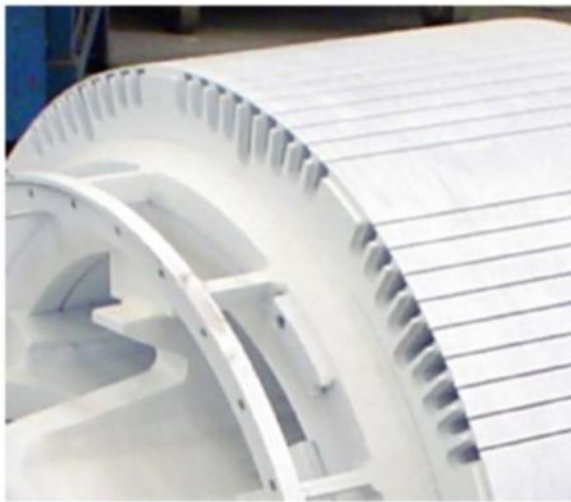
FigureI-21: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

Une des solutions très intéressantes qui permet d'obtenir des changements de vitesse de rotation Environ 30% de la vitesse synchrone consiste à coupler le générateur double alimentation au rotor via deux onduleurs PWM triphasés dont un en mode redresseur, Un autre fait même office d'onduleur de réseau (Fig. 1.12), [16], [18].

Les principaux avantages de ce système éolien sont que le convertisseur est situé du côté de la machine et Transmettre l'énergie glissante et l'acheminer vers le réseau, pas Les dimensions s'appliquent uniquement à certaines puissances nominales de MADA. En effet, si nous Considérez MADA fonctionnant à la puissance nominale en mode Super synchrone, le glissement maximum est égal à 30%, donc notre glissement maximum est de 25%.

La puissance nominale de la machine traversant le convertisseur.Ceci permet Convertisseur de taille pour 25% à 30% de puissance La valeur nominale de la machine [19].

Malgré les contacts glissants, la plupart des projets éoliens reposent sur l'utilisation Moteur asynchrone entraîné par un rotor. Insérer le convertisseur entre le rotor et le rotor Le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau et également La vitesse du rotor vers le réseau est supérieure à la vitesse synchrone. C'est la raison principale Nous avons constaté que ce générateur peut produire une puissance élevée.

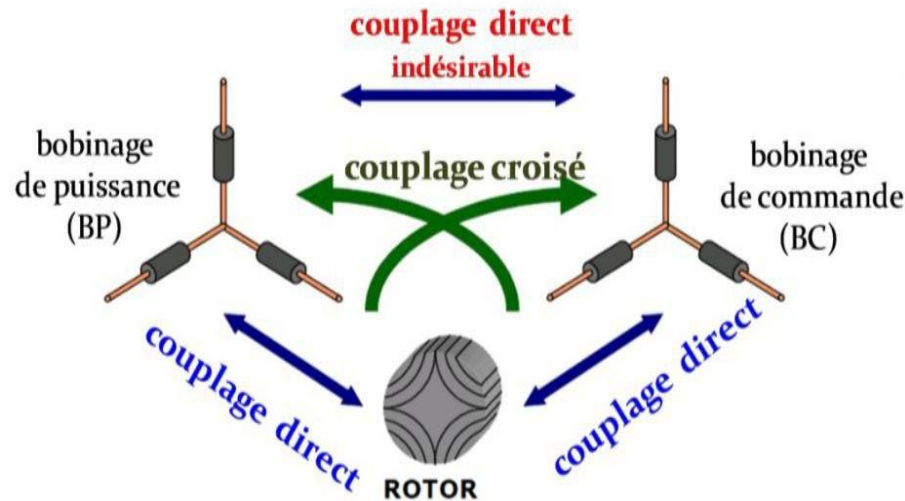


a



b

(a) Rotor sans conducteur; (b) Rotor Bobiné [55].



FigureI-22: Schéma de couplage croisé entre les deux stators.

I.16 Les Avantages et les Inconvénients de la MADA :

+ Les Avantages :

- *Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA).
- *Machine robuste avec une capacité de surcharge grande et une facilité d'installation dans des environnements hostiles (avantage équivalent à celui de la MAC).
- *Coûts d'installation et de maintenance réduits par rapport à la topologie MADA.
- *Élimination des oscillations produites par le rotor bobiné.

+ Inconvénients de la MADA :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Utilisation des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage [21].

➤ Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La figure 1.13 montre une configuration classique d'une éolienne utilisant MADA. MADA est un générateur à rotor bobiné doté d'un système de brosses et de bagues collectrices. Le stator de la machine est directement connecté au réseau et le rotor est connecté au réseau via une série de commutateurs électroniques avec le bus DC intermédiaire. Le MADA est alimenté par la tension du secteur et la tension de sortie du convertisseur de puissance électronique à fréquence variable connecté au rotor. La chaîne de commutation

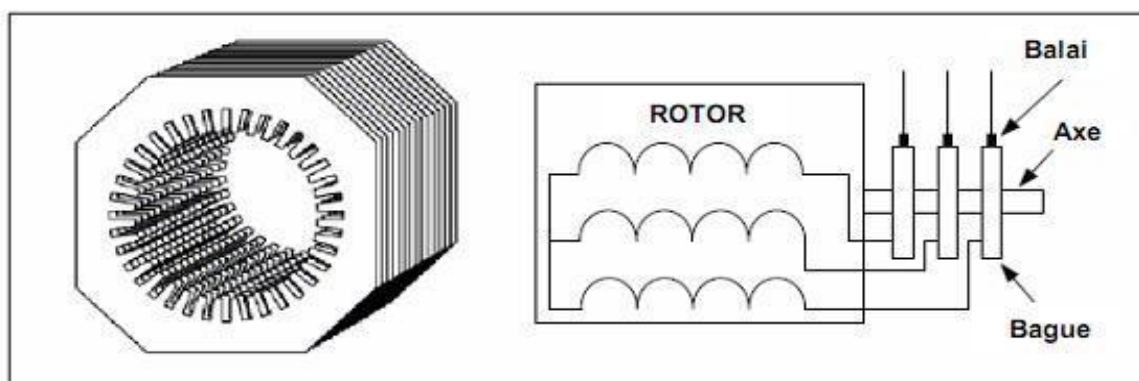
électronique reliée au rotor doit être bidirectionnelle pour obtenir des vitesses de rotation faiblement synchrones ou super-synchrones. Ceci est réalisé par deux convertisseurs (côté rotor et côté réseau) avec un bus DC. Le convertisseur de tension côté réseau est connecté à trois bobines ce qui permet de filtrer les harmoniques de courant [22].

En raison de ce glissement de contact le système MADA nécessite une maintenance plus régulière que les machines asynchrones à cage. La brosse doit frotter contre les anneaux pour établir effectivement le contact électrique entre ces deux pièces. Mais le frottement entre les deux pièces génère de la chaleur mais celles-ci sont surtout utilisées. Les poils sont généralement constitués d'un matériau plus dur (graphite) que les anneaux et doivent donc être remplacés lorsqu'ils sont usés. Il s'agit donc d'un inconvénient important de ce type de MADA mais l'utilisation de machines asynchrones brushless dual-feed (machines à induction à doubles poils de brosse) permet un entretien moins fréquent [23].

➤ Structure et principe de fonctionnement de la MADA:

Un moteur à induction bicarburant à rotor bobiné (MADA) possède un stator et un rotor triphasés similaires à ceux d'un moteur à induction conventionnel les enroulements triphasés étant alimentés par trois anneaux équipés de contacts glissants. Les machines intégrées aux systèmes éoliens ont généralement un stator connecté au réseau et l'énergie du rotor varie en fonction des différents systèmes décrits ci-dessous. Le convertisseur utilisé n'est évalué qu'à une fraction de la puissance nominale de la machine. Le coût supplémentaire lié au placement des enroulements dans le rotor peut être compensé par les économies réalisées sur le convertisseur [3].

Le fonctionnement d'un moteur synchrone à vitesse constante est le même en raison de la fréquence appliquée aux deux induits en mouvement et les caractéristiques asynchrones sont liées à la différence de vitesse entre le champ magnétique du stator et du rotor. Sa magnétisation est assurée par l'apport de deux armatures alimentées en courant alternatif. Cette opération peut être résumée par le terme moteur synchrone à excitation alternative.



FigureI-23: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Les trois enroulements du rotor sont connectés au convertisseur électronique de puissance via des balais coulissants sur l'anneau du rotor qui assurent une alimentation secondaire à travers le rotor. Les convertisseurs mécaniques asynchrones et les assemblages de transformateurs sont appelés cascades hypo- ou hypersynchrones selon le mode de fonctionnement [24].

➤ **Modes de fonctionnement de la MADA:**

MADA peut être entièrement contrôlé si le flux de puissance dans les enroulements du rotor est correctement contrôlé. Le MADA peut fonctionner comme moteur ou générateur à des vitesses semi-synchrones et super-synchrones la machine dispose donc de quatre modes de fonctionnement. Le principe de contrôle de MADA dans ce mode peut être compris à partir de la figure (1. .14) et détermine respectivement les sorties stator-rotor et machine [23].

En négligeant les pertes, on peut généraliser le transfert des puissances montré dans tableau 1.1 comme suit :

Tableau I.2: Quadrants de fonctionnement de la MADA.

Moteur	Générateur
hypo-synchrone $g > 0$	hypo-synchrone $g > 0$
hyper-synchrone $g < 0$	hyper-synchrone $g = 0$

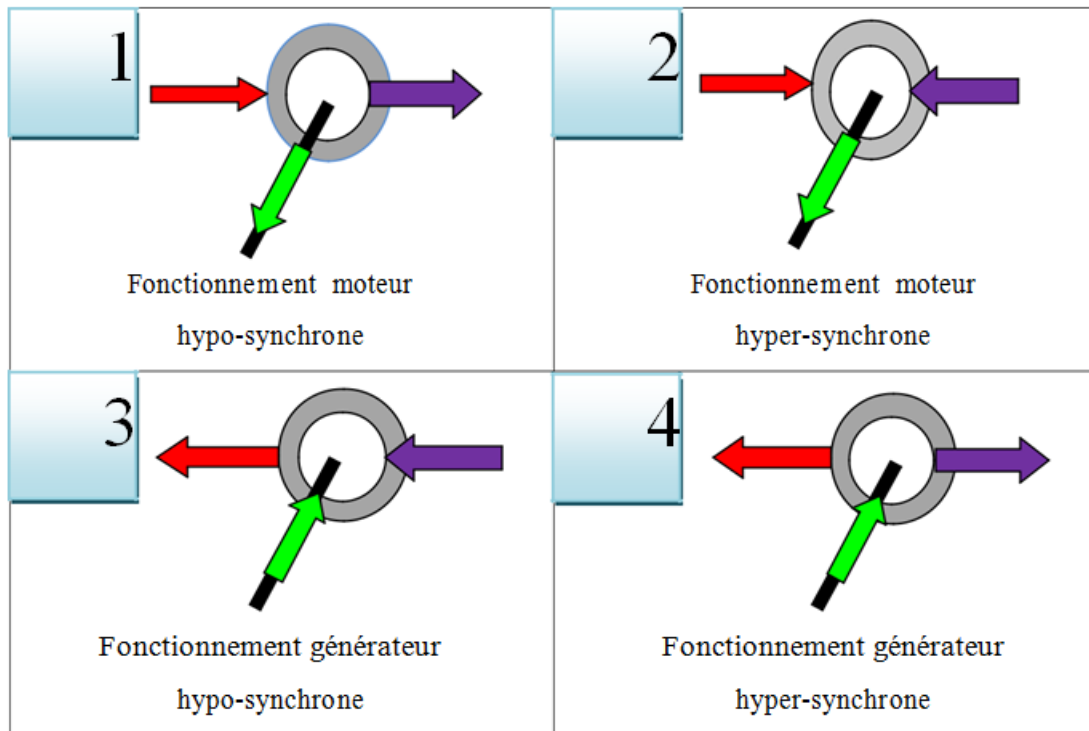
Lorsqu'une machine fonctionne en moteur :

*Mode synchrone faible: l'alimentation est fournie via le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse synchronisée la force de cisaillement est retransférée au réseau.

*En mode super-synchrone: une partie de la puissance absorbée du secteur entre dans le rotor et est convertie en puissance mécanique.

*En mode faible synchronisation. Une partie de l'énergie traversant le stator est réabsorbée par le rotor.

En mode super-synchrone: toute la puissance mécanique fournie à la machine est transférée au réseau jusqu'à sa perte. Cette unité d'énergie vient de g . Elle est transmise par le rotor. [24]



FigureI-24: Modes opérationnels caractéristiques de la MADA

➤ **Comparaison des topologies et choix de la MADASB**

MADASB a été proposé par René Spee et ses collègues de l'Université d'Etat de l'Oregon aux États-Unis et a déposé une demande de brevet pour le modèle en régime permanent et le modèle de la machine basé sur les premiers résultats de recherches. Au cours des années 1990 un certain nombre d'études notamment sur la conception de simulation [LI-91] et le contrôle de machine [35] [36] ont été publiées.

Le tableau suivant synthétise les caractéristiques principales de chaque structure de conversion:

Tableau I.3: Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE, [35].

	1 ^{ère} 1 ^{ère} génération Machine Asynchrone à Cage MAC	2 ^{ème} 2 ^{ème} génération Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA	3 ^{ème} 3 ^{ème} génération Machine Asynchrone à Double Alimentation Sans Balais MADASB
<i>Limitation de la plage de vitesse</i>	Non	Oui	Oui
<i>Puissance du convertisseur</i>	100 % de la P_e	25 % de la P_e	25 % de la P_e
<i>Distorsion harmonique</i>	Haute	Basse	Basse
<i>Cout de maintenance</i>	Bas	Moyen/Haut	Bas
<i>Cout de l'ensemble machine-convertisseur</i>	Moyen/Haut	Moyen	Moyen/Bas
<i>Robustesse, fiabilité</i>	Haute	Moyenne	Haute

Compte tenu des avantages de MADASB cette dernière machine devrait être la troisième génération d'éoliennes. En outre l'industrie évolue du GVC classique au GVV basé sur les structures MADA. Il existe aujourd'hui un grand nombre d'éoliennes basées sur GVV utilisant des structures MADA. Les fabricants choisissent ces machines pour des raisons de coût et de fiabilité. Ces moteurs sont utilisés depuis longtemps dans une grande variété d'applications leur disponibilité est donc très élevée permettant la réutilisation de technologies de contrôle et de pièces de rechange de modèles industriels antérieurs [35].

➤ **Machine asynchrone à cage d'écureuil**

Contrairement à d'autres méthodes traditionnelles de génération de courant électrique où un générateur synchrone est largement utilisé il s'agit d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil qui est actuellement installé dans de nombreuses éoliennes à travers le monde.

Ainsi les éoliennes de dimensions importantes (puissance élevée et grands rayons de pales) ont de faibles vitesses de rotation. Cependant il est impossible de concevoir un générateur asynchrone lent avec un rendement suffisant donc un réducteur mécanique doit être intercalé entre la turbine et le générateur asynchrone.

La plupart des applications utilisant des moteurs à induction sont alimentées par des moteurs électriques (qui représentent un tiers de la consommation électrique mondiale) mais ils sont entièrement réversibles robustes peu coûteux et ne nécessitent ni balais ni collecteurs

ni contacts glissants. Avantages.

Les anneaux sont idéaux pour une utilisation dans des conditions extrêmes que l'on retrouve parfois dans les centrales éoliennes.

Par exemple, les caractéristiques couple-vitesse de deux paires de moteurs asynchrones

Le nombre de pôles est indiqué sur la figure (1.10) [1].

Afin d'assurer un fonctionnement stable de l'équipement, le générateur doit maintenir une certaine vitesse Rotation proche de la synchronisation ($g=0$ point), dans le cas des caractéristiques suivantes (Fig. 1.10), la vitesse du générateur doit être maintenue entre 1500 et 1600 tr/min.

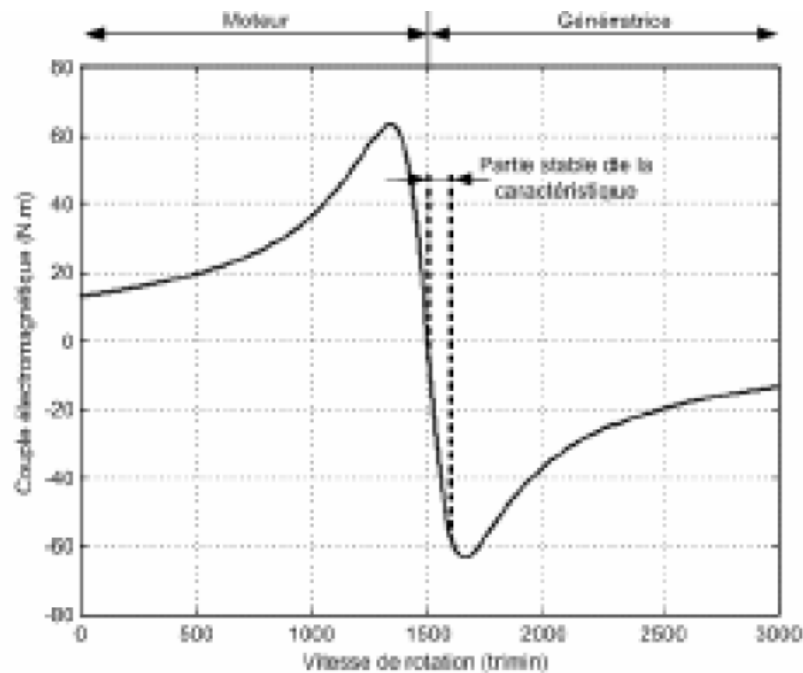
Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé est le couplage mécanique Le rotor du moteur asynchrone à l'arbre d'entraînement de l'éolienne Directement connecté au stator de la machine via multiplicateur de vitesse au réseau (Figure 1.11).

La machine possède un nombre fixe de paires de pôles et doit donc fonctionner dans une certaine plage Vitesse très limitée (moins de 2% de glissement). Fréquence imposée par le réseau si Le glissement devient trop important, le courant statorique de la machine augmente et Peut devenir destructeur.

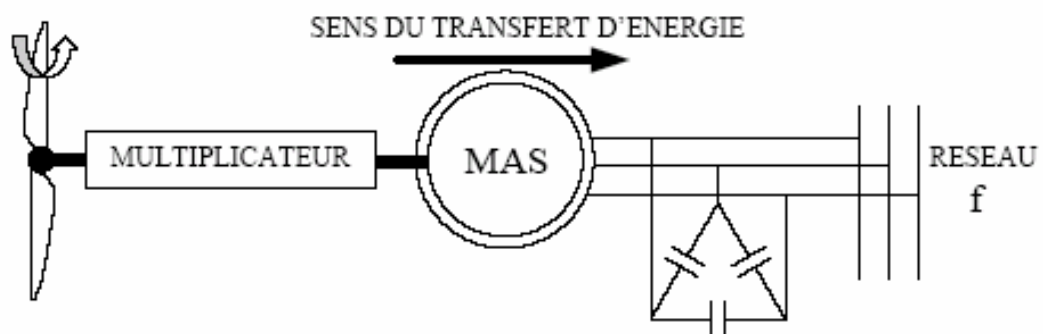
Le système est simple à configurer (pas d'interface entre stator et réseau, et Aucun contact glissant) permet de réduire la maintenance de la machine.

Cependant, ce type de convertisseur électromécanique consomme de l'énergie réactive Nécessaire pour magnétiser le rotor du moteur, ce qui réduit le facteur de puissance Réseau global, mais pourrait être amélioré en ajoutant de la capacité Comme le montre la figure (1.11), elle devient la seule source de puissance réactive du système.

La situation des éoliennes fonctionnant de manière autonome.



FigureI-25: Caractéristique couple- vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles [2].



FigureI-26: Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau[2].

Une autre solution consiste à utiliser un générateur asynchrone triphasé car Les éoliennes raccordées au réseau sont réalisées grâce à des équipements électroniques de puissance (Figure 1.26).

Les éoliennes fonctionnent avec des générateurs à vitesse variable qui produisent un courant alternatif à fréquence variable. L'utilisation de deux convertisseurs de puissance permet de séparer la fréquence du réseau de la fréquence variable du courant machine en créant un bus DC intermédiaire.

Cette structure permet à la tension du bus CC de varier sur une certaine plage tout en filtrant les fortes fluctuations de puissance générées par le condensateur [2].

Les différents inconvénients de ce système sont le coût élevé de l'électronique de puissance et les pertes dans le convertisseur de puissance. Ces convertisseurs

sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes.

Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

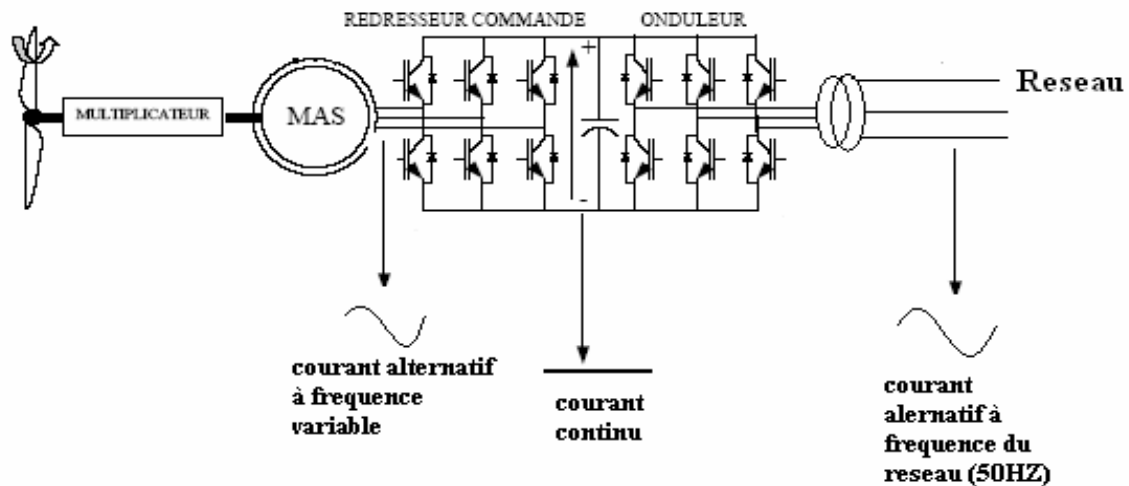


Figure I-27: Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance[2].

Malgré la simplicité et la qualité de la puissance et du coût les machines asynchrones à cage ne sont utilisées dans les systèmes éoliens que lorsqu'elles sont connectées directement au réseau la vitesse de rotation doit rester pratique pour que la machine reste proche de la vitesse synchrone. Cette limitation réduit l'efficacité de l'éolienne en cas de vitesses de vent élevées.

Ces observations nous permettent d'utiliser des machines asynchrones (MADA) comme alternative aux machines à cage.

I.17 Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur:

Les composants semi-conducteurs de puissance sont des composants importants pour la conversion de l'énergie statique. Ils sont principalement à base de silicium et sont utilisés pour la commutation :

- A l'état bloqué (idéalement interrupteur allumé) ils doivent supporter des tensions élevées (tension source, voire tensions supérieures),
- Que ce soit en conduction, en saturation (interrupteur idéalement fermé), ils doivent permettre une grande quantité de courant sans provoquer de chute de tension trop importante.

Tableau I.4: Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur [12]

	Type d'interrupteur à semi-conducteur				
	GTO	IGCT	BJT	MOSFET	IGBT
Tension max(V)	6000	6000	1700	1000	6000
Courant max(A)	4000	2000	1000	28	1200
Intervalle de la fréquence de commutation(KHz)	0.2-1	1-3	0.5-5	5-100	2-20
Technique de commande	Haute	Base	Moyenne	Basse	Basse
Domaine d'application	Très fortes puissance	Fortes puissance	Moyenne et fortes puissance	Faibles puissance	Moyenne et fortes puissance

Conclusion:

Ce chapitre a permis de développer un ensemble de solutions électrotechniques possibles pour la production d'électricité à partir d'éoliennes. Des méthodes fonctionnelles sont exécutées. C'est dit. Plus tard trois grandes familles de machines de commutation électromécaniques ont été introduites dans les systèmes éoliens: les machines asynchrones les machines synchrones et les machines à structure spéciale. Un système de puissance pneumatique basé sur une machine asynchrone à double puissance sans balais combine les avantages du dispositif. MAC et MARB offrent un bon compromis entre la plage de changement de vitesse et la taille du convertisseur en fonction de la puissance nominale du moteur. Cette dernière machine vise à construire la troisième génération d'éoliennes.

Chapitre II

MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation du système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB). Dans un premier temps, on a modélisé chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation sans balais en mode générateur. Les modèles ont été développés en vue d'une exploitation par le logiciel Matlab/Simulink, qui permet de mettre en place assez rapidement des modèles.

II.2 MODÉLISATION DE LA PARTIE MÉCANIQUE DE L'EOLIENNE

Dans cette section, nous introduisons les principes de base des interactions entre pales. Les éoliennes et le vent dérivent des expressions simplifiées pour la puissance convertie. Différentes techniques utilisées pour limiter ou contrôler ce pouvoir sont brièvement présentées. Schéma du système éolien basé sur MADASB connecté au réseau, comprend différentes quantités mécaniques et électriques pour la modélisation. Chaîne de conversion électromécanique, comme le montre la figure (II.1)

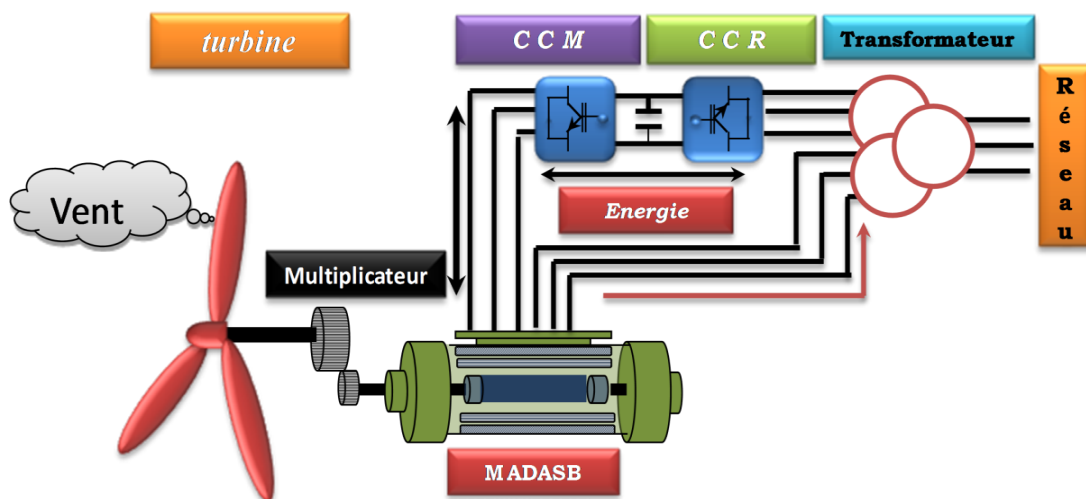


Figure II.1: Schéma du système éolien basé d'une (MADASB) ou (BDFIG)

II.3 Modélisation de la turbine

Les éoliennes sont des machines qui convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. Le mécanisme étudié ici est constitué d'une éolienne de puissance nominale constituée de pales de longueur R entraînant une génératrice par un multiplicateur de vitesse de gain G . Le coefficient de puissance C_p représente l'efficacité aérodynamique d'une éolienne. Cela dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle de pas β de la pale. [20]

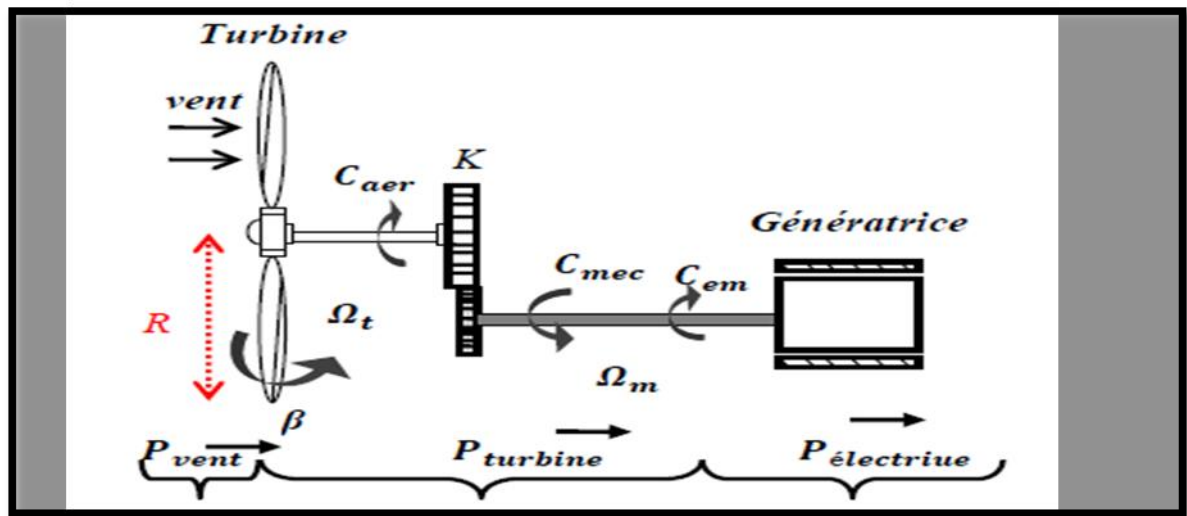


Figure II.2: Schéma de conception d'une turbine éolienne

✓ La force aérodynamique ***P_{turbine}*** que la turbine convertit à partir du vent dépend du coefficient de puissance C_p .

Il est donné par

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

Avec:

$$\lambda = (R \cdot \Omega_t / V) \quad (II.2)$$

➤ λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

➤ Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.

➤ V : Vitesse moyenne du vent. Ainsi, le couple aérodynamique se produisant sur la turbine est fonction de cette puissance et est donné par :

$$C_{aero} = (P_{aero} / \Omega_t) = (\lambda, \beta) \cdot (1/2 \cdot \Omega_t) \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (II.3)$$

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie par l'équation mathématique suivante :

$$P_{ven} = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (II.4)$$

Où :

✓ $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$: La densité d'air ou masse volumique de l'air dans les conditions normales de température et de pression.

✓ V : La vitesse du vent.

✓ R : La longueur de la pale.

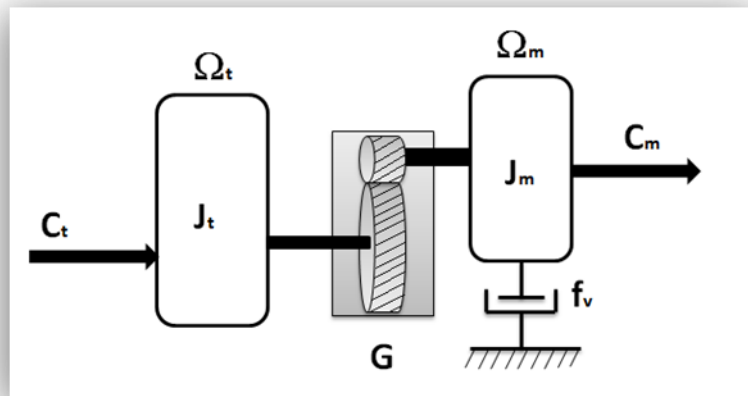
II.3.1 Modèle mécanique simplifié de la turbine

La turbine est constituée de trois pales de longueur R dans sa partie mécanique. Elles sont attachées à un arbre d'entraînement qui tourne à une vitesse Ω_t , ce dernier est connecté à un deuxième arbre en sortie grâce à un calculateur de gain G .

Le moment d'inertie J_t est une caractéristique de l'arbre d'entraînement des pales.

• *L'arbre d'entraînement en sortie transmet un couple mécanique C_m , tourne à une vitesse Ω_m et a un moment d'inertie J_m .*

Lorsque la vitesse du vent est réparti de manière uniforme sur toutes les pales et que toutes les forces de poussée sont égales ($F_1=F_2=F_3$), il est possible de regrouper toutes les trois pales en une seule, ce qui entraînera la création d'un système mécanique qui sera caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques, comme illustré dans la figure II.3. [17] [20][21]



FigureII. 3:Modèle mécanique simplifiéde laturbine

II.3.2 Le coefficient de puissance:

Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance, C_p , exprimé en fonction de la vitesse relative λ , qui représente le rapport entre la vitesse de pointe de l'éolienne Ω_t et la vitesse instantanée du vent, soit

$$\lambda = \frac{(R.\Omega_t)}{V_v} \quad (\text{II.5})$$

La figure II.3 met en évidence la variation du coefficient de puissance commun C_p en fonction de la vitesse de réduction λ pour différents types d'éoliennes. [16]

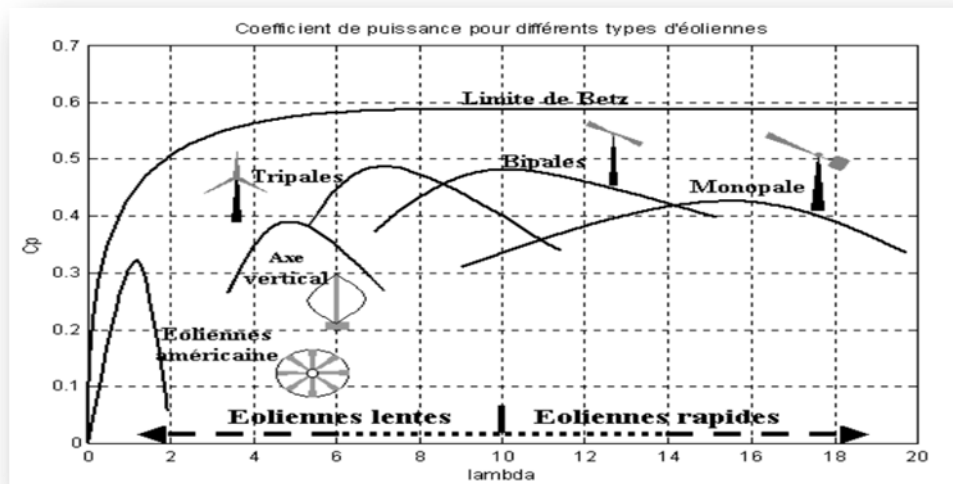


Figure II.4: Coefficient de puissance pour différents types d'aérogénérateurs

II.5.3 Evolution de coefficients d'un aérogénérateur(C_p, λ, β):

Différentes formules sont disponibles pour calculer le coefficient de puissance C_p , nous avons utilisé expressions ci-dessus: [17][23][24] [25].

$$C_p = (0.5 - 0.167 \cdot (B - 2)) \cdot \left(\frac{\sin((\pi \cdot (\lambda + 0.1)) / (18.5 - (0.3 \cdot (B - 2))))}{(18.5 - (0.3 \cdot (B - 2)))} \right) - (0.00184 \cdot (-3) \cdot (B - 2)) \quad (II.15)$$

✓ Remarque

- Il convient de souligner que pour ajuster la puissance obtenue, il vous suffit de changer l'angle de calage des pales β dans une plage de vitesse de vent préétablie (par le fabricant)

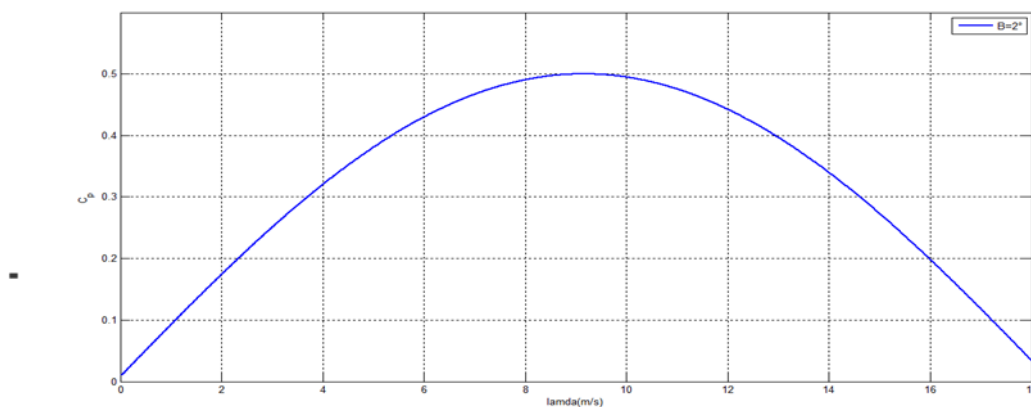


Figure II.5: Caractéristique $C_p = f(\lambda)$ pour $\beta = 2^\circ$

Afin de maximiser la puissance mécanique à une vitesse du vent spécifique, il est nécessaire de régler les pales avec un angle β , afin d'obtenir la valeur maximale.

- Il est possible d'obtenir le coefficient de puissance C_p en utilisant l'équation $C_p = f(\lambda)$

pour une vitesse relative λ optimale, comme illustré dans la figure II.6.

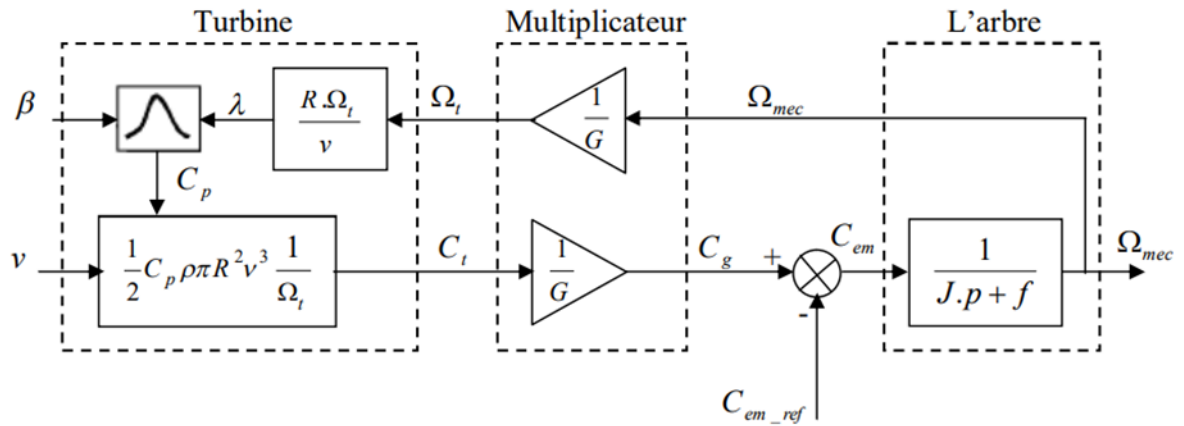


Figure II.6: Modèle de l'aérogénérateur

II.4 Stratégie de commande de la turbine éolienne:

II.4.1 Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable:

Grâce à une recherche documentaire, nous avons identifié deux méthodes d'identification des zones opérationnelles :

Trois zones peuvent être utilisées pour définir le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable, comme le montre la Figure II.15: Les conditions idéales sont définies par la fonction $f(\Omega_m, P_m)$ [18][19].

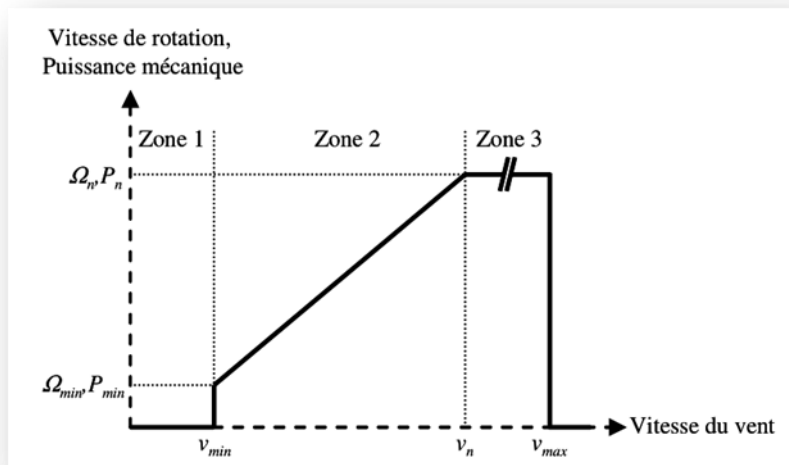


Figure II.7: Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [27]

Zone I: La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre à l'éolienne de démarrer, et la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont égales à 0.

Zone II: Le démarrage est possible lorsque le vent atteint une vitesse minimale de v_{min} . Jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n , correspondant aux valeurs nominales

de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n , l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal.

Zone III: Afin d'éviter la détérioration de l'éolienne, lorsque 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. Par exemple, pour limiter le rendement de l'éolienne, les pales peuvent être orientées différemment. Afin d'éviter toute destruction de l'éolienne, une procédure d'arrêt est effectuée dès que le vent atteint sa valeur maximale v_{max} .

On peut facilement constater à partir des deux méthodes que les zones II sont identiques et dépendent de notre cas d'étude (pour des angles constants).

Il existe un certain nombre de méthodes de commande différentes pour contrôler le couple électromagnétique appliqué au rotor de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans cette zone [17]. Ces méthodes peuvent être utilisées pour ajuster la vitesse de rotation afin de maximiser la puissance électrique produite. Cette méthode est appelée MPPT (maximum power point tracking). Il existe deux modes de contrôle distincts :

- 1: l'asservissement de la vitesse de rotation.
- 2: Le contrôle de la vitesse de rotation sans asservissement

II.4.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation:

Il suffit de fixer la vitesse de rotation de l'arbre de la machine en réglant le couple électromagnétique. Pour y parvenir, il faut asservir la vitesse de rotation de l'arbre de la machine.

La figure II.16 représente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne avec asservissement de la vitesse de rotation.

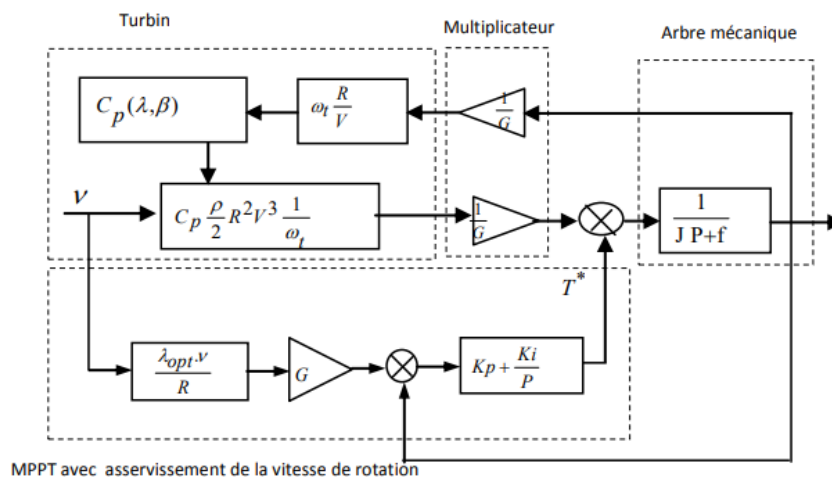


Figure II.8: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Le bloc de contrôle MPPT produit un couple électromagnétique de référence C_{em-ref} via un régulateur de type proportionnel intégral (PI) (figure II.16). Cela nous a permis de limiter la vitesse de rotation Ω_m et de réduire l'impact du couple mécanique C_m considéré comme une perturbation.

La vitesse de rotation Ω_{t-ref} de référence peut être exprimée de la manière suivante en utilisant l'équation II. 14 :

$$W_{t-ref} = \frac{\gamma_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (II.6)$$

II.5 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation:

Dans le régime permanent, la vitesse du vent est très faible, ce qui suggère que le couple d'accélération ($C_m - C_{em}$) de la turbine peut être considéré comme nul (appliqué à l'équation II. 22). En outre, si l'on ne prend pas en compte l'impact du couple causé par les frottements visqueux ($f_v \cdot \Omega_m = 0$) par rapport au couple mécanique C_m , nous pouvons alors formuler :

Le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation est représenté sur la figure II.18: [16][17]

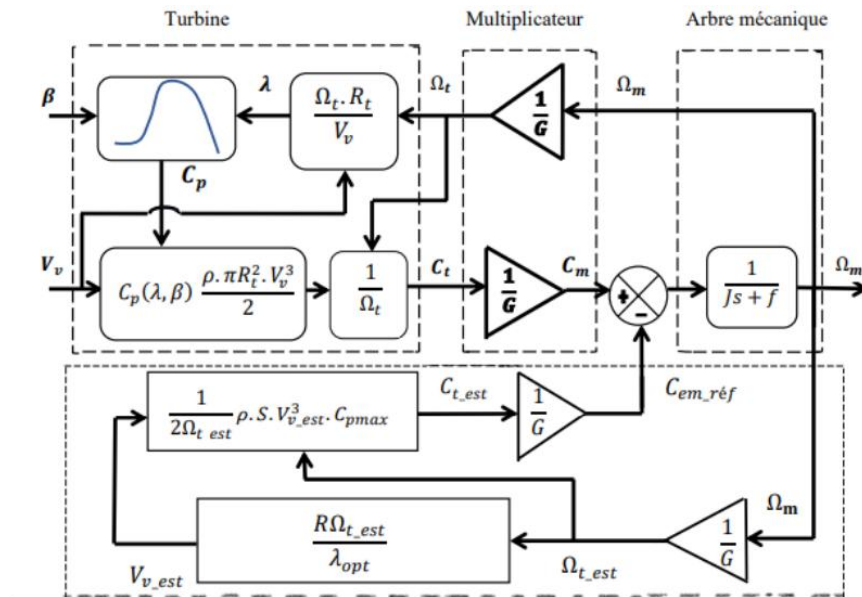


Figure II.9: Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

II.6 Description de la MADA Sans Balais (BDFIG)

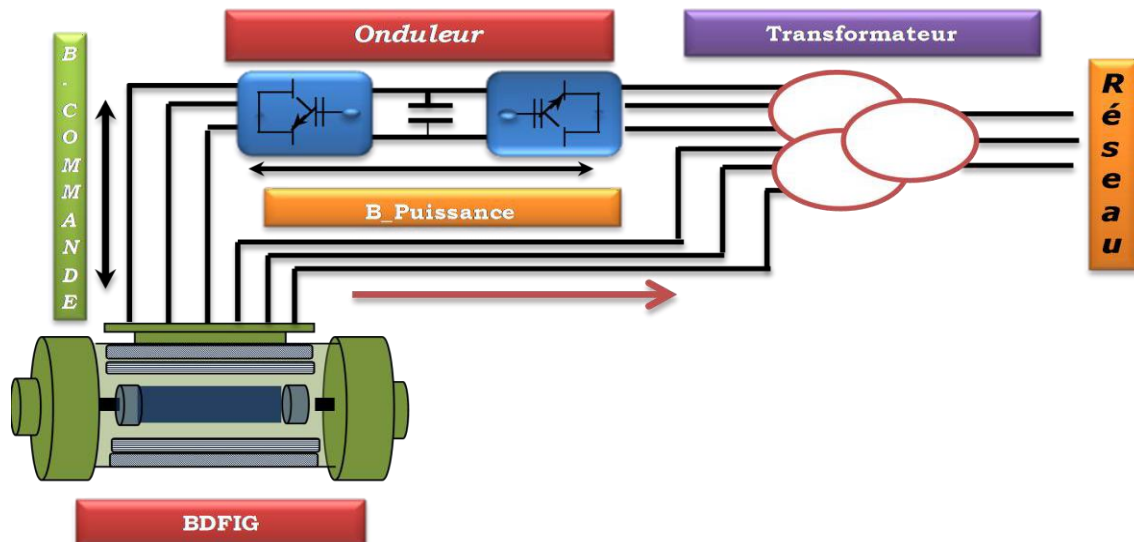
Il est possible d'intégrer les deux stators de la technologie de deux MADA (MADA n°1 et MADA n°2) dans la même carcasse et le rotor peut être équipé d'une structure à cage, [48], [44].

Entre les deux machines, les barres rotoriques sont croisées.

Un boîtier est relié directement au réseau (connu sous le nom de boîtier de puissance,

BP) tandis que l'autre boîtier est relié au convertisseur bidirectionnel (connu sous le nom de boîtier de commande, BC).(figure II.17)

Dans le cas d'un réseau infini de puissance, la tension du bobinage de puissance est constante à l'amplitude et à la fréquence. Il sera observé que cette configuration entraîne une dépendance directe des variables électriques du bobinage de commande au courant du BP souhaité.



FigureII.10: Structure de la MADASansBalais (BDFIG)

II.7 Contraintes constructives et d'alimentation pour le fonctionnement correct de la MADASB

Lorsqu'on conçoit une MADASB, il est essentiel de s'assurer d'un rapport précis entre le nombre de pôles des deux bobinages du stator et le nombre de spires du rotor. Il y a donc une exigence physique que les machines de type BDIG doivent respecter. Parallèlement, l'utilisation d'une BDFIG bien conçue ne garantit pas le bon fonctionnement de la machine ; il est essentiel de maintenir un rapport entre la pulsation des deux alimentations du stator et la vitesse du rotor (condition d'alimentation, contrainte similaire à celle de la machine synchrone).[35]

La principale caractéristique de la BDFIG réside dans la capacité du Bobinage de Commande à modifier le courant de rotor généré par le Bobinage de Puissance. Ainsi, un couplage magnétique croisé entre les deux bobinages du stator est obtenu par le rotor [35]. Les conditions à respecter pour assurer le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages du stator à travers le rotor seront définies dans l'annexe B. Dans cette optique, nous allons examiner la structure de la densité de flux générée par chaque bobinage du stator dans l'entrefer [35].

II.8 Modelisation de la MADA Sans Balais (BDFIG)

Il est essentiel d'avoir une modélisation adéquate de la MADASB pour la conception, l'analyse de son fonctionnement et la commande. Les caractéristiques de fonctionnement de la machine peuvent être connues grâce au modèle de la MADASB. Afin de pouvoir reproduire.

Il sera nécessaire de comprendre la relation existante entre les paramètres du modèle et les grandeurs physiques mesurables dans une machine réelle afin de comprendre ces modes de fonctionnement.[35]

Le modèle biphasé de la MADASB en régime permanent est présenté dans ce paragraphe, avec sa connexion classique. En utilisant le modèle précédent de la cascade de deux MADA, nous allons exprimer le modèle de la machine en fonction des courants de la machine.

Les équations approchées ont été développées pour expliquer le fonctionnement global de la MADASB.

Deux bobinages triphasés équilibrés constituent le stator de la MADASB, tandis que le rotor est équipé d'une structure à cage spéciale (voir figure I.18, chapitre I_section (I.5.3.3). Dans les études de modélisation de la machine, les bobinages de puissance du stator et (C) sont utilisés pour les bobinages de puissance.

La commande des bobinages du stator.

Il est important de noter qu'il est nécessaire de varier le nombre de paires de pôles des deux bobinages du stator afin d'éviter le couplage magnétique direct non souhaité.

II.9 Transformation de abc à d,q

II.9.1.Transformation de Park

La transformation de Park, définie par la matrice de rotation $p[()]$, permet de convertir les variables du repère triphasé (a;b;c) en celles du repère diphasé tournant (d;q;o). Cela permet d'exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques dans un même repère. La formule matricielle de la transformation de Park est donnée par [45]:

$$[xdqp]=[P(\theta)].[xabc]$$

$$[P(\theta)]=\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{Bmatrix} \cos(p.\theta) & \cos(p.\theta - \frac{2.\pi}{3}) & \cos(p.\theta - \frac{4.\pi}{3}) \\ -\sin(p.\theta) & -\sin(p.\theta - \frac{2.\pi}{3}) & -\sin(p.\theta - \frac{4.\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{Bmatrix}$$

La MADASB dans le référentiel (d-q) est représentée par le modèle mathématique suivant:

A) Équations des tensions :

$$v_{sp}^d = R_{sp}.i_{sp}^d + \frac{d\phi_{sp}^d}{dt} - \phi_{sp}^q.\omega_{sp}$$

$$v_{sp}^q = R_{sp}.i_{sp}^q + \frac{d\phi_{sp}^q}{dt} + \phi_{sp}^d.\omega_{sp}$$

$$0r^d = R_r.i_r^d + \frac{d\phi_r^d}{dt} - \phi_r^q.\omega_r$$

$$0r^q = R_r.i_r^q + \frac{d\phi_r^q}{dt} + \phi_r^d.\omega_r$$

$$v_{sc}^d = R_{sc}.i_{sc}^d + \frac{d\phi_{sc}^d}{dt} - \phi_{sc}^q.\omega_{sc}$$

$$v_{sc}^q = R_{sc}.i_{sc}^q + \frac{d\phi_{sc}^q}{dt} + \phi_{sc}^d.\omega_{sc}$$

B) Les équations du flux

$$\phi_{sp}^d = L_{sp}.i_{sp}^d + L_{mp}.i_r^d$$

$$\phi_{sp}^q = L_{sp}.i_{sp}^q + L_{mp}.i_r^q$$

$$\phi_r^d = L_r.i_r^d + L_{mc}.i_{sc}^d + L_{mp}.i_{sp}^d$$

$$\phi_r^q = L_r.i_r^q + L_{mc}.i_{sc}^q + L_{mp}.i_{sp}^q$$

$$\phi_{sc}^d = L_{sc}.i_{sc}^d + L_{mc}.i_r^d$$

$$\phi_{sc}^q = L_{sc}.i_{sc}^q + L_{mc}.i_r^q$$

II.9.2 Modèle d'état de la MADASB

Avant d'aborder la commande vectorielle de la machine asynchrone sans balais double alimentation, il faut réaliser sa modélisation, Le modèle d'état non linéaire s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant (ω_p) comme suit :

$$\dot{X} = a.X + B.U$$

Avec U est le vecteur de tension

$$U = [v_{sp}^d \ v_{sp}^q \ 0 \ 0 \ v_{sc}^d \ v_{sc}^q]$$

X est le vecteur d'état

$$X = [i_{sp}^d \ i_{sp}^q \ i_{rd} \ i_{rq} \ i_{sc}^d \ i_{sc}^q]$$

$$A = [R_{sp} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$$

$$0 \ R_{sp} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$$

$$0 \ 0 \ R_r \ 0 \ 0 \ 0;$$

$$0 \ 0 \ 0 \ R_r \ 0 \ 0;$$

$$0 \ 0 \ 0 \ 0 \ R_{sc} \ 0;$$

$$0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ R_{sc}]$$

$$B = [L_{sp} \ 0 \ L_{mp} \ 0 \ 0 \ 0;$$

$$0 \ L_{sp} \ 0 \ L_{mp} \ 0 \ 0;$$

```

Lmp 0 Lr 0 Lmc 0;
0 Lmp 0 Lr 0 Lmc;
0 0 Lmc 0 Lsc 0;
0 0 0 Lmc 0 Lsc]
M=inv(B)
C=[0 -Lsp 0 -Lmp 0 0;
Lsp 0 Lmp 0 0 0;
0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0]
D=[0 0 0 0 0 0 ;
0 0 0 0 0 0;
0 -Lmp 0 -Lr 0 -Lmc;
Lmp 0 Lr 0 Lmc 0;
0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0]
E=[0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0
0 0 0 -Lmc 0 -Lsc;
0 0 Lmc 0 Lsc 0]
H=[Lsp 0 Lmp 0 0 0;
0 Lsp 0 Lmp 0 0;
Lmp 0 Lr 0 Lmc 0;
0 Lmp 0 Lr 0 Lmc;
0 0 Lmc 0 Lsc 0;
0 0 0 Lmc 0 Lsc]

```

II.10 Résultats de simulation

Dans la modélisation de MADASB, son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Ce dernier référentiel est le mieux adapté pour travailler avec la commande vectorielle.

pour valider ce modèle on propose des simulations des deux modes sous l'environnement du logiciel Matlab/Simulink avec les conditions suivantes :

- Le BP est couplé directement à un réseau puissance infini d'une tension et fréquence constante (220V, 50Hz).
- L'alimentation du BC est en court-circuit . ou le Fonctionnement de la MADASB avec une seule alimentation. Et la machine fonctionné avec une couple de charge egale 10 N.M à l'instant t=4s. Cette configuration produit un couple électromagnétique qui permet d'accélérer la machine et d'atteindre une vitesse en régime permanent constante proche de w_{rn} .

avec

$$w_c = w_{sp} - (P_p + P_c)w_m$$

$$w_r = w_{sp} - (P_p)w_m$$

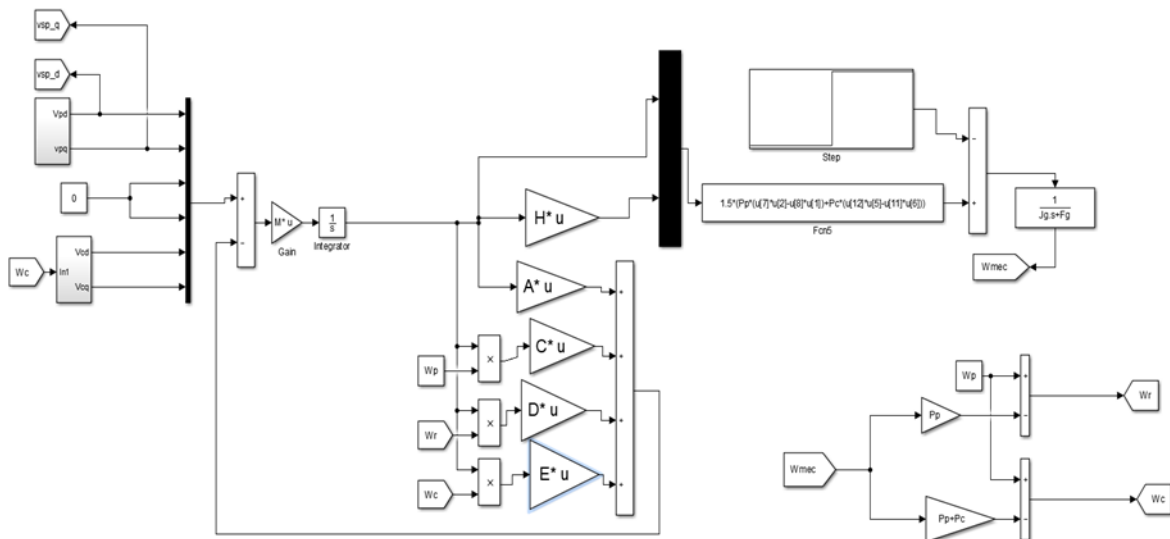


Figure II.11 Schéma bloc du GADASB sous Matlab/Simulink

On constate ainsi l'importance des courants pendant le démarrage, après un temps égal à environs 2.7s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de 50 Hz pour les courants du BP.

Les Figure. II.12, Figure. II.13 montre les valeurs temporelles des courants de la phase a pour les deux bobinages du stator.

On observe qu'une fois que la vitesse de est atteinte ($w_r = 750 \text{ tour/min} \approx 78.54 \text{ rad/s}$), la fréquence du BC correspondant au mode de fonctionnement de le generateur.

Le couple électromagnétique présente un pic important et des oscillations, nous observons que le couple électromagnétique se stabilise a un valeur constant en régime permanent, aussi le couple suite sa référence de couple de charge à l'instatnt t=4s .

simulation de BDFM dans le référence lié au flux du BP on note que ce référence est analogue à la référence d – q de la machine à induction, nous obtenons en régime permanent des grandeurs diphasées constantes.

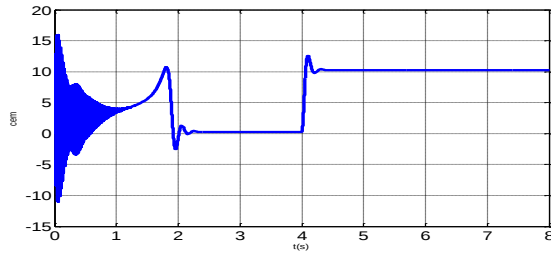


figure II.12: couple electromagnetique

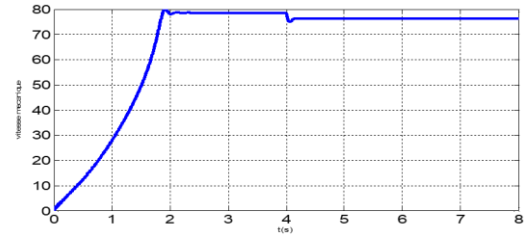


figure II.13: vitesse mecanique

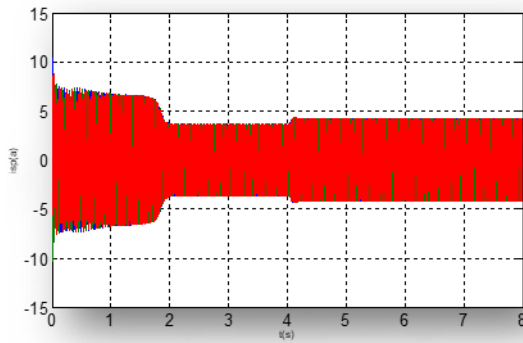


figure II.14: courant de bobinage de BP avec zoom

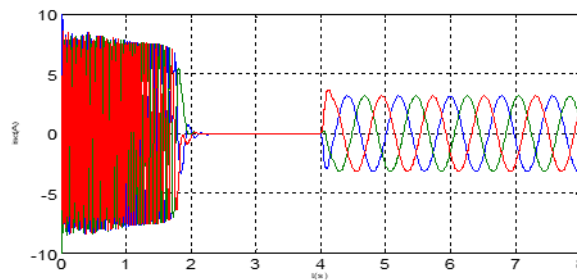
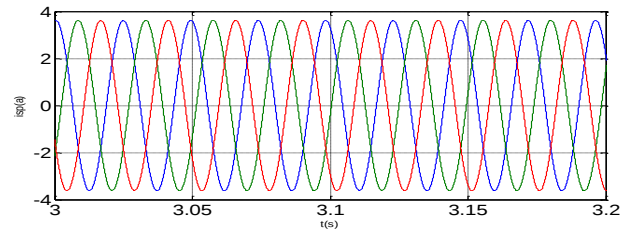


figure II.15: courant de BC

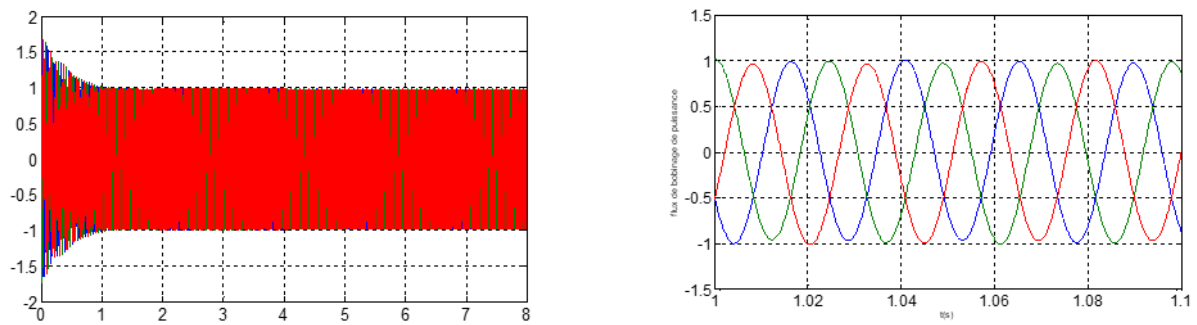


figure II.16: Flux de bobinage de puissance avec zoom

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la modélisation et la commande du système de conversion éolienne basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB) en mode générateur pour la régulation de la puissance active et réactive statorique avec la commande MPPT de la turbine pour extraire le maximum de la puissance générée par le générateur.

Ainsi, on a représenté trois méthodes de contrôle du générateur asynchrone à double alimentation (GADASB) qui ont été implantées sous Matlab/Simulink afin de visualiser les résultats de simulation.

Chapitre III
COMMANDE
VECTORIELLE DE Le
GADASB

III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, nous allons présenter la commande vectorielle par orientation du flux ou dans notre travail nous avons adopté la commande indirect en boucle ouvert pour la régulation des puissances dans les bobinages de puissances (BP). Cette solution est particulièrement intéressante pour les machines asynchrones double alimentées sans balais, que ce soit en fonctionnement générateur ou moteur. Cette technique de commande est une méthode de contrôle pour la MADASB qui repose sur l'orientation du flux statorique du bobinage de puissance, afin de la faire fonctionner en tant que génératrice. Elle souligne les liens entre les valeurs statoriques du bobinage de puissance et les valeurs du bobinage de commande. Il sera possible d'intervenir sur les signaux du bobinage de commande afin de réguler l'échange de puissances actives et réactives entre le bobinage de puissance et le réseau grâce à ces relations

III.2 Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure III.1. D'après la figure III.1, ils y ont deux commandes sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de le système éolien globale: Premièrement la commande pour extraire la puissance maximale du vent (MPPT a été mentionnée dans le deuxième chapitre)deuxième la commande du convertisseur de puissance coté bobinage de commande [40].

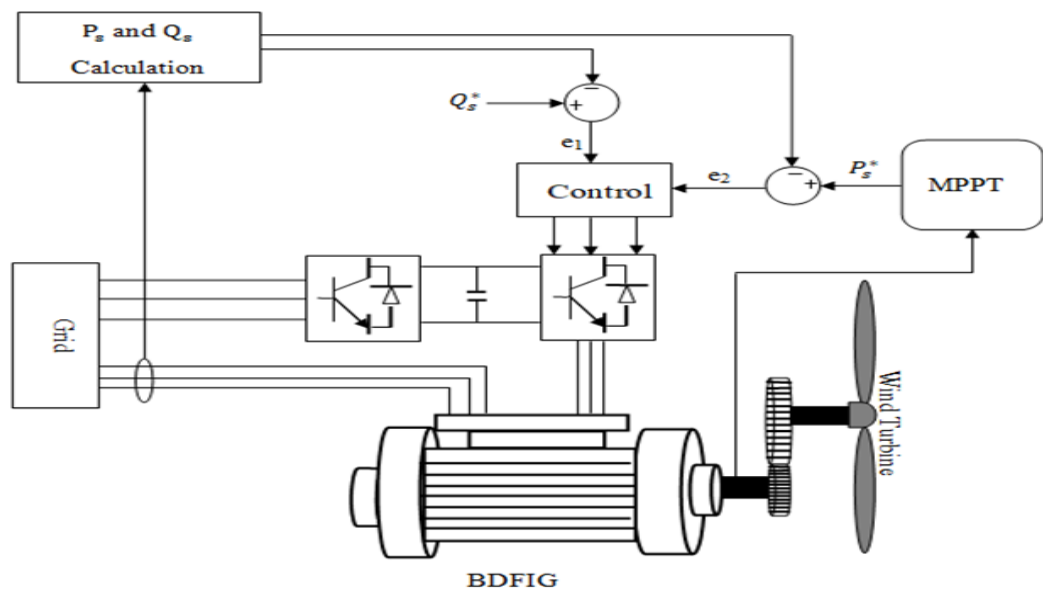


Figure . III. 1: Schéma global du système basé sur une MDASB

III.3 Principe de la commande vectorielle à flux orienté

Dans la commande vectorielle la MADASB est contrôlée d'une façon analogie à la machine à courant continu à excitation séparé cette analogie est donné par la figure suivant

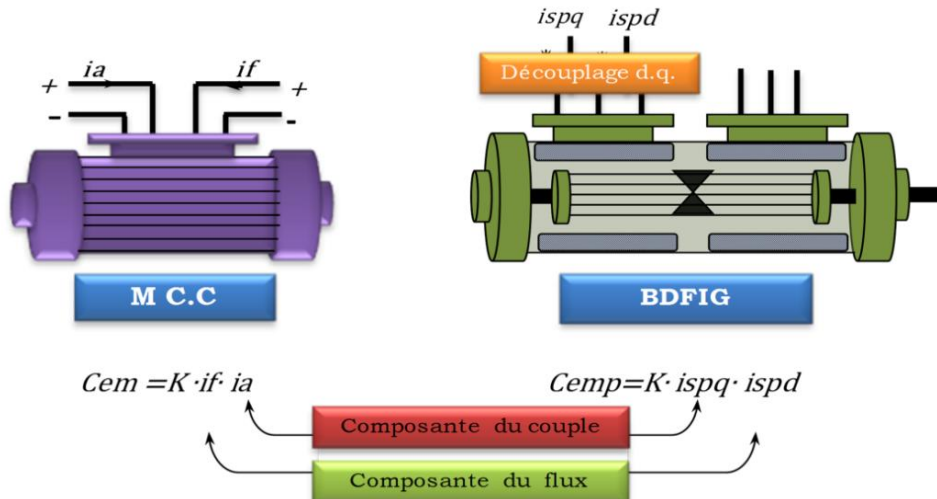


Figure. III. 2: Schéma du principe de découplage pour la MADASB par analogie avec la machine à C.C.

Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d de repère de park suivant l'un du flux de la machine statorique, rotorique ou entrefer ou choisir afin d'obtenir un découplage flux –courant et couple –courant, ce qui nous permet de faire un contrôle de couple indépendamment de flux

CC magnétisant (MCC), où le courant de champ contrôle le flux et le courant d'induction contrôle le couple. Cela implique de placer le référentiel (d-q) de manière à ce que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Par conséquent, le débit est contrôlé par la composante directe du courant, tandis que le couple est contrôlé par l'autre composante

Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande du convertisseur côté machine (CCM) dont le principe est illustré à la figure III.2.

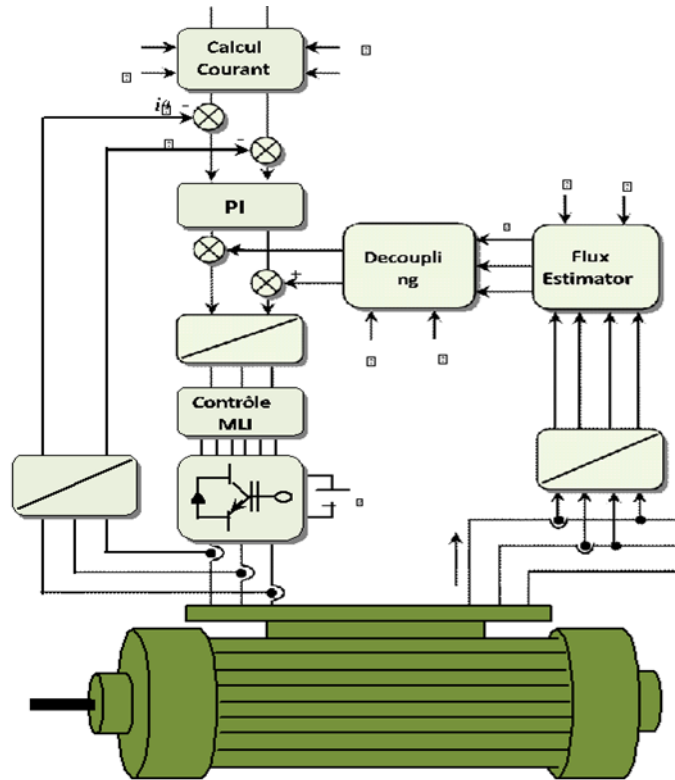


Figure. III. 3: Schémas du contrôle de la MADASB.

Les contrôles des puissances active et réactive du BP seront obtenus en contrôlant les courants de BC d'axes d-q de la MADASB.

III.3.1 L'orientation de flux de la MADASB

Le contrôle vectoriel de direction de flux constitue une solution intéressante pour obtenir de meilleures performances dans les applications à vitesse variable.

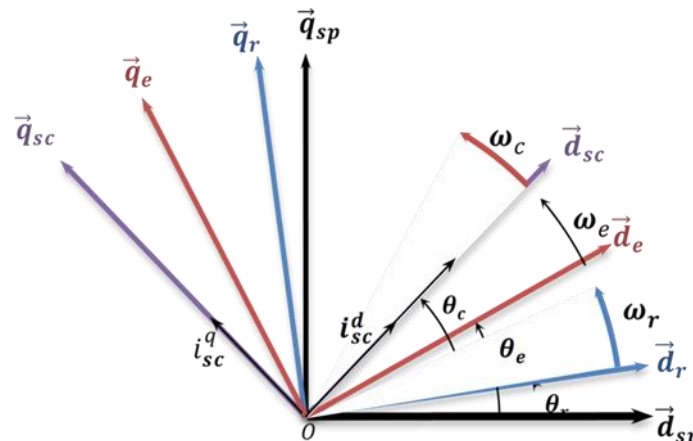


Figure. III. 4: Position du référentiel par rapport au flux

Lorsque le MADASB est modélisé dans un référentiel relatif au champ tournant, les champs magnétiques statoriques des deux bobinages ainsi que le rotor et l'entrefer du MADASB tournent à la vitesse du référentiel (d, q) par rapport au stator d'enroulement de puissance.

La direction de l'un de ces quatre champs le long de l'axe d du système de référence constitue le principe de base du contrôle vectoriel. Grâce à la transformation PARK, on obtient un modèle similaire à machine à courant continu avec des excitations séparées.

Le couple électromagnétique de la machine à courant continu est :

$$C_{em} = K_f \cdot \psi_f \cdot i_a \quad (III.01)$$

$$\psi_f = K_f' \cdot i_f$$

Le couple électromagnétique du bobinage de puissance que nous allons examiner :

$$C_{emp} = \frac{3}{2} P_p (\psi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q - \psi_{sp}^q \cdot i_{sp}^d) \quad (III.02)$$

A partir de cette équation, on peut effectuer un couplage pour que le couple soit contrôlé uniquement par le courant statorique en quadrature i_{sp}^q (l'axe q doit être appauvri du flux ($\psi_{sp}^q=0$), et le flux par le courant statorique du contrôle bobinage i_{sp}^d . A partir de cette équation, on peut effectuer un couplage pour que le couple soit contrôlé uniquement par le courant statorique en quadrature i_{sp}^q (l'axe q doit être appauvri du flux ($\psi_{sp}^q=0$), et le flux par le courant statorique du bobinage de contrôle i_{sp}^d .

La relation finale du couple du bobinage de puissance est:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P_p (\psi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q) \quad (III.03)$$

III.4 Stratégie de commande en puissances active et réactive de la MADASB :

En établissant les équations qui lient les valeurs des tensions statoriques du bobinage de commande (BC), générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statorique du bobinage de puissance, cette technologie permet de contrôler facilement la génération d'énergie électrique de l'éolienne (BP).

Nous utilisons la modélisation diphasée de la MADASB dans le deuxième chapitre. On oriente le repère d,q afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique du bobinage de puissance ψ_{sp} .

Ainsi ;

$$\psi_{sp}^d = \psi_{sp} \quad \text{et} \quad \psi_{sp}^q = 0 \quad (III.04)$$

Et l'équation des flux statoriques du bobinage de puissance devient :

$$0 = L_{sp} \cdot i_{sp}^q + L_{mp} \cdot i_{rp}^q \quad (III.05)$$

$$\psi_{sp}^d = L_{sp} \cdot i_{sp}^d + L_{mp} \cdot i_{rp}^d$$

Si on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple v_{sp} , cela conduit à un flux statorique ψ_{sp} constant.

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statorique du BP, les équations des

tensions statoriques du BP se réduisent à :

$$v_{sp}^d = \frac{d\psi_{sp}^d}{dt} \quad (III.06)$$

$$v_{sp}^q = \psi_{sp}^d \cdot \omega_{sp}$$

Avec ω_{sp} la pulsation électrique des grandeurs statoriques du BP.

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

$$v_{sp}^d = 0 \quad (III.07)$$

$$v_{sp}^q = v_{sp}$$

A l'aide de l'équation (III.7) et du flux (III. 5), on peut établir le lien entre les courants statoriques de la machine de puissance et les courants statoriques du BC: On a :

$$i_{sp}^q = -\frac{L_{mp}}{L_{sp}} \cdot i_{r}^q ; i_{sp}^d = \frac{\psi_{sp}^d - L_{mp} \cdot i_{r}^d}{L_{sp}} \quad (III.08)$$

$$i_{r}^q = \frac{\psi_{r}^q - L_{mp} \cdot i_{sp}^q - L_{mc} \cdot i_{sc}^q}{L_r}$$

$$i_{r}^d = \frac{\psi_{r}^d - L_{mp} \cdot i_{sp}^d - L_{mc} \cdot i_{sc}^d}{L_r}$$

Ensuite :

$$i_{sp}^q = \delta_4 \cdot \psi_{r}^q - \delta_1 \cdot i_{sc}^q \quad (III.09)$$

$$i_{sp}^d = \delta_5 \cdot \psi_{sp}^d - \delta_4 \cdot \psi_{r}^d - \delta_1 \cdot i_{sc}^d$$

Les équations de puissance active et réactive de bobinage de puissance :

$$P_p = \frac{3}{2} \cdot (v_{sp}^q \cdot i_{sp}^q + v_{sp}^d \cdot i_{sp}^d) \quad (III.10)$$

$$Q_p = \frac{3}{2} \cdot (v_{sp}^q \cdot i_{sp}^d - v_{sp}^d \cdot i_{sp}^q)$$

D'après l'équation III.7 et III.10 les expressions de puissances de bobinage de puissance devient:

$$P_p = \frac{3}{2} \cdot v_{sp} \cdot i_{sp}^q \quad (III.11)$$

$$Q_p = \frac{3}{2} \cdot v_{sp} \cdot i_{sp}^d$$

Les courants de l'équation de l'équation III.9 précédente sont remplacés dans l'équation III.11 pour obtenir l'expression des puissances BP par rapport aux courants statoriques du BC :

$$P_p = \frac{3}{2} V_{sp}^d \left(\frac{L_{mp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \varphi_{r}^q - \frac{L_{mc}L_{mp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} i_{sc}^q \right) \quad (III.12)$$

$$Q_p = \frac{3}{2} V_{sp}^d \left(\frac{L_r}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \varphi_{sp}^d - \frac{L_{mp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \varphi_{r}^d + \frac{L_{mc}L_{mp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} i_{sc}^d \right)$$

On peut observer que l'équation III.12 indique que la puissance statorique active de BP P_p est directement proportionnelle au courant statorique dans la quadrature i_{sc}^q de BC. De plus, la puissance réactive Q_p est proportionnelle au courant continu (I_{sc}) du stator BC

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions statoriques du BC qui seront appliqués à la MADASB.

En remplaçant dans l'équation des flux statoriques du BC les courants statoriques du BP par l'expression III.10, on obtient :

$$\begin{aligned}\varphi_{sc}^q &= \frac{L_{mc}L_{mp}}{L_r} i_{sp}^q - \frac{L_{mc}}{L_r} \varphi_r^q + \frac{L_{sc}L_r - L_{mc}^2}{L_r} i_{sc}^q \\ \varphi_{sc}^d &= \frac{L_{mc}L_{mp}}{L_r} i_{sp}^d - \frac{L_{mc}}{L_r} \varphi_r^d + \frac{L_{sc}L_r - L_{mc}^2}{L_r} i_{sc}^d\end{aligned}\quad (III.13)$$

En remplaçant l'expression des flux précédente III.14 par leurs expressions dans les équations des tensions statoriques du BC on obtient :

$$\begin{aligned}V_{sc}^q &= R_s i_{sc}^q + \left(\frac{d}{dt} \delta_3 i_{sc}^q + \delta_2 \varphi_r^d \right) - \omega_c (\delta_3 i_{sc}^d + \delta_2 \varphi_r^d + \delta_1 \varphi_{sp}^d) \\ V_{sc}^d &= R_s i_{sc}^d + \left(\frac{d}{dt} \delta_3 i_{sc}^d + \delta_2 \varphi_r^d - \delta_1 \varphi_{sp}^d \right) - \omega_c (\delta_3 i_{sc}^q + \delta_2 \varphi_r^q)\end{aligned}\quad (III.14)$$

Les facteurs de dispersion s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \frac{L_{mc}L_{mp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \quad \delta_2 = \frac{L_{mc}L_{sp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \quad \delta_3 = L_s - \frac{L_{mc}^2 L_{sp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \\ \delta_4 &= \frac{L_{mp}}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2} \quad \delta_5 = \frac{L_r}{L_{sp}L_r - L_{mp}^2}\end{aligned}\quad (III.15)$$

Sur la base des équations que nous allons mettre en œuvre, nous pouvons déterminer les relations entre les tensions appliquées au stator BC et les puissances statoriques BC qui en résultent. En conséquence, il est désormais possible de l'examen des équations III.12 et III.14 permet de construire le schéma fonctionnel de la figure III.5, qui présente les puissances statoriques active et réactive du BP et les tensions statiques du BC comme respectivement les entrées et les sorties.

Décrire le bloc schématique du MADASB, qui sera le bloc à réguler ensuite.

L'examen des équations III.13 et III.15 permet de construire le schéma fonctionnel de la figure III.3, qui a les puissances statoriques actives et réactives du BP et les tensions statiques du BC comme entrées et sorties, respectivement.

On constate que les tensions et les pouvoirs sont déterminés par une fonction de transfert de premier ordre.

De plus, en raison de la faible valeur du g-slip, il sera facile d'établir un contrôle vectoriel puisque les effets de couplage seront minimes, permettant aux axes d et q d'être contrôlés indépendamment de leurs régulateurs respectifs.

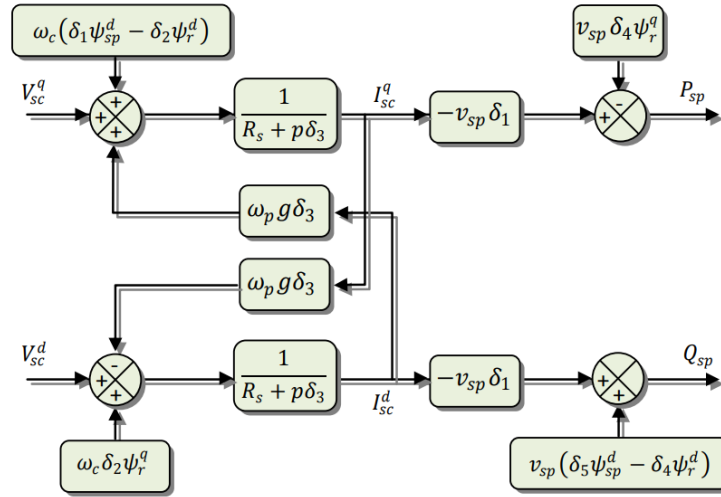


Figure. III. 5: Schéma bloc de la MADASB

III.4.1 Commande indirecte de la MADASB

La méthode indirecte implique de reproduire le schéma bloc du système à contrôler dans le sens inverse [BOY 06].]. Un schéma bloc est donc élaboré pour représenter les tensions en fonction des puissances. Il en résulte un modèle qui est identique à celui de la machine, mais qui diffère. dans le sens opposé. Ainsi, tous les éléments présents dans le schéma bloc de la MADASB seront inclus dans la commande indirecte.

La puissance statorique du BP est donc calculée en fonction des courants statoriques du BC, tandis que les expressions des tensions statoriques du BC sont calculées en fonction des courants statoriques du BC.

III.4.2 Calcul des courants de référence de la commande

A l'aide de l'équation (III.) 13

$$\begin{cases} i_{sc}^{q-ref} = \frac{p_p^{ref}}{1.5V_{sp}^q \delta_3} + \frac{\delta_4}{\delta_3} \varphi_r^q \\ i_{sc}^{d-ref} = \frac{Q_p^{ref}}{1.5V_{sp}^q \delta_3} + \frac{\delta_4}{\delta_3} \varphi_r^d - \frac{\delta_5}{\delta_3} \varphi_{sp}^d \end{cases}$$

III.4.3 Schéma synoptique du contrôle de la machine

La figure ci-dessous représente le schéma synoptique de la simulation, avec les paramètres de la machine illustrés par l'annexe .

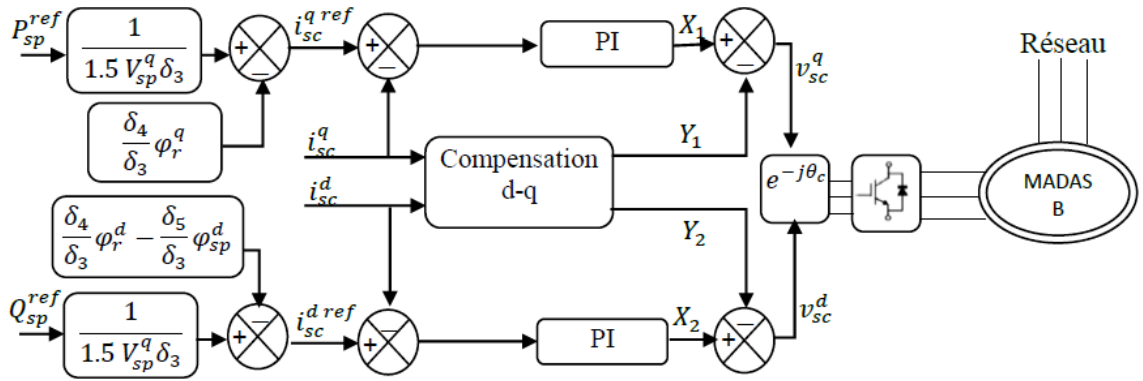


Figure. III. 6: Schéma synoptique du contrôle de la MADA Sans Balais

III.5 MISE EN PLACE DE LA REGULATION

Prenons l'exemple du schéma bloc du système à contrôler de la Figure. III. 4 pour identifier les éléments à intégrer dans la boucle de contrôle. En examinant la relation entre les courants statoriques du BC et les puissances statoriques, le terme $-v_{sp} \delta_1$ se manifeste. Dans notre recherche, nous avons estimé que l'éolienne était connectée à un réseau infini et stable, ce qui signifie que ce terme est toujours le même. Il ne sera donc pas nécessaire de mettre en place de régulateur entre les courants statoriques du BC et les watts. Dans le but de contrôler la machine, nous allons instaurer une boucle de régulation sur chaque puissance en utilisant un régulateur indépendant, tout en réduisant les termes de perturbation présents dans le schéma bloc de la Figure. III. 5.

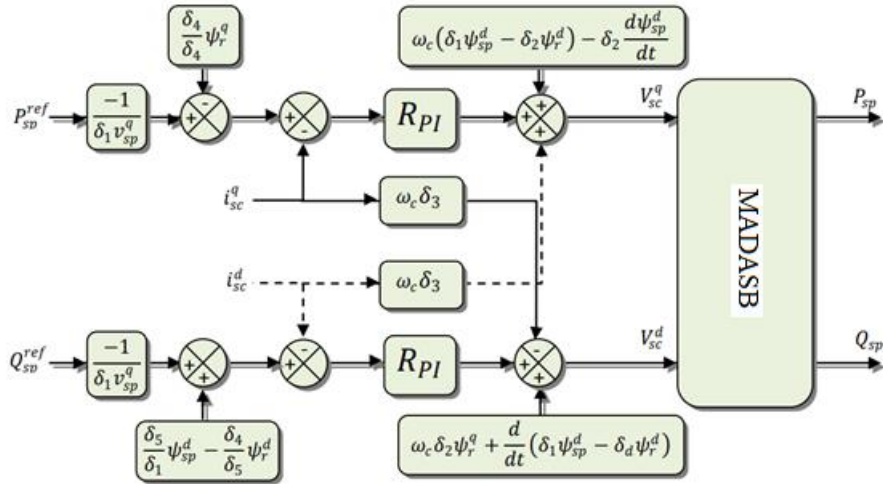


Figure. III.7: Schéma bloc de la commande indirecte (PS en haut, QS en bas).

En conservant les mêmes hypothèses concernant la stabilité du réseau, on élabore le système de régulation de la Figure. III.7 . La boucle de régulation des courants statoriques de BC est maintenant présente, avec les consignes déduites directement des valeurs des puissances souhaitées.

Réglementer la machine. Une commande vectorielle avec un régulateur unique par axe est ainsi obtenue, comme illustré dans la Figure. III. 5

III.5.1 Synthèse de la régulation PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), employé afin de réguler la MADASB en mode génératrice, est illustrée dans la Figure. III. 5 où un régulateur PI a une fonction de transfert de la forme $K_p + K_i/p$, ce qui correspond aux deux régulateurs utilisés dans la Figure. III. 6

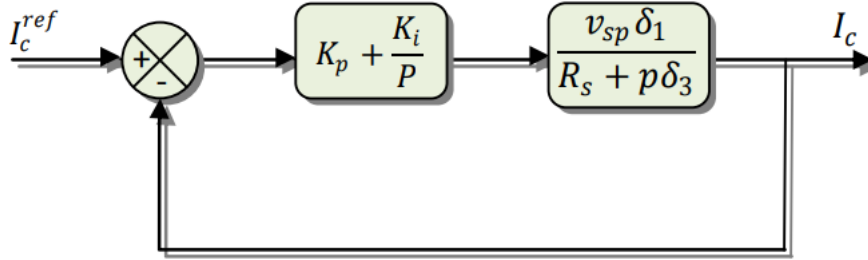


Figure. III. 8 Système régulé par un PI.

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) de le system à reguler s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \frac{v_{sp} \delta_1 / \delta_3}{\frac{R_s}{p + \delta_3}} \quad (III.16)$$

Dans notre travail nous avons appliqué la méthode de compensation de pôles. Après de supprimer le zéro de la fonction de transfert. Cela nous amène à la situation suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_s}{\delta_3} \quad (III.17)$$

Lorsque la compensation est réalisée, on obtient la FTBO suivante

$$FTBO = \frac{K_p + \frac{v_{sp} \delta_1}{\delta_3}}{p} \quad (III.18)$$

Cela nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{K_i}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{\delta_3}{v_{sp} \delta_1} \quad (III.19)$$

En choisissant un temps de réponse du système commandé d'environ 1ms, cela représente une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation sur une éolienne où les variations de vent sont faibles. Alors les parametre de controleur PI utilisé dans notre travail est donné par les deux relations suivante :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{\delta_3}{v_{sp} \delta_1} \quad \text{et} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_s}{v_{sp} \delta_1} \quad (III.20)$$

III.6 Modélisation de l'onduleur de tension MLI :

L'onduleur de tension MLI est un convertisseur statique constitué des cellules de

Commutation généralement à transistor ou à thyristor GTO pour les grandes puissances.

Le principe de fonctionnement s'exprime par séquençement imposé aux interrupteurs statiques qui réalisent la modulation de largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements de commande de la machine BDFM.

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel, Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure III.9)

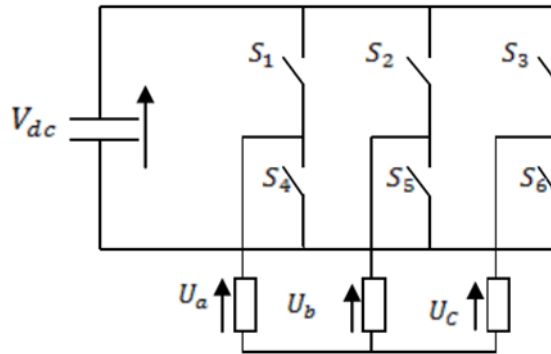


Figure. III. 9 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux

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

$$S_a = 0 \text{ si } S_1$$

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 :

Branche 1 :

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

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

Branche 2 :

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

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

Branche 3 :

$S_c = 0$ 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 du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{ac} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ac} = V_{dc}(S_c - S_b) \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées , on peut déduire les expressions des tensions en langes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

III.7 Stratégie de commande de l'onduleur

III.7.1 Modulation de largeur d'impulsions(MLI)

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangle sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance (Figure II.17).

III.7.2 Les paramètre de la MLI

Dans la commande MLI il ya deux paramètres caractérisent cette stratégie :

III.7.2.1 L'indice de modulation(m)

L'indice de modulation qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{III.23})$$

III.7.2.2 Le taux de modulation(r)

Le taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{III.24})$$

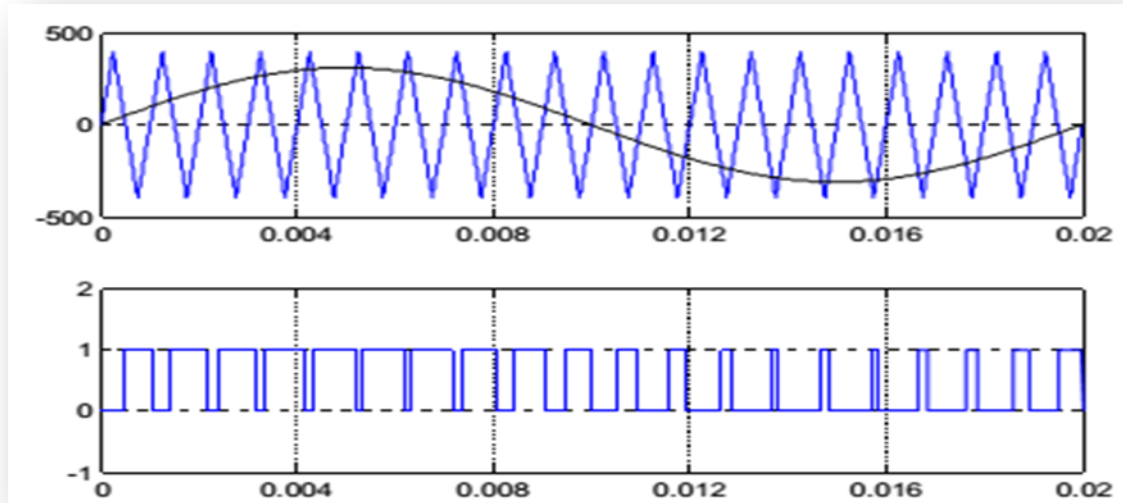


Figure. III. 10: Principe de fonctionnement de la technique MLI triangul e sinusoidale à une porteuse.

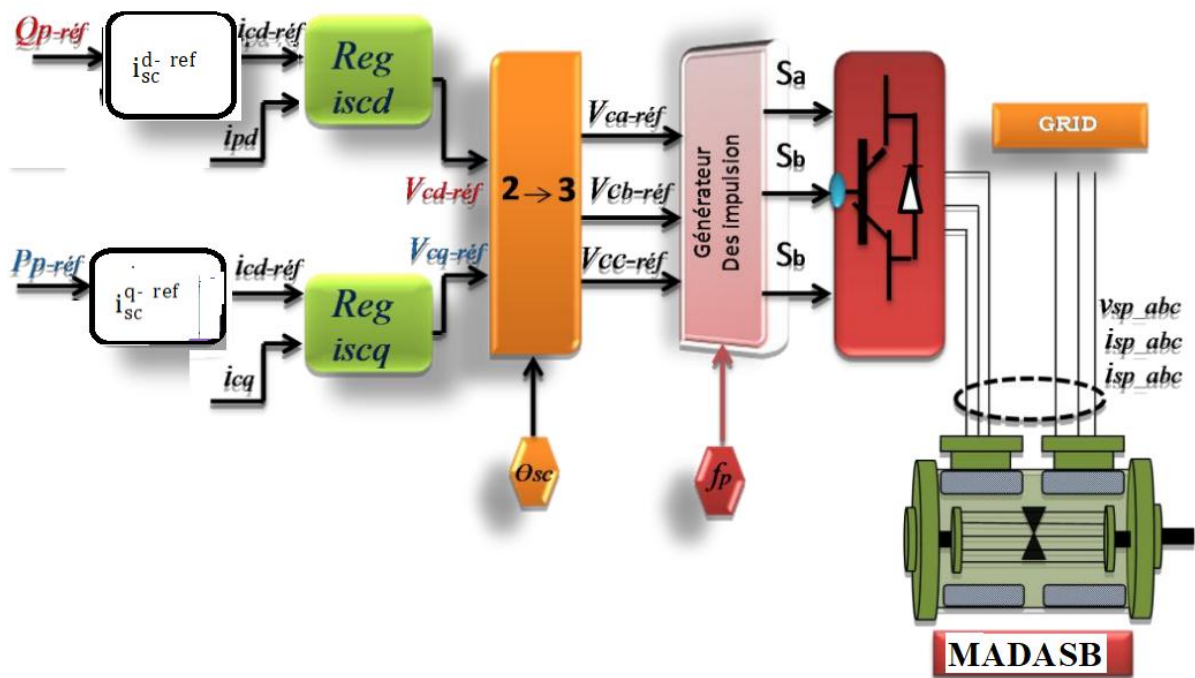


Figure. III.11: Structures des régulateurs et la MLI appliquée sur le MADASB.

III.8 SIMULATION DU SYSTEME EOLIEN BASE SUR UNE MADASB

III.8.1 Commande in directe des Puissances Pp et Qp des BP :

Dans cette méthode, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive des bobinages de puissance du GADASB en utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de courant isc^d et la boucle de régulation de le courant isc^q . La structure de commande est donnée dans le schéma bloc de la figure III.11. La figure II.12 représente le schéma bloc de la commande indirecte du GADA SB sous Matlab/Simulink.

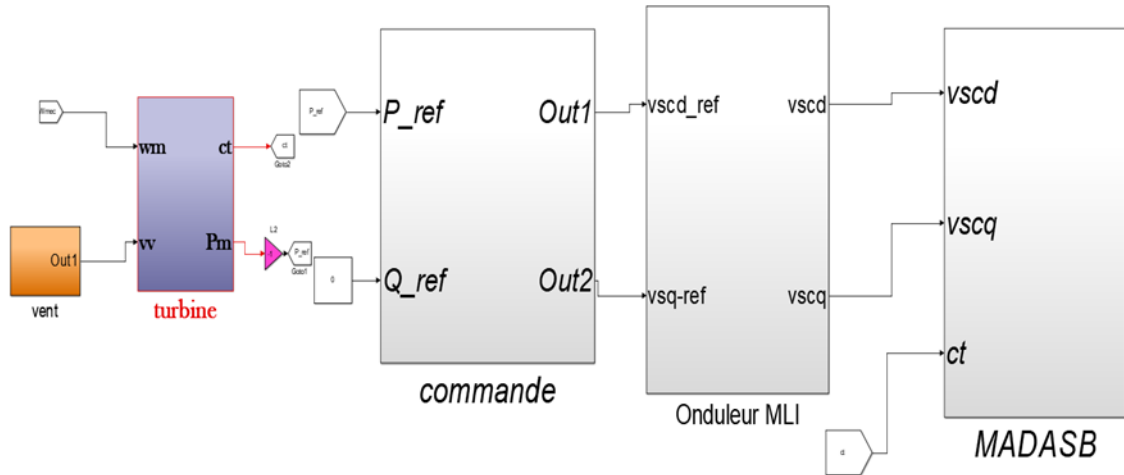


Figure III.12 Schéma bloc de la commande indirecte du GADASB sous Matlab/Simulink

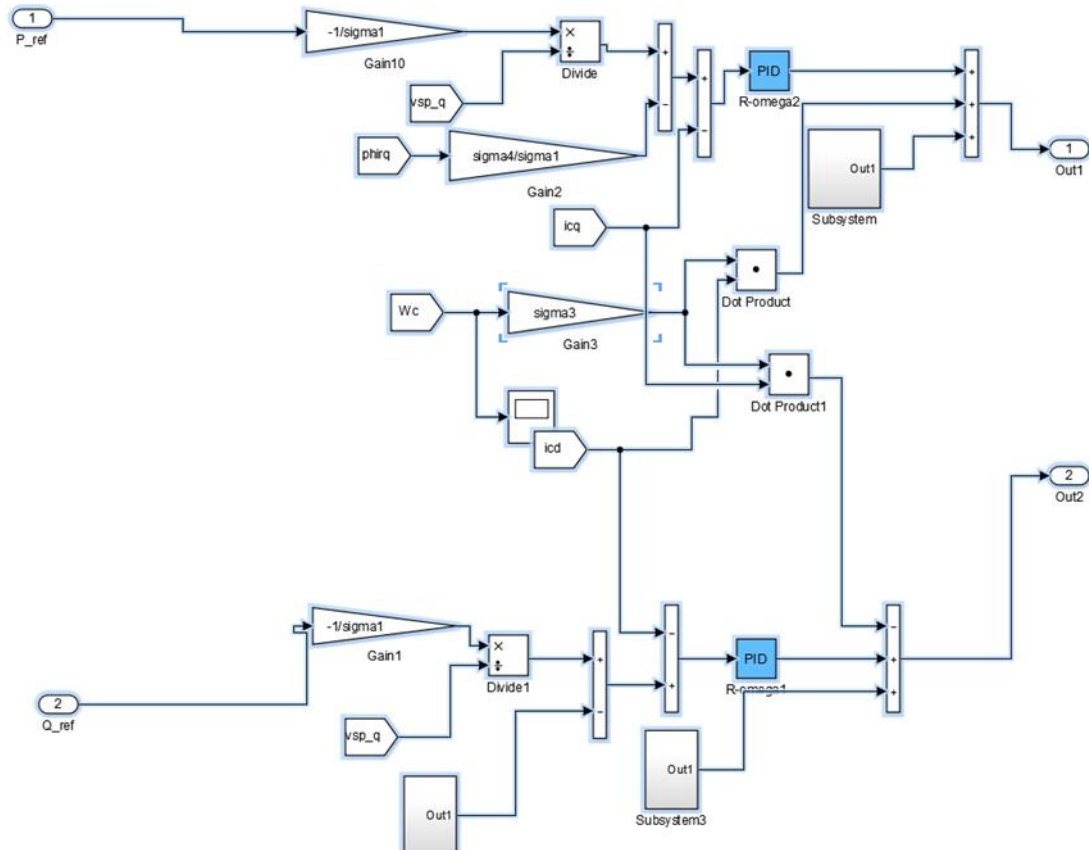


Figure III.13 Le schéma bloc interne de la commande indirecte sous Matlab/Simulink

III.9 Résultat de simulation et interprétation

Nous avons exploité la modélisation de la GADASB, la partie mécanique et de la commande indirecte dans l'environnement MATLAB/Simulink pour réaliser des tests de régulation. Les paramètres de le GADASB sont détaillés dans l'annexe. Le BP est connectée à une source triphasée parfaite d'une tension constante de 220 volts efficaces par phase.

Les figures ci-dessous présentent les résultats de la simulation qui nous permettent de représenter les performances de la conduite de la MADASB alimentée par un onduleur à deux niveaux grâce à la stratégie triangulo-sinusoidale. Nous avons proposé des échelons de vitesse du vent qui sont présentés sur la figure III.14

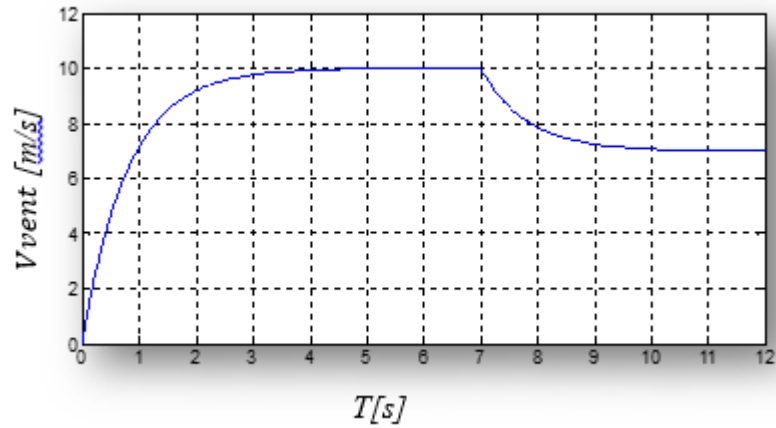


Figure. III. 14 La vitesse du vent.

Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenues par la commande des puissances active et réactive générées au niveau de bobinage de commande du stator de la machine GADASB, cette commande permet de découpler les expressions des puissances active et réactive du générateur. La composante quadrature du courant statorique (bobinage de commande) contrôle la puissance active, et la composante directe contrôle la puissance réactive échangée entre le stator (bobinage de puissance) et le réseau. Les figures III.15 et III.16 montrent bien un bon découplage entre la puissance active et réactive de bobinage de puissance. Il est clair que la puissance active suit ses valeurs désirées pendant toutes les variations de la vitesse du vent.

Les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant, on remarque la puissance active Figure. III. 15 du côté statorique de la machine (bobinage de puissance) est négative le long de temps de simulation ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADASB .

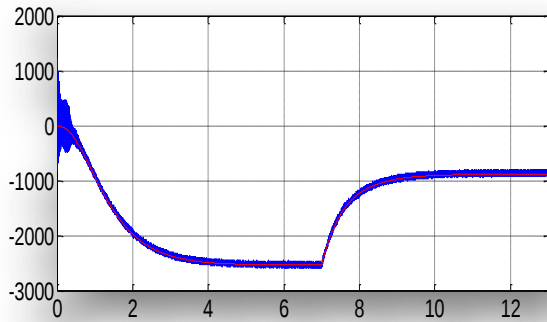


Figure. III. 15 La puissance active de BP)

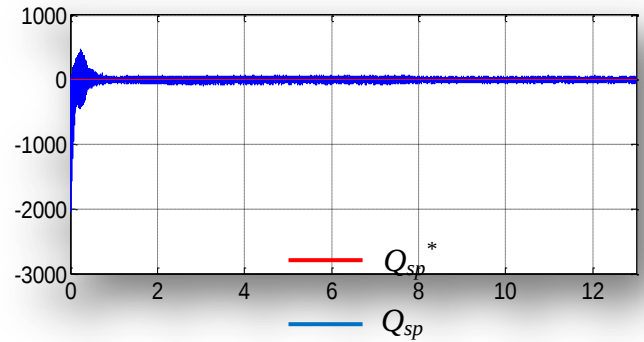
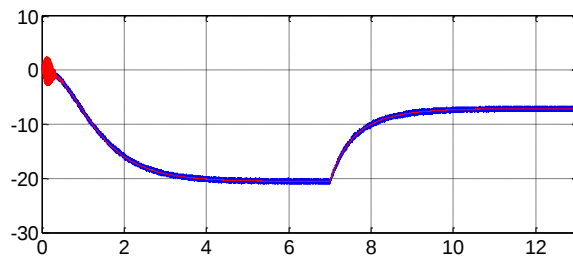
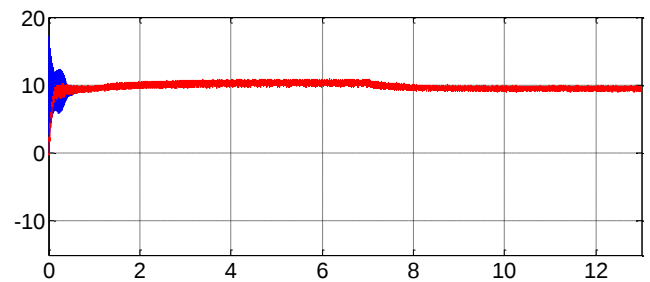


Figure. III. 16 La puissance réactive de BP

Figure. III. 17 Le composants quadrature de courant i_{sc} Figure. III. 18 Le composant direct de courant i_{sc}

La figure III.17 montrent que la composant quadrature des courants de bobinage de commande suite sa référence optimale, la figure III.18 montrent que la composant direct presque constante.

Le couple électromagnétique dans la figure la figure III.20 varie entre les valeurs 0 et 60 N.M, et possède la même allure de profile du vent applique.

Le flux de BP dans la figure la figure III.19, la composant direct de flux suite sa référence optimale, avec une composant quadrature presque constante.

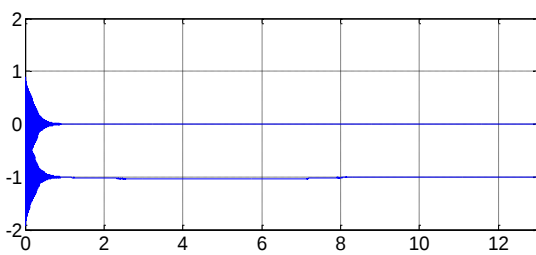


Figure.III.19. Flux d,q des BP

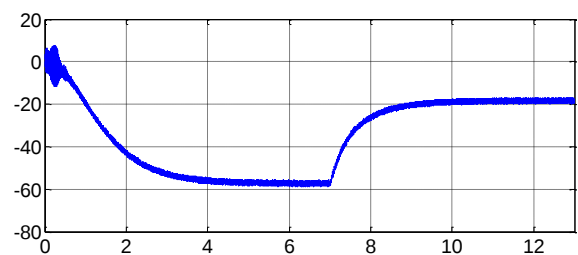


Figure. III.20. Le couple électromagnétique

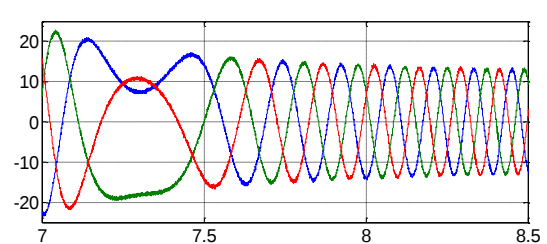
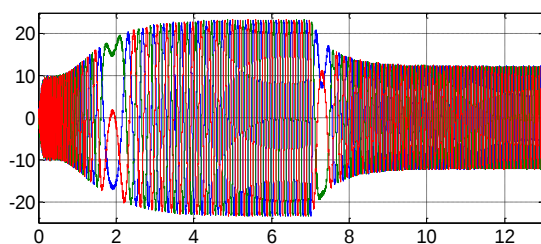
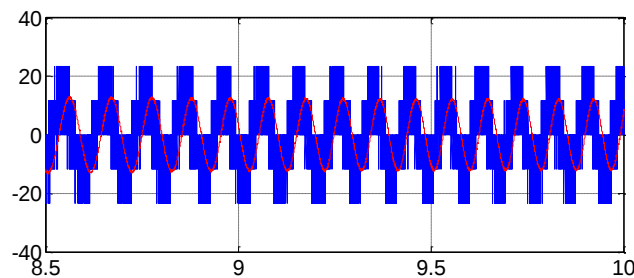


Figure. III.21. Le courant triphasé de BC**Figure. III.22. Zoom de courant de BC**

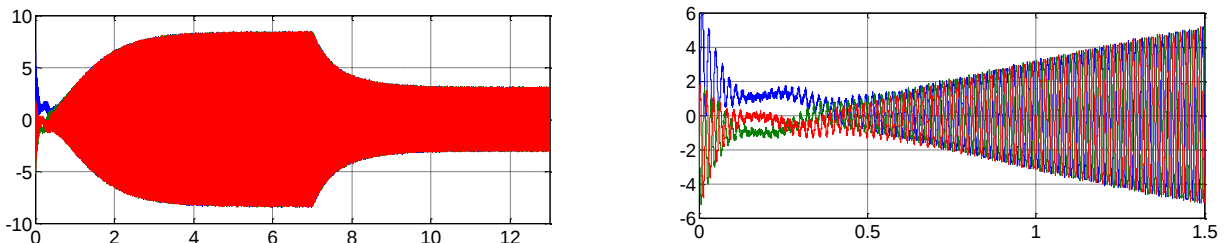
Les figures.III.21 montrent que les courants obtenus au bobinage de commande augmentent quand la vitesse du vent augmente, de plus, ces courants ont des formes sinusoïdales.

La figure III.22 présent la courbe de courant triphasé de bobinage de commande, on remarque que le passage de mode de fonctionnement hypo à hyper synchrone dans l'instante $t = [7 \quad 7.5]$, ainsi présent l'inverse de l'échange de puissance entre les bobinages de commande et le réseau électrique.

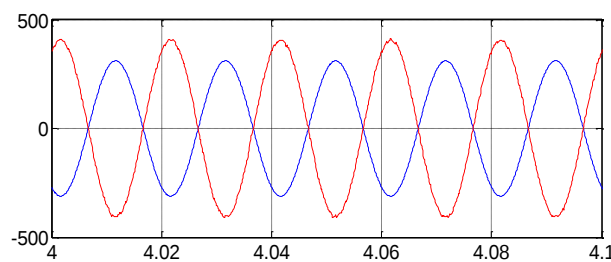
La figure III.23 présent la courbe de courant avec tension par phase de bobinage de commande.

**Figure. III.23. Tension et courant par phase de BC**

Les figures.III.24 montrent que les courants obtenus au bobinage de puissance avec zoom, les courants sont augmentent quand la vitesse du vent augmente, de plus, ces courants ont des formes sinusoïdales.

**Figure. III.24. Le courant triphasé de BC avec zoom**

La figure III.25 présent la courbe de courant avec tension par phase de bobinage de puissance on remarque que le fonctionnement avec le facteur de puissance unitaire.

**Figure. III.25 Courant et tension par phase de BP**

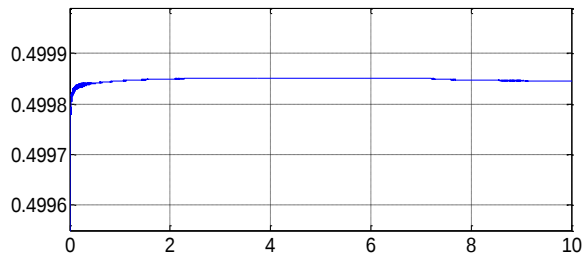


Figure. III.26 Le coefficient de puissance C_p .

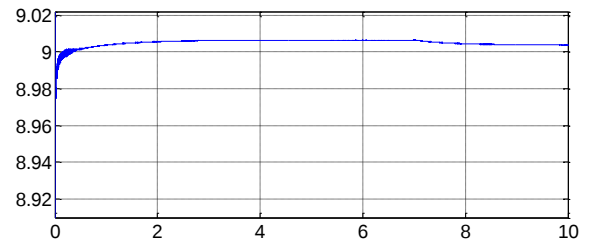


Figure. III.27 la vitesse spécifique λ

Le coefficient de puissance c_p et la vitesse spécifique λ dans les figure Figure. III.26 et Figure. III.27 ne changent pas beaucoup des valeurs ils restent pratiquement égaux à leur valeur de référence optimale 0.5 et 9 respectivement.

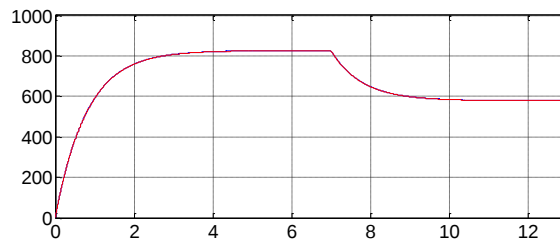


Figure. III.28 la vitesse mecanique.

CONCLUSION

Ce chapitre se concentre sur l'analyse et l'application de la commande vectorielle de la MADASB pour un fonctionnement en génératrice à toute vitesse de rotation. Bien qu'il y ait eu des obstacles, la commande vectorielle utilisant des régulateurs PI reste efficace. Les formes d'ondes sinusoïdales parfaitement obtenues, le découplage complet des puissances (active et réactive) , la variation de vitesse a un impact sur les puissances active et de la MADASB ; le coefficient de puissance et la vitesse spécifiques λ et ω présentent la poursuite de MPPT technique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de cette mémoire reste l'exploration simulink MATLAB d'un system MADASB dans des applications éoliennes. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système: premièrement généralité des systèmes de conversion d'énergie éolienne, d'deuxièmes, la modélisation de ce système, troisièmes, la commande vectorielle pour le contrôle des puissances actives et réactives par régulateur PID de la MADASB

Dans le premier chapitre, une étude générale des systèmes éoliens est présentée. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude d'une chaîne de conversion éolienne constituée les turbine éolien ,et les générateurs électriques utilise dans ces systèmes.

Dans le deuxième chapitre nous avons réalisé une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation est basé sur le modèle de la turbine avec MPPT, qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs aérodynamiques pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice. Ainsi la modélisation d'état d'un générateur asynchrone à double alimentation sans balais sous MATLAB

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une étude de la commande de le GADASB en puissances active et réactive statoriques (BP) en fonction des tensions du deuxième stator (BC), Les résultats de simulation faite sous Matlab/Similink montre le bon suivi des consignes pour les deux puissances active et réactive statorique a montré l'efficacité de la commande appliquée.

Enfin comme perspectives, nous envisageons d'étendre les travaux de ce mémoire sur divers axes à savoir :

- Une Réalisation expérimentale d'un système éolien(GADASB)
- Application d'autres approches de commandes non linéaires et intelligentes capables pour optimiser la régulation de ce système
- L'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs tels que trois niveaux.
- l'utilisation de la nouvelle technique pour le MPPT.

Références bibliographique

Références bibliographique

- [1] H.Camblong "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable" thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers centre de BORDEAUX, 18 Décembre 2003.
- [2] Frédéric Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes , soutenue le 19/12/2003
- [3] N.HAMDI,« Modélisation etcommandedesgénératriceséoliennes »;mémoiredemagisterenélectrotechnique,universitédeConstantine,24/01/2008.
- [4]: Sathyajith Mathew, «Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics», livre, Springer-VerlagBerlin Heidelberg, 2006.
- [5]:AdamMIRECKI,«Etudecomparativedechaînesdeconversiond'énergiedédiéesàune éolienne de petite puissance», thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse le05avril 2005.
- [6]: Mayouf Messaoud, «contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimantspermanents»,mémoiredemagister, université deBiskra,année2008.
- [7]: Munif JOURIEH, «Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudierl'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien», thèse de doctorat de l'Ecole NationaleSupérieured'Arts et Métiersle 20 décembre2007.
- [8].A.BOYETTE«Contrôle-commanded'unégénérateurasynchroneàdoublealimentationavecsystème de stockage pour la production éolienne», Thèse de Doctorat en génie électrique, UniversitéHenriPoincaré, NancyI,2006.
- [9]Khelfat Lotfi Maataoui Lakhdar MEMOIRE DE MASTER DOMAINE: Science etTechnologie ANNABA -université MOKHTAR BADJI, Etude et Simulation d'une éolienne àbased'uneMachineAsynchroneDoublement Alimentée2017.
- [10]: Youcef Himri, « Optimisation de certains paramètres d'un aérogénérateur situé au sud ouest »,mémoiredemagister, université de Bechar,année2005.
- [11]: P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, «Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur,

Références bibliographique

traité de Génie mécanique, BM 4 640.

- [12]

D.Fatou(2018),"Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de Machine synchrone à aimants permanents", Mémoire de MASTER, Université Badji-Mokhtar D'Annaba.

- [13] RANDEE HOLMES et SUSAN EDWARDS, «

L'ABC des technologies de l'énergie renouvelable », <http://www.pollutionprobe.org>, septembre 2003.

- [14] « Rapport Mondial 2010 sur l'énergie Eolienne », 10th. world wind energy conference & renewable energy exhibition, 31 oct. au 2 nov. 2011.

- [15] P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Eoliennes », techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 464021.

- [16]: Khettache Laid, « Etude et Commande d'un système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée », mémoire de magister, Université de Batna, année 2007.

- [17] Baromètre éolien Wind power baromètre », euroobserver'ER , journal de l'éolien n°12 – février 2013.

- [18] S. METATLA. « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA ». Mémoire de magister en électrotechnique, ENSP, 2009.

- [19] G. ABDELKADER, R. M. ILYAS, « Commande par modes glissants d'une éolienne basée sur machine asynchrone à double alimentation », mémoire de master en automatique, octobre 2011.

- [20] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat, ÉNSAM France, 2003

- [21] Blkasm: TOUAL Belkacem Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable Soutenu le 17/10/2010

- [22] Hamdi Mr HAMDI ILYES MODELISATION ET COMMANDE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (Application à l'énergie éolienne) Année: 2012/2013

- [23] Mr. FOUNDI Youcef . Mr. SALMI Mohammed Université Ahmed Draïa Adrar Simulation et étude d'une commande directe de puissance (DPC) de la machine

asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée dans un système éolien l

- [24]Frhat [5]Mr. MAHBOUB Mohamed abd elbassetThÈme Modélisation et commande d'un system éolien à base d'une gÈnÈratrjice double alimentÈe sans balaisSoutenu le 18/ 06/2012
- [25] V Courtecuisse., "Supervision d'une centrale multi sources a base d'éoliennes et de stockaged'énergie connecté au réseau électrique"., Thèse de Doctorat Université de L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2008.
- [26] A Abdelli., "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive"., Thèse de Doctorat, Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [27] Milutin G. Jovanovid* and Robert E. Betz « Slip power recovery systems based on brushless doubly fed reluctance machines »University of Northumbria at Newcastle, School of Engineering Ellison Building, Newcastle upon Tyne NE1 8ST, UK. Tel: +44-191-2273016,
- [28] S Khoujet El Khil., "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée MADA" .,Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [29] T Ghennam., "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation"., Thèse de Doctorat, Université de Lille et L'école Polytechnique d'ALGER, 2011.
- [30] H 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 de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [31] . G Salloum., "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation" Thèse de Doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2007.
- [32] L Peng., "Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension"., Thèse de Doctorat Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [33]. F Bonnet., "Contribution à l'optimisation de la commande d'une machin asynchrone à double alimentation utilisée en mode moteur"., Thèse de Doctorat, Université de L'Institut National Polytechnique de Toulouse 2008.
- [34] F Z TRIA ' Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA' Thèse de Doctorat 2018

- [35] 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.
- [36] D. Zhou, R. Spée, G.C. Alexander, "Experimental evaluation of a rotor flux orientation control algorithm for brushless doubly-fed machines", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 12, No. 1, January. 1997, pp. 72-77.
- [37] F. PITIERS « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.
- [38] M. LOPEZ « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée » Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale STITS, 2006.
- [39] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [40] S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA. « Stability augmentation of a grid-connected wind farm ». Springer 2009.
- [41] S. METATLA. « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA ». Mémoire de magister en électrotechnique, ENSP, 2009.
- [42] F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ « Wind turbine control systems principles, Modeling and Gain Scheduling Design », Springer 2007
- [43] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « Optimal control of wind energy systems ». Springer 2008
- [44] S. EL AIMANI « Modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension » Thèse de doctorat, Université De Lille, 2004.
- [45] A. BOYETTE « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, GREE de Nancy, 2006.
- [46] M. Rapin, *Énergie éolienne - Principes. Études de cas*, Dunod, 2010.
- [47] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, "Doubly-fed a.c. machines : classifications and comparaison", EPE conference 2001-Gratz, DS 3.4-2.
- [48] N. Patin « analyse d'architecture, modélisation et commande de générateurs

- pour réseaux autonomes et puissants » These de doctorat, Uiv Cachan. 2006.
- [49] A. BOYETTE « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, GREE de Nancy, 2006.
- [50] A. MIRECKI »Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.
- [51] N. Patin, E. Monmasson and J.P. Louis « Analysis and control of a cascaded doubly-fed induction generator”, IECON, 2005, P 2487-2492.
- [52] M. Adamowicz, R.Strzelecki and D. Wojciechowski “ Steady State Analysis of Twin Stator Cascaded Doubly Fed Induction Generator” CPE 2007. P 5.
- [53] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson and R. A. Lakin “the application of field oriented control to a cascaded doubly-fed induction Machine” IEE, Powe. Elec. Vari. Spee.Driv, No 475, 2000, P 262-267.
- [54] A. BOYETTE « Contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » Thèse de doctorat, GREE de Nancy, 2006.
- [55] F. Runcos, R. Carlson, N. Sadowski, P. Kuo-Peng, H. Voltolini “performance and Vibration Analysis of a 75 kW Brushless Double Fed Induction Generator Prototype” IAS, Vol. 5, 2006, P 2395-2402.

Webographie

- [www 1] WWW .connaissance des energies.com
- [www02] Читать дальше: <https://globometer.com/energie-eolien.php>
- [www04] <https://energieplus-lesite.be/techniques>
- [www05] <https://fr.statista.com/statistiques>
- [www06] Global Wind Energy Council GWEC. Global wind report 2023. 2023.