

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF

UFAS (ALGERIE)

Faculté de Technologie

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Electrotechnique

Pour obtenir le diplôme

De Magister En Electrotechnique

Option :

Commande électrique

Par :

Mr. MAHBOUB Mohamed abd elbasset

Thème

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

Soutenu le 18/ 06/2012 devant la commission d'examen composée de :

Pr. RAHMANI Lazhar

Université de Sétif

Président

Dr. RADJELI Hammoud

Université de Sétif

Rapporteur

Dr. HEMSAS K.Eddine

Université de Sétif

Examineur

Dr. HACHEMI Mabrouk

Université de Sétif

Examineur

بسم الله الرحمن الرحيم

ومن آياته أن يرسل الرياح مبشرات وليذيقكم من
رحمته ولتجري الفلك بأمره ولتبتغوا من
فضله ولعلكم تشكرون

سورة الروم الآية 46



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 و معلم البشرية ومنبع العلم
سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى من كلله الله بالهيبة والوقار.. إلى من علمني العطاء بدون انتظار.. إلى من أحمل أسمه بكل افتخار

أرجو من الله أن يمد في عمرك لتري ثماراً قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي
بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد: (والدي العزيز حفظه الله).

إلى ملاكي في الحياة .. إلى معنى الحب وإلى معنى الحنان والتفاني .. إلى بسمة الحياة وسر الوجود
إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى فضاء المحبة و بحر الحنان، ريحانة الدنيا
وبهجتها : (أمي الغالية حفظها الله).

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

وأخواتي و اخصهم ذكرا من تشرف بحمل كتاب الله (أخي الصغير هارون حفظه الله) .

إلى الزهرة الفتية والمبتهجة زوجتي العزيزة اسأل الله ان يجمع بيننا في خير.

المعادلة التي ترسم منحنى حياتي، اصدقائي الذين تسكن صورهم وأصواتهم أجمل اللحظات والأيام التي

عشتها

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.

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Louange et glorification à Dieu, Le tout Puissant, qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

*J'adresse tout d'abord ma profonde reconnaissance à Monsieur **RADJEAH Hammoud**, Maître de Conférences à l'Université de Sétif pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de rapporter ce mémoire, et pour ses conseils et encouragements réguliers, sa bienveillance, sa gentillesse, ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation.*

Je remercie vivement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste mémoire :

*Monsieur **RAHMANI Lazhar**, Professeur à l'Université de Sétif, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury.*

*Messieurs **HAMSSAS K. Eddine**, Maître de Conférences à l'Université de Sétif, et **HACHEMI Mabrouk** Maître de Conférences à l'Université de Sétif, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger mon travail.*

*Je tiens également à remercier très chaleureusement, Mr **DRID Saïd**, Maître de Conférences à l'Université de Batna, Mr **TIR Zoheir** Maître Assistant à l'Université d'El Oued, pour ses nombreux conseils, Mr **SID Mohamed amine**, doctorant à l'Université de Lorraine, Nancy pour leur aide précieuse et leur soutien.*

Je remercie aussi tous les enseignants et les responsables du Département d'Electrotechnique de l'Université de Sétif pour leurs aides et leurs encouragements. Sans oublier mes collègues d'étude et de domaine de recherche.

*Je n'oublié évidemment pas mes amis et mes collègues du SPE et les ingénieurs, Mr **LAOUAMEUR.B**, Mr **HAMDA.I** et **BELMAHDI.L***

En fin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES SYMBOLES & ACRONYMES	
LISTE DES FIGURES & TABLEAUX.....	
INTRODUCTION GENERALE	
CHPITRE I : CONTEXTE THEORIQUE DE LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE.	
I.1 INTRODUCTION	1
I.2 ENERGIE ET ENVIRONNEMENT	1
I.2.1 L'impact de la Consommation d'Energie sur l'Environnement	2
I.2.1.1 Les Emissions Gazeuses	2
I.3 GENERALITES SUR L'ENERGIE RENOUVELABLE	3
I.3.1 Energie hydraulique	3
I.3.2 Energie Solaire.....	3
I.3.2.1 <i>Energie solaire photovoltaïque</i>	4
I.3.2.2 <i>Energie solaire thermique</i>	4
I.3.3 Energie géothermie	4
I.3.4 Energie de la biomasse.....	5
I.3.5 Energie éolienne.....	5
I.4 ETAT DE L'ART ET SITUATION DE L'EOLIEN DANS LE MONDE ACTUEL	6
I.4.1 Historique de l'éolien.....	6
I.4.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres	7
I.4.2.1 <i>La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne</i>	7
I.4.3 Différentes types d'Eoliennes	12
I.4.3.1 <i>Les turbines éoliennes à axe horizontal</i> :.....	12
I.4.3.1 <i>Les turbines éoliennes à axe vertical</i> :.....	14
I.4.4 Eolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable	15
I.4.5 Constitution d'une éolienne	17
I.4.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	18
I.4.6.1 <i>Les avantages</i>	18
I.4.6.2 <i>Les inconvénients</i>	19
I.4.7 Application des éoliennes	20
I.4.7.1 <i>Systèmes Isolés</i>	20

TABLE DES MATIERES

I.4.7.2 <i>Systèmes Hybrides</i>	20
I.4.7.3 <i>Systèmes Liés au Réseau</i>	21
I.5 LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE DANS LES SYSTEMES EOLIENS	21
I.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone	21
I.5.1.2 <i>Générateur asynchrone à double stator</i>	22
I.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone.....	25
I.5.2.1 <i>Générateur Synchrone à Rotor Bobiné</i>	25
I.5.3 Evolution des systèmes de (G V V) vers la double alimentation.....	26
I.5.3.1 <i>Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"</i>	26
I.5.3.2 <i>Machine Asynchrone à double alimentation en cascade</i>	28
I.5.3.3 <i>Machine Asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB)</i>	29
I.5.3.4 <i>Comparaison des topologies et choix de la MADASB</i>	30
I.6 CONCLUSION.....	32

CHPITRE II : MODELISATION ET SIMULATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

II.1 INTRODUCTION	33
II.2 MODÉLISATION DE LA PARTIE MÉCANIQUE DE L'EOLIENNE.....	34
II.2.1. Modélisation de la turbine	34
II.2.2 Source primaire : le vent.....	35
II.2.2.1 <i>Expression du vent en un point fixe</i>	35
II.2.2.2. <i>Le filtre spatial</i>	37
II.2.3 La conversion aérodynamique	38
II.2.4 Modèle de la partie mécanique	39
II.2.4.1 <i>Modèle de l'actionneur des pales</i>	40
II.2.5 Résultats obtenus	41
II.3 MODÉLISATION DE LA PARTIE DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE	42
II.3.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	43
II.3.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation(MADA)	43
II.3.2.1 <i>Hypothèses simplificatrices</i>	43
II.3.2.2 <i>Rappel sur la loi de Faraday</i>	44
II.3.2.3 <i>Mise en équation de la partie électrique dans le plan abc</i>	45
II.3.2.4 <i>Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park</i>	47
II.3.2.5 <i>Calcul du couple électromagnétique</i>	50

TABLE DES MATIERES

III.3.2.6. <i>Choix du référentiel</i>	51
II.3.4 Modélisation de la cascade de deux MADA	53
II.3.4.1 <i>Validation du modèle de la cascade de deux MADA</i>	54
II.3.5 <i>Description de la MADA Sans Balais (BDFIG)</i>	57
II.3.5.1 <i>Contraintes constructives et d'alimentation pour le fonctionnement correct de la MADASB</i>	57
II.3.6 Modélisation de la MADA Sans Balais (BDFIG)	58
II.3.6.1 <i>Validation du modèle de MADASB</i>	59
II.4 MODÉLISATION DE L'ONDULEUR TRIPHASÉ A(MLI)	62
II.4.1 Définition.....	62
II.4.2 Tensions des phases statoriques	63
II.4.3 Tensions composées de la charge	64
II.4.3 Principe de l'onduleur de tension a MLI	65
II.4.3.1 <i>Stratégie de commande</i>	66
II.4.3.2 <i>Algorithme de commande</i>	66
II.5 CONCLUSION	68
 CHPITRE III : CONTROLE INDEPENDANT DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE DE LA MADASB	
III.1 INTRODUCTION.....	69
III.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIEL A FLUX ORIENTE	70
III.3 STRATEGIE DE COMMANDE DE LA (MADASB).....	72
III.3.1 Commande Vectorielle de la MADASB a Flux Statorique Orienté	72
III.3.1.1 <i>Schéma de commande</i>	73
III.3.2 Contrôle Indépendant Des Puissances Active et Réactive	75
III.3.2.1 <i>Commande du courant du BP</i>	75
III.3.2.2. <i>Commande du courant du B-C</i>	77
III.3.2.2. <i>Commande de la puissance réactive du BP</i>	79
III.3.2.3. <i>Commande de la puissance active du BP</i>	80
III.3.3 Ensemble des algorithmes de commande.....	80
III.3.4 Simulation de la commande vectorielle	81
III.3.5 Interprétation des résultats.....	83
III.4 CONCLUSION	84

TABLE DES MATIERES

CHPITRE IV : ASSERVISSEMENT DE LA CHAINE TURBINE-MADASB- CONVERTISSEURS

IV.1 INTRODUCTION	85
IV.2. TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE PUISSANCE	86
IV.2.1 Recherche du point de puissance maximale « MPPT »	87
IV.2.2 Algorithmes de maximisation de la puissance extraite	89
IV.2.2.1 Algorithme de perturbation et observation « P&O »	89
IV.2.2.2 Algorithme de contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation	91
IV.2.2.3 Algorithme de contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation	92
IV.3 MODELISATION DE LA LIAISON DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU	94
IV.3.1 Modèle du bus continu	95
IV.3.2 Modélisation du convertisseur coté réseau	96
IV.3.3 Modélisation du filtre passif	96
IV.3.4 Régulation de la tension du bus continu	97
IV.3.5 Contrôle des courants cote réseau	98
IV.4 PERFORMANCES DE LA CHAINE COMPLETE	99
IV.4.1 Résultats de simulation du système complet	100
IV.5 CONCLUSION	104

CONCLUSION GENERALE ET RSPECTIVE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE A

ANNEXE B

ANNEXE C

ANNEXE D

RESUME

LISTE DES FIGURES & TABLEAUX

<i>Chapitre I</i>	
<i>Figure I.1 : Capacité mondiale installé en (MW), [WWE 02].....</i>	<i>07</i>
<i>Figure. I.2: Taux de croissance du marché mondial, [%]. [WWE 02]</i>	<i>08</i>
<i>Figure I.3 : Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne selon [WWW 02]</i>	<i>08</i>
<i>Figure I.4 Répartition continentale des capacités ajoutées en 2010 (%), [WWE 02].....</i>	<i>.09</i>
<i>Figure I.5 : Total des installations en Afrique (MW), [WWE 10].....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.6 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.7 : Capteurs à axe horizontal, [GAS 11].....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.8 : Type de montage d'une voilure à axe horizontal [MIR 05]</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.9 : Limitation de puissance éolienne.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.10 : Capteurs à axe vertical, [GAS 11].....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.11 : Puissance d'une éolienne typique en fonction de la vitesse de la machine.</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.12: Classement des types d'éolienne selon le coefficient « Cp » [Muk 99].....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.13 : Exemple de système éolien, [LAV 05].....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I.14 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau</i>	<i>22</i>
<i>Figure I.15 : Générateur asynchrone à double stator.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I.16 : Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure I.17 Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de 2 onduleurs..</i>	<i>24</i>
<i>Figure I.18 système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable..</i>	<i>25</i>
<i>Figure I.19: schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)..</i>	<i>27</i>
<i>Figure I.20: Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade</i>	<i>.29</i>
<i>Figure I.21: machine asynchrone à double alimentation sans balais avec rotor à cage</i>	<i>30</i>
<i>Figure I.22: Rotor de la MADAB: (a) Rotor sans conducteur; (b) Rotor Bobiné [RUN 06].....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau. I.1 : Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE, [POZ 03].....</i>	<i>30</i>
<i>Chapitre II</i>	
<i>Figure II.1 : Schéma de la turbine éolienne à base d'une (MADAB) ou (BDFIG)</i>	<i>34</i>

<i>Figure II.2 : Construction de la vitesse de vent en un point.....</i>	37
<i>Figure II.3: Profil du vent avec et sans filtre spatial pour une pour une vitesse moyenne</i>	37
<i>Figure II.4: Modèle mécanique de la turbine éolienne</i>	39
<i>Figure II.5: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.</i>	40
<i>Figure II.6 : Orientation des pales</i>	41
<i>Figure II.7 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales [MET 09].....</i>	41
<i>Figure II. 8 : Vitesse de vent.....</i>	42
<i>Figure II. 9 : Vitesse mécanique développée</i>	42
<i>Figure II.10 : Puissance mécanique produite.</i>	42
<i>Figure II.11 : Couple mécanique développée par la turbine</i>	42
<i>Figure II.12 : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.</i>	43
<i>Figure II. 13 : Représentation schématique de la machine asynchrone.....</i>	44
<i>Figure II. 14 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace.....</i>	47
<i>Figure II.15 : Structure de la cascade de deux MADA</i>	53
<i>Figure II. 16 : Résultat de simulation de la cascade de deux MADA.....</i>	56
<i>Figure II.17 : Structure de la MADA Sans Balais (BDFIG).....</i>	57
<i>Figure II. 18 : Résultat de simulation de la MADA Sans Balais (BDFIG).....</i>	62
<i>Figure. II .19 : Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant la BDFIG.....</i>	63
<i>Figure. II.20 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux</i>	64
<i>Figure.II.21 – Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale</i>	67
Chapitre III	
<i>Figure. III.1: Position du référentiel par rapport au flux.....</i>	70
<i>Figure. III.2: Schéma du principe de découplage pour la BDFIG</i>	71
<i>Figure. III.3 : Schéma général de commande vectorielle</i>	74
<i>Figure. III.4 : Schéma de commande i_{sp}</i>	77
<i>Figure. III.5 : Schéma de commande i_{sc}.....</i>	79
<i>Figure. III.6 : Structures des régulateurs dans la commande vectorielle</i>	81
<i>Figure. III.7 : Réponse de Courants statorique du bobinage de puissance et de commande</i>	82
<i>Figure. III.8 : Tension et Courants statorique du bobinage de puissance et de commande</i>	82
<i>Figure. III.9 : (A), Réponse de Puissance Réactive du bobinage de puissance statorique.....</i>	83

<i>Figure. III.9 : (B), Réponse de Puissance Active du bobinage de puissance statorique</i>	83
<i>Figure. III.9 : (C) Vitesse mécanique, (D) Couple électromagnétique totale du la BDFIG.....</i>	83
Chapitre IV	
<i>Figure IV.1 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.[GAI 10]</i>	86
<i>Figure IV.2 : Ligne de puissance optimale et points 'MPP' pour diverses vitesses de vent.</i>	87
<i>Tableau IV.1 : Principe de control de l'MPPT [GAS11].....</i>	88
<i>Figure IV.3: Principe de la MPPT dans le plan (Ω-P) [GAS11].....</i>	88
<i>Figure IV.4 : Organigramme de l'algorithme « P&O ». [GAS 11].....</i>	90
<i>Figure IV.5 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation</i>	91
<i>Figure IV.6 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$</i>	92
<i>Figure IV.7 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.</i>	93
<i>Figure IV.8 : Connexion du CCR au réseau électrique.....</i>	95
<i>Figure IV.9 : Schéma bloc de régulation du bus continu</i>	98
<i>Figure IV.10 : schéma fonctionnel de régulateur du courant coté réseau</i>	99
<i>Figure IV.11 : schéma structurel du système éolien global</i>	100
<i>Figure IV.12 : Vitesse du vent</i>	101
<i>Figure IV.13 :Vitesse mécanique de la BDFIG</i>	101
<i>Figure IV.14 : Coefficient de puissance de la turbine éolienne</i>	101
<i>Figure IV.15 :Couple électromagnétique de la BDFIG</i>	101
<i>Figure IV.16 : Suivi de consigne de laPuissance réactive de la BDFIG</i>	101
<i>Figure IV.17 :Suivi de consigne de laPuissance active de la BDFIG</i>	101
<i>Figure IV.18 (A),(B) : Suivi de consigne du Courant statorique(BP)selon l'axe d,q</i>	102
<i>Figure IV.19 (A),(B) : Suivi de consigne du Courant statorique(BC) selon l'axe d,q</i>	102
<i>Figure IV.20 : Courant statorique du bobinage de puissance avec zoom et indication(THD)...</i>	102
<i>Figure IV.21 : Courant statorique du bobinage de commande avec zoom et indication(THD)...</i>	103
<i>Figure A.1 : Puissance mécanique extraite du Vent.....</i>	annexe A
<i>Figure A.2 : Coefficient de puissance en fonction du quotient (V_2/V_1).</i>	annexe A
<i>Figure B.1 représentation polaire de la MADASB [TIR 10].</i>	annexe B
<i>Figure B.2 Schéma équivalent de la MADASB référé au stator(BP) [TIR 10].....</i>	annexe B
<i>Figure C.1 : Système régulé par un correcteur proportionnel intégral.</i>	annexe C

LISTE DES SYMBOLES & ACRONYMES

<i>la turbine</i>	<i>la MADA</i>
$v_0(t)$: Vitesse du vent	v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} tensions simple triphasées au stator
V : Vitesse moyenne du vent	i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : courants triphasés au stator
$v_t(t)$: Composante de la turbulence du vent	$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$: les flux propres circulants au stator
P_t : puissance de l'éolienne	v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : tensions simples triphasées au rotor
C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne	i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : les courants triphasés au rotor
λ : Vitesse spécifique (relative) de l'éolienne	$\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$: les flux propres circulants au rotor
β : Angle de calage des pales de la turbine	R_s est la résistance des enroulements statoriques
ρ : la masse volumique de l'air 15°C.	R_r est la résistance des enroulements rotoriques.
S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne.	l_s : Inductance propre des enroulements statoriques
Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine,	m_s : Inductance mutuelle des enroulements au stator
R_t : Rayon de la turbine.	$[P(\theta)]$: la matrice de transformation de PARK
J_m : Le moment d'inertie de la machine,	$[v_{sdq0}]$: tensions statorique dans le repère de Park
J_t : Le moment d'inertie de la turbine	$[i_{sdq0}]$: courants statorique dans le repère de Park
f_v : Coefficient de frottement visqueux.,	$[\psi_{sdq0}]$: flux statorique dans le repère de Park
C_m : Le couple sur l'arbre de la machine	$[v_{rdq0}]$: tensions rotorique dans le repère de Park
G : Gain du multiplicateur.	$[i_{rdq0}]$: courants rotorique dans le repère de Park
C_t : Le couple mécanique sur l'arbre de la turbine	$[\psi_{rdq0}]$: flux rotorique dans le repère de Park.
Ω_m : La vitesse de rotation de la machine,	L_s : est l'inductance cyclique du stator
Référentiel	L_r : est l'inductance cyclique du rotor
(α, β) : Référentiel lié au stator	p : Nombre de paires de pôles de la MADA
(d, q) : Référentiel lié au champ tournant	w_r : Pulsation électrique rotorique
(X, Y) : Référentiel lié au rotor	w_s : Pulsation électrique statorique.

<i>la MADA en cascade</i>	R_r : Résistance rotorique de la MADASB
$v_{sa1}, v_{sb1}, v_{sc1}$: tensions triphasées au stator n°1	R_{sp} : Résistance statorique de la MADASB (BP)
$i_{sa1}, i_{sb1}, i_{sc1}$: courants triphasés au stator n°1	R_{sc} : Résistance statorique de la MADASB (BC)
$v_{sa2}, v_{sb2}, v_{sc2}$: tensions triphasées au stator n°2	P_p, P_c : Nombre de paires de pôles de la de la BP, BC
$i_{sa2}, i_{sb2}, i_{sc2}$: courants triphasés au stator n°2	ω_{sp} : Pulsation électrique statorique (.BP)
$\psi_{sa1}, \psi_{sb1}, \psi_{sc1}$, flux propres circulants au stator n°1	ω_{sc} : Pulsation électrique statorique (.BC)
$\psi_{sa2}, \psi_{sb2}, \psi_{sc2}$, flux propres circulants au stator n°2	ω_r : Pulsation rotorique de la MADASB
L_{s1}, L_{s2} : Inductances cycliques de la MADA n°1,2	Commande de la MASDSB
L_{r1}, L_{r2} : Inductances cycliques rotoriques n°1, n°2	P_{sp}^* : Puissance active de référence
R_{s1}, R_{s2} : Résistance statorique de la MADA n°1,2	Q_{sp}^* : Puissance réactive de référence
R_{r1}, R_{r2} : Résistance rotorique de la MADA n°1,2	i_{sp}^* : Courant statorique(BP) de référence
P_1, P_1 : Nombre de paires de pôles de la MADA n°1,2	i_{sc}^* : Courant statorique(BC) de référence
ω_{s1}, ω_{s2} : Pulsation statorique de la MADA n°1,2	v_{sc}^* : tension statorique(BC) de référence
ω_{r1}, ω_{r2} : Pulsation rotorique de la MADA n°1,2	C_{em}^* : couple électromagnétique de référence
<i>la MADA sans balais</i>	m, r : indice de modulation, indice d'amplitude
$v_{sap}, v_{sbp}, v_{scp}$: tensions triphasées au stator (BP)	f_p : fréquence de la porteuse.
$i_{sap}, i_{sbp}, i_{scp}$: courants triphasés au stator (BP)	i_{ond}, i_{red} : les courants modulés par le CCM et CCR
$v_{sac}, v_{sbc}, v_{scc}$: tensions triphasées au stator (BC)	i_{cond} : le courant traversant le condensateur,
$i_{sac}, i_{sbc}, i_{scc}$: courants triphasés au stator (BC)	V_{dc} : la tension du bus continu
$\psi_{sap}, \psi_{sbp}, \psi_{scp}$ flux propres circulants au stator (BP)	R_f : la résistance du filtre RL
$\psi_{sac}, \psi_{sbc}, \psi_{scc}$, flux propres circulants au stator (BC)	L_f : l'inductance du filtre RL
L_{sp}, L_{sc} : Inductances cycliques de la MADASB	P_{res} : la puissance transitée par le CCR
L_r : Inductances cycliques rotorique de la MADASB	P_c : la puissance emmagasinée dans le condensateur

<i>Acronymes</i>
BDFIG : <i>Brushless doubly-fed induction generator</i>
BP , BC : <i>Bobinage de Puissance et Bobinage de Commande</i>
CCI : <i>current controlled inverter</i>
CCM : <i>convertisseur côté machine</i>
CCR : <i>convertisseur côté réseau</i>
CDER : <i>Centre de Développement d'Energie</i>
FEM : <i>Force électromotrice</i>
FTBF : <i>Fonction de Transfer en Boucle fermé</i>
FTBO : <i>Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.</i>
GACE : <i>Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil</i>
GEIC : <i>groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat</i>
GVV : <i>Génération à Vitesse Variable</i>
IGBT : <i>insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IPCC : <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
PI : <i>Proportionnel – Intégrale</i>
P&O : <i>Algorithme de perturbation et observation</i>
MAC : <i>Machine Asynchrone à cage</i>
MADA : <i>Machine Asynchrone à Double Alimentation</i>
MADAC : <i>Machine Asynchrone à Double Alimentation en Cascade</i>
MADASB : <i>Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais</i>
MASDS : <i>Machine asynchrone à double stator</i>
MCC <i>Machine à courant continu</i>
MLI : <i>Modulation de large d'impulsion</i>
MPPT : <i>Maximum Power Point Tracking</i>
MSAP : <i>Machine Synchrone à Aimant Permanent</i>
MSRB : <i>Machine Synchrone à Rotor Bobiné</i>
SCE : <i>Systèmes De Conversion Eoliens</i>
THD : <i>Total harmonic distortion</i>
VSI : <i>voltage source inverter</i>

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

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. [RAP 10].

Parmi ces sources d'énergies renouvelables, 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 les fermes éoliennes [RAP 10]. Cette topologie est, maintenant, le meilleur choix des fabricants. Leur principal avantage, et non des moindres, est d'avoir ces convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour une partie (30%) de la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine asynchrone à cage et machine synchrone à aimants permanents par exemple) [DEM 12]. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominale du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme. 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 [POZ 03].

Par contre, l'adoption d'un rotor bobiné limite la capacité de surcharge et introduit des modes d'oscillation supplémentaires par rapport au rotor à cage, plus rigide dans sa construction. Pour une puissance nominale donnée, la machine à rotor bobiné sera plus

INTRODUCTION GÉNÉRALE

encombrante et plus lourde que l'équivalent à cage. Pour finir, la présence des balais oblige à des interventions de maintenance fréquentes [POZ 03].

La première solution c'est la cascade de deux MADA : Cette configuration de machine essai 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 [HOP-01]. (MADASB) en anglais Brushless Doubly-Fed Induction Generator (BDFIG).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 bidirectionnel. La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique [POZ 03].

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

L'originalité de la commande de l'éolienne à vitesse variable est qu'elle permet d'extraire le maximum de puissance tel que le vent le permet, appelé (MPPT). Le progrès des chercheurs en génie électrique qui a été fait dans ces dernières décennies a conduit aux investigations afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité d'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire présente une étude de la MADASB et son utilisation dans le système éolien.

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 montrant l'évolution de la production et la consommation de

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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 composé de trois parties :

- Une première partie est consacrée à la modélisation et la simulation de la partie mécanique de l'éolienne, où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillée. Par la suite on calculera la puissance maximale pouvant être extraite à l'aide de la limite de Betz. Et enfin, en terminera la première partie par des résultats de simulation pour vérifier les modèles du système à étudier.
- La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, la modélisation de la cascade de deux machines asynchrones à double alimentation et la modélisation de la machine asynchrone sans balais doublement alimentée. Celle-ci sera clôturée par une simulation de ces configurations (MADA, Cascade de deux MADA et MADASB) en fonctionnement générateur.
- Dans la troisième et dernière partie, nous présenterons la modélisation de l'onduleur alimentant la machine à travers le Bobinage de Commande. 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.

Le quatrième et le dernier chapitre, sera réservé à l'asservissement de la chaîne turbine-MADASB-convertisseurs pour assurer un rendement optimal de l'ensemble et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage maximum de puissance disponible. La gestion des puissances actives et réactives de la machine est assurée par le convertisseur côté machine, le rôle du convertisseur statique coté réseau est de régler la tension de l'étage continu. Les convertisseurs n'étant pas sur le chemin principal du flux de puissance, ils sont dimensionnés au voisinage de 25% de la puissance nominale produite [POZ 03].

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

**CONTEXTE THEORIQUE DE LA
PRODUCTION DE L'ENERGIE
EOLIENNE.**

Chapitre I

Contexte théorique de la production de l'énergie éolienne.

I.1 INTRODUCTION

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux [MER 07]. Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie, tout en préservant l'environnement [WWW 1]. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante.

Dans ce chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion éolienne de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, ainsi que les différentes structures des convertisseurs électromécaniques utilisées dans les systèmes éoliens. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.2 ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT

La préservation de l'environnement est un des principaux défis que doit relever l'industrie énergétique. La consommation d'énergie – en croissance régulière – est à l'origine d'une pollution considérable. L'enjeu est donc de concilier les besoins énergétiques avec le respect de l'environnement. Si la prise de conscience semble désormais être une réalité, les actions sont très longues à mettre en place. D'autant que la responsabilité est collective, car l'utilisation rationnelle de l'énergie concerne aussi bien les gouvernements, les producteurs que les consommateurs [LOP 06].

I.2.1 L'impact de la Consommation d'Énergie sur l'Environnement

La combustion d'énergie fossile est la première activité humaine responsable de l'émission de gaz à effet de serre. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation humaine d'énergie fossile a rejeté 22639 millions de tonnes de CO₂ en 2000 [LOP 06].

I.2.1.1 Les Émissions Gazeuses

Les rejets de la combustion des carburants représentent les trois quarts des émissions humaines de dioxyde de carbone. La concentration de ce gaz dans l'atmosphère augmente régulièrement. Actuellement, ce taux est de 0.0365% contre 0.028% au milieu du XIX^{ème} siècle (+ 30%). Le deuxième gaz à effet de serre est le méthane (CH₄), dont la concentration a doublé sur la même période. Ses émissions sont générées par l'agriculture (élevage et rizière), les activités énergétiques (fuites de gaz et industrie charbonnière) et les déchets ménagers [MON 05],[LOP 06].

Une polémique a longtemps opposé la communauté scientifique sur la réalité du réchauffement climatique et la responsabilité des activités humaines. Le groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GEIC ou IPCC, de l'anglais Intergovernmental Panel on Climate Change) affirme aujourd'hui que cet effet constaté depuis une cinquantaine d'années est bien attribuable aux activités humaines,[LOP 06].

Cette structure – créée en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement – a constaté que la température moyenne avait augmenté de 0.6°C au cours du siècle précédent (avec une marge d'erreur d'environ ± 0.2°C).Le réchauffement n'est toutefois pas uniforme puisqu'il a été constaté en deux phases : de 1910 à 1945 et depuis 1976. Le phénomène tend d'ailleurs à s'accélérer, car la décennie 1990 semble être la plus chaude depuis 1961 – l'année 1998 en tête. Les principales conséquences visibles sont la réduction de la couverture neigeuse (-10% depuis 40 ans), la

fonte des glaciers et de la banquise et son corollaire, la hausse du niveau moyen des océans [MON 05],[LOP 06].

I.3 GÉNÉRALITÉS SUR L'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) sont des sources d'énergie qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, et la biomasse génèrent certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles [DOU 10].

I.3.1 Énergie hydraulique

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie la plus importante avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours, l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et plus précisément à la production d'électricité [DOU 10].

Le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qu'entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit injectée dans le réseau. La puissance disponible dépend de deux facteurs la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau.

I.3.2 Energie solaire

L'énergie solaire est une énergie qui dépend du soleil, bien que cette dernière distante de plus de 150 millions de kilomètres de nous demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permettent de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre. L'électricité produite peut-être

soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injectée dans le réseau. [DOU 10].

Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés. On peut distinguer deux types d'énergie solaire: le solaire photovoltaïque et le solaire thermique, [DOU 10].

I.3.2.1 Énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, décrit par le physicien français Antoine Becquerel (le grand père du découvreur de la radioactivité) en 1839, dont le principe est simple : La lumière du soleil (les photons) est transformée directement en électricité (les électrons) par des cellules photovoltaïques. Ces cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire, qui alimente un réseau de distribution électrique.[DOU 10].

L'énergie solaire photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où, y compris en centre-ville, permettant d'économiser d'autant les besoins de fourniture par le réseau des bâtiments équipés. Elle est surtout utilisée pour la fourniture d'électricité dans les sites isolés, électrification rurale et pompage de l'eau (50%), télécommunication et signalisation (40%), applications domestiques (10%),[DOU 10].

I.3.2.2 Energie solaire thermique

A la différence du solaire photovoltaïque, on désigne par énergie solaire thermique la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Le solaire thermique se décline de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau solaire, cuisinières et sécheurs solaires, [DOU 10].

I.3.3 Energie géothermie

Du grec Gé (terre) et thermos (chaud) l'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol, Dans certaines roches et à certaines profondeurs circule, sous forme de vapeur et d'eaux chaudes. La température des roches augmente en moyenne de 1°C tous les 30m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans

la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m, A la surface de la terre, cette énergie est en moyenne 10000 fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil. L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée,[DOU 10].

I.3.4 Énergie de la biomasse

L'énergie de la biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire, c'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, les plantes et les animaux sont de la biomasse, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, tels le bois et les déchets. La biomasse est une énergie renouvelable tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique, [DOU 10].

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle des gaz à effet de serre [DOU 10]

I.3.5 Energie éolienne

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre : une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement. Exploitée depuis l'antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Elle peut être utilisée de deux manières : directe et indirecte.[DOU 10].

✚ **Direct** : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voiles ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin, [DOU 10].

✚ **indirect** : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.[DOU 10].

I.4 ÉTAT DE L'ART ET SITUATION DE L'ÉOLIEN DANS LE MONDE ACTUEL

L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergie exploitées par l'homme, portant oublié depuis longtemps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990. Son expansion se poursuit toujours à l'heure actuelle, en Europe, mais aussi à travers le monde, notamment en Amérique du Nord avec les États-Unis et en Asie avec la Chine et l'Inde.

I.4.1 Historique de l'éolien

L'énergie éolienne est probablement une des plus anciennes sources d'énergie. Cette énergie propre et renouvelable existe depuis toujours, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Mais jusqu'à présent son exploitation reste difficile. L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en 1700 avant J'ésus-Christ environ [JOU 07], [MIR 05]. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Âge. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIXème siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [MIR 05].

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnaient dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [MIR 05].

I.4.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres

I.4.2.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

Comme il est montré sur les figures (I.1 et I.2) la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années le taux de croissance le plus important de l'industrie de la production d'électricité.

L'énergie éolienne est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante : +30% par an en moyenne depuis 10 ans (+ 31,8 % en 2009). En 2009, de nouvelles capacités éoliennes ont été installées plus de « 37000 MW » dans le monde et les « 100000 MW » installées ont été dépassées, début 2008. L'éolien représente désormais 340 millions de MWh de production électrique par an, soit 2% de la consommation totale d'électricité dans le monde. Les experts du « GWEC » (conseil mondial de l'énergie éolienne) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien, conduisant à un parc installé de près de « 200 000 MW » en « 2010 » et de « 409 000 MW » en « 2014 » [WWW 02].

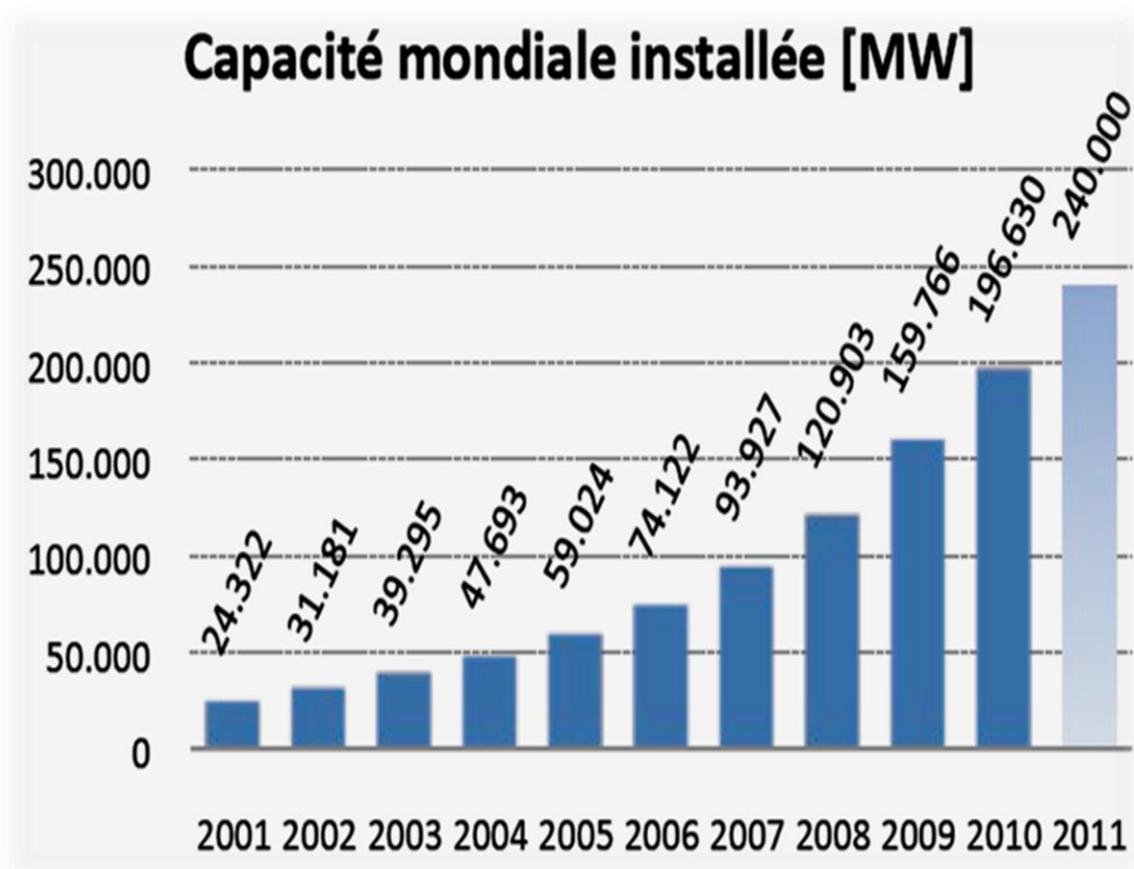


Figure I.1: Capacité mondiale installée en MW, [WWW 02].



Figure I.2: Taux de croissance du marché mondial, [%]. [WWW 02].

Les pays les plus exploitants d'énergie éolienne sont : les États-Unis d'Amérique, l'Allemagne, la Chine et l'Espagne selon l'histogramme de la figure (I. 3).

L'exploitation d'énergie éolienne en Afrique trouve une très faible contribution mondiale, les deux pays les plus exploitants sont : l'Egypte et le Maroc. Le premier avec une capacité totale de production de 430 MW (enregistrée à la fin 2008) avec un taux de croissance annuel de 17,8%, tandis que le Maroc produit environ 253 MW. Selon le conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), une contribution de l'Algérie dans ce domaine reste à révéler[WWW 03].

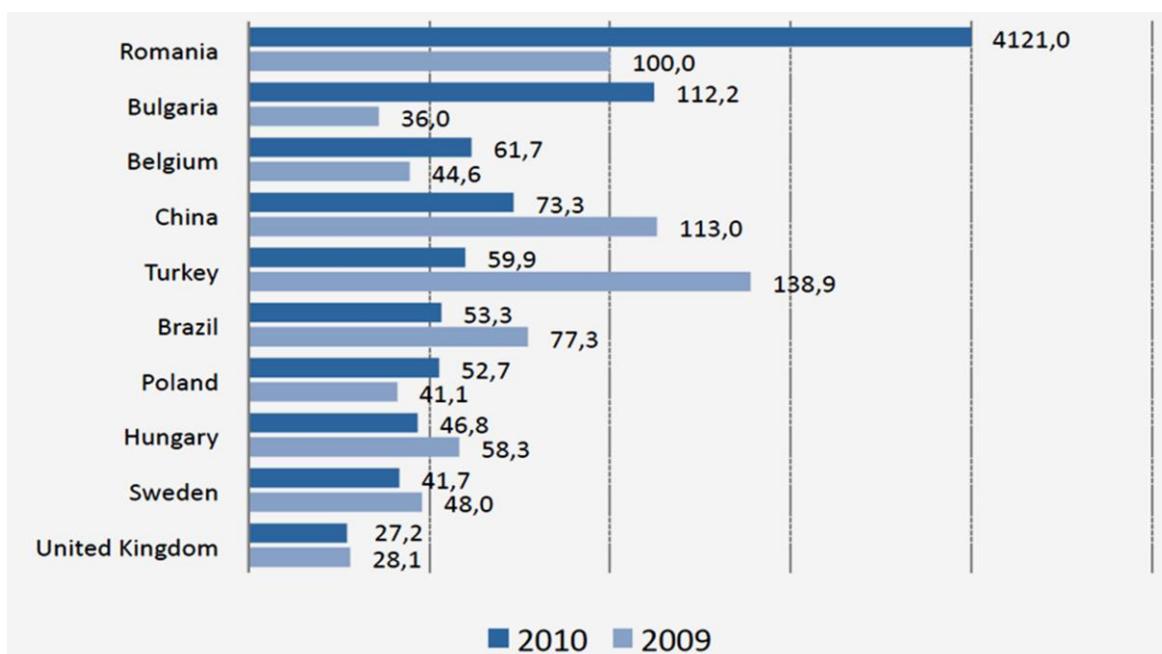


Figure I.3: Les plus grands pays exploitants d'énergie éolienne selon [WWW 02].

I.4.2.2 Répartition au niveau continental

La plus forte progression de l'industrie éolienne se situe en Asie, et le centre de gravité de l'éolien mondial s'est encore éloigné de l'Europe et de l'Amérique du Nord. L'Asie est devenue le nouveau continent leader avec 54.6% des nouvelles installations (40.4% en 2009, 31.5% en 2008). [WWW 02].

Il y a cinq ans, l'Europe dominait le marché mondial avec 70.7% de la capacité ajoutée et elle est passée en troisième position en 2009. En 2010.

L'Europe est repassée en deuxième position et représente 27% des nouvelles installations (27.3 % en 2009 et 32.8% en 2008, devant l'Amérique du Nord, passée de 28.4% en 2009 à 16.7% en 2010. [WWW 02].

L'Europe représente maintenant nettement moins de la moitié de la capacité totale. Dans les années passées, la part de l'Europe est progressivement passée de 65.5% en 2006 à 43.7% en 2010. L'Amérique latine (1.0%, après 1.5% en 2009 et 0.6% en 2008) et l'Afrique (constamment à 0.5 % depuis 2008) ne représentent toujours que des parts mineures. L'Amérique latine a une part de 1.2% dans les nouvelles installations (1.5% en 2009 et 0.4% en 2008) alors que l'Afrique demeure à 0.4% (0.4% en 2009 et 0.3% en 2008), [WWW 02].

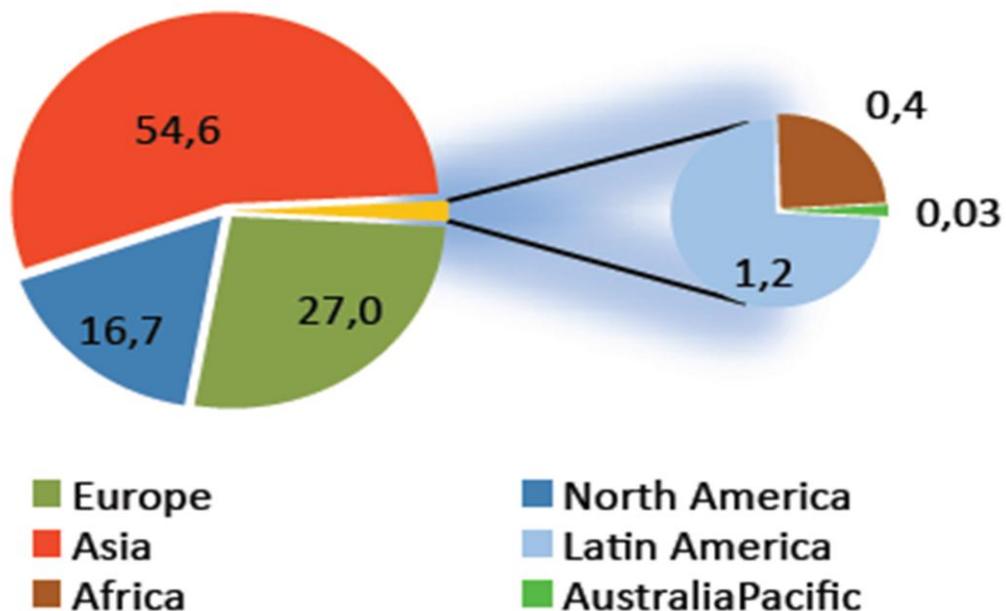


Figure I.4: Répartition continentale des capacités ajoutées en 2010 (%), [WWW 02].

➤ *Afrique*

L'ensemble des machines installées en Afrique fin 2010 représente un total de 906MW (0.5 % du total mondial), dont 155 M'ajoutes en 2010 (169 MW en 2009) dans trois pays : Égypte, Maroc et Afrique du Sud., [WWW 02].

Bien que l'Afrique soit déjà peu équipée, le taux de croissance de 2010 (20%) reste en dessous de la moyenne mondiale (23.6%). Avec l'Égypte (550 MW installés) et le Maroc (286 MW), les leaders africains se trouvent en Afrique du Nord. Avec la Tunisie (54 MW) cette région se taille la part du lion du total Africain (890 MW pour ces trois pays sur un total de 906 MW).

Avec l'introduction d'un tarif subventionné, l'Afrique du Sud, avec son potentiel actuel de 10 MW, peut devenir le leader du sud du continent africain. 700 MW de nouveaux projets ont ainsi attendu d'ici 2013.,[WWW 02].

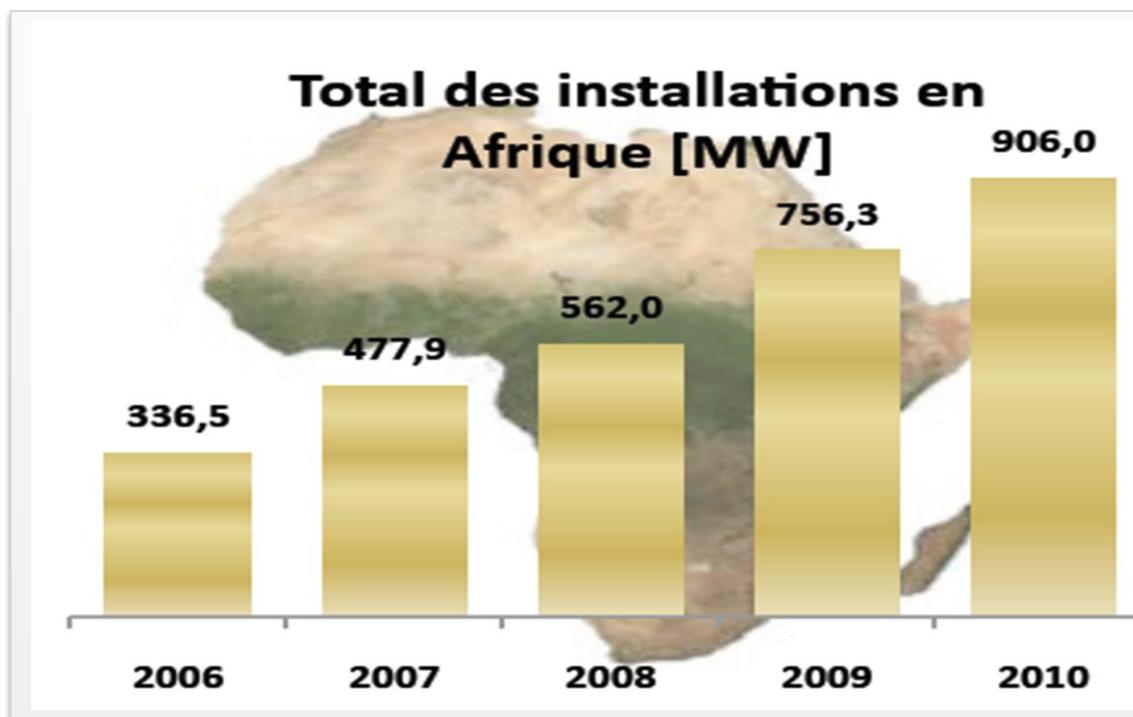


Figure I.5 : Total des installations en Afrique (MW), [WWW 02].

De manière générale, de nouveaux soutiens politiques seront nécessaires pour le financement des parcs éoliens africains, spécialement en zone subsaharienne. Une attention particulière doit être portée au petit éolien et aux systèmes hybrides pour l'électrification rurale afin que des millions d'Africains puissent enfin bénéficier de services d'électricité modernes.,[WWW 02].

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar, [ABD 08].

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [KAS 08].

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes [KAS 08]:

- ✚ deux zones sur le littoral
- ✚ trois zones sur les hauts plateaux
- ✚ et quatre zones en sites sahariens.

Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitables soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007. Les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes, car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an, [KAS 08].

La figure I.6 présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelables CDER laboratoire de l'énergie éolienne, [ABD 08].

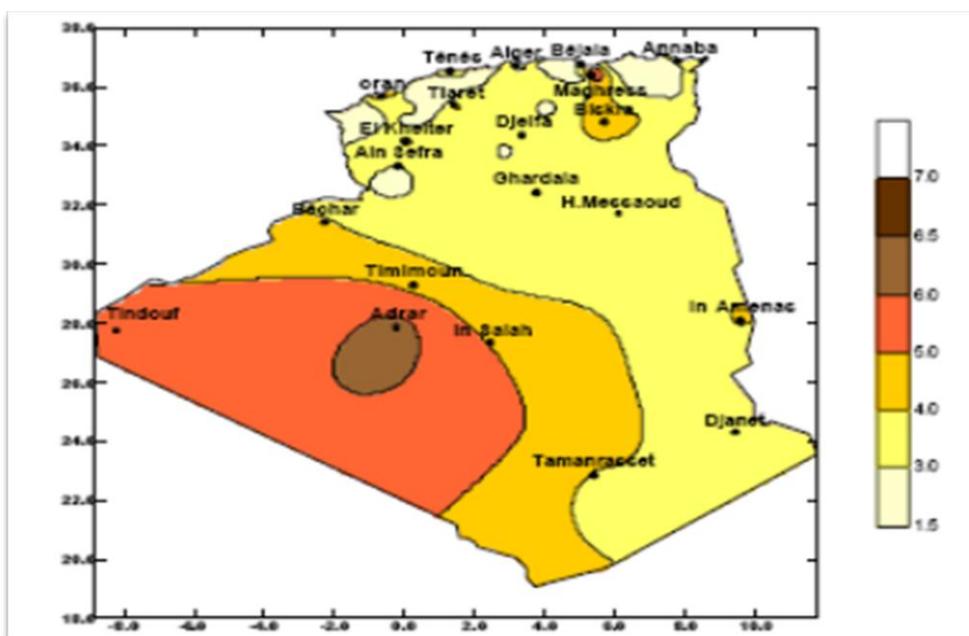


Figure I.6: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie, [HAM 03].

I.4.3 Différents types d'Eoliennes

Le capteur éolien encore appelé voileure de l'aérogénérateur, assure la conversion de la puissance aérodynamique du vent (masse d'air / vitesse) en une autre mécanique (couple / vitesse angulaire). Les différents types de voilures qui existent de nos jours sur les sites éoliens sont : les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

I.4.3.1 Turbines éoliennes à axe horizontal :

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) ou les multi-pales.



Moulin hollandais

Moulin americain

voilure bipale

voilure tripale

Figure I.7: *Captteurs à axe horizontal, [GAS 11].*

La voileure peut être placée avant la nacelle (up-Wind), un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » sera donc nécessaire. Une autre solution permettant d'alléger la construction par la suppression de toute mécanique d'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (down-Wind), dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont dues au passage des pales derrière le mat. La figure (I.8) montre les deux procédés [MIR 05].

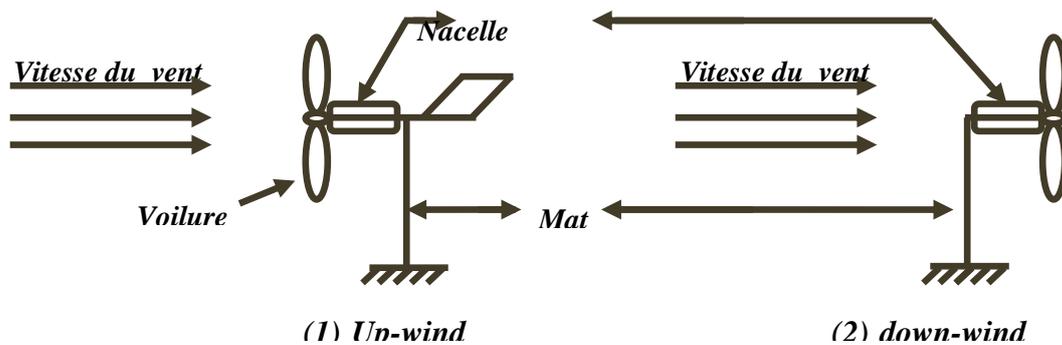


Figure I.8: Type de montage d'une voile à axe horizontal [MIR 05].

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « *pitch* » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de *kW*). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe, ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voile. [GAS 11]

La seconde technique est passive, dites « *stall* », consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue [MIR 05]. [GAS 11]

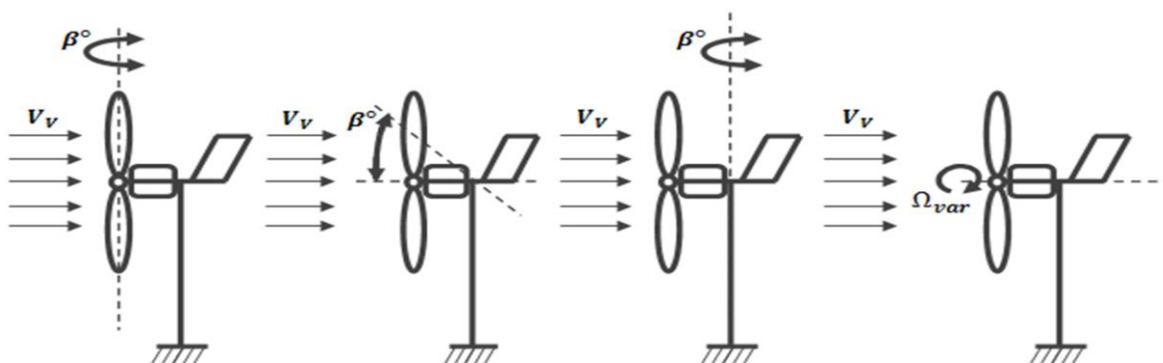


Figure I.9 : Limitation de puissance éolienne a) *pitch*, b) déviation verticale de l'axe de rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse de rotation continûment variable

La dernière famille qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité. Le plus souvent, dans les turbines classiques à axe horizontal, le dispositif de réglage à fréquence variable est associé à un réglage mécanique (pitch ou stall) [MIR 05].

➤ **Avantages d'une éolienne à axe horizontal**

- ✚ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✚ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ✚ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

➤ **Inconvénients d'une éolienne à axe horizontal**

- ✚ Coût de construction très élevé.
- ✚ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident [MET 09].

I.4.3.2 Turbines éoliennes à axe vertical.

Une autre famille d'éoliennes basée sur les voilures à l'axe vertical, ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Ils ont été probablement les premiers utilisés, par la suite ils ont été abandonnés au profit des précédents, [GAS 11].



Rotor de Darrieus

Darrieus type H

Rotor de Savonius

Figure I.10 : Capteurs à axe vertical,[GAS 11].

C'est récemment qu'ils ont été de nouveau réutilisés et reçoivent un développement important qui en fait des concurrents directs des capteurs à axe horizontal en présentant un certain nombre d'avantages,[MUL D3].

L'avantage de ce type d'éolienne est qu'elle ne nécessite pas de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement, car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal ,[GAS 11].

➤ *Avantages d'une éolienne à axe vertical*

- ✚ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.

- ✚ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelque soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.

- ✚ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

➤ *Inconvénients d'une éolienne à axe vertical*

- ✚ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.

- ✚ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort, car freiné par le relief.

- ✚ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour[MET 09].

I.4.4 Éolienne à vitesse fixe ou à vitesse variable

La figure (I.11) ci-dessous illustre les différents abaques de puissance en fonction de quelques vitesses de vent en (m/s) et celles de la machine en (tr/sec). Une éolienne fonctionnant à vitesse fixe, consiste à imposer une vitesse constante par le convertisseur électromécanique (générateur), en fixant cette vitesse à " $\Omega_r = 3 \text{ tr/sec}$ " soit (180 tr/min), on remarque que la puissance extraite du vent n'est optimale que si la vitesse du vent est au voisinage de " 8 m/sec " (figure (I.11)); ainsi on parle d'une éolienne à vitesse fixe. L'éolienne à vitesse variable consiste à faire tourner la machine à une vitesse de telle sorte que la puissance extraite sera toujours maximisée ; il suffit de suivre le tracé parabolique de la

figure(I.11). En se référant à la figure ci-dessous, pour une vitesse de vent égale à 12 m/s , nous devons fixer la vitesse du générateur à $4,5\text{ tr/sec}$ soit 270 tr/min , pour une vitesse de vent de 10 m/s le générateur doit tourner à une vitesse égale à $3,65\text{ tr/sec}$ soit 219 tr/min , et ainsi de suite. On parle alors d'un algorithme de poursuite du point maximal (maximisation de puissance), encore appelé algorithme de (MPPT),[GAS 11].

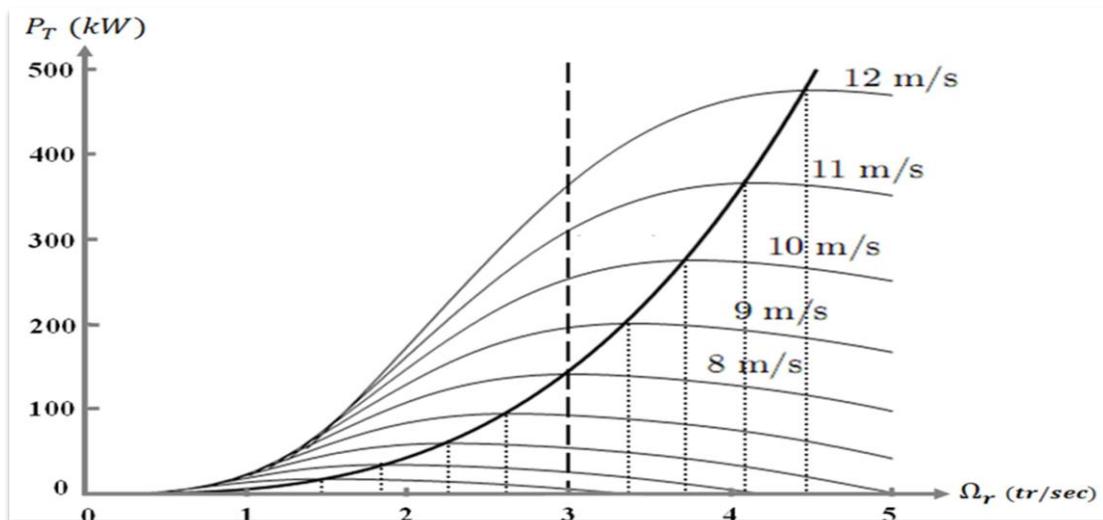


Figure I.11: Puissance d'une éolienne typique en fonction de la vitesse de la machine et celle du vent [BIA 07].

Le graphique de la figure I.12 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite (λ) pour différents types d'éoliennes

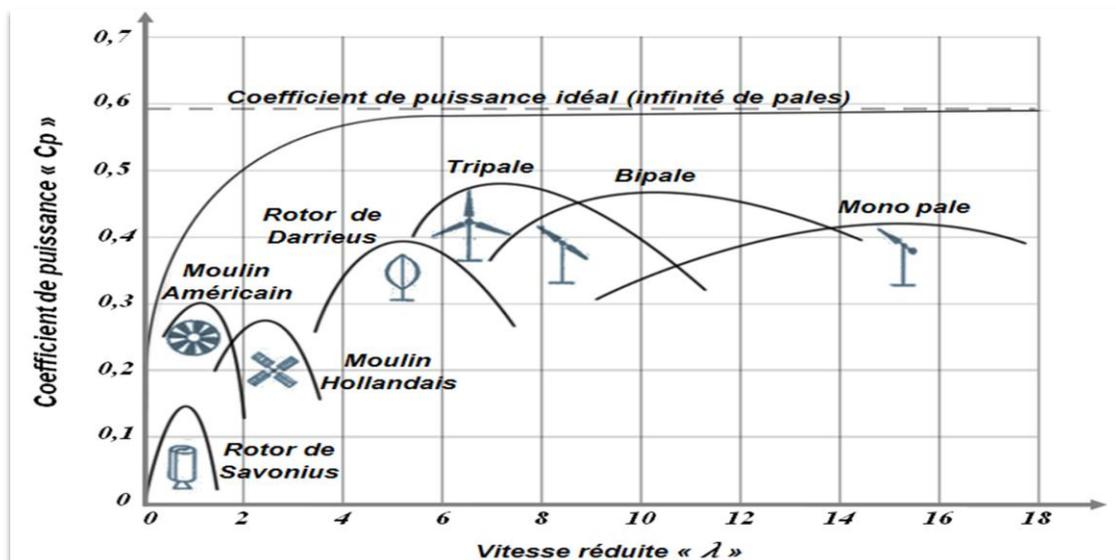


Figure I.12: Classement des types d'éolienne selon le coefficient « C_p » [Muk 99]

I.4.5 Constitution d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présents sur la figure I.13

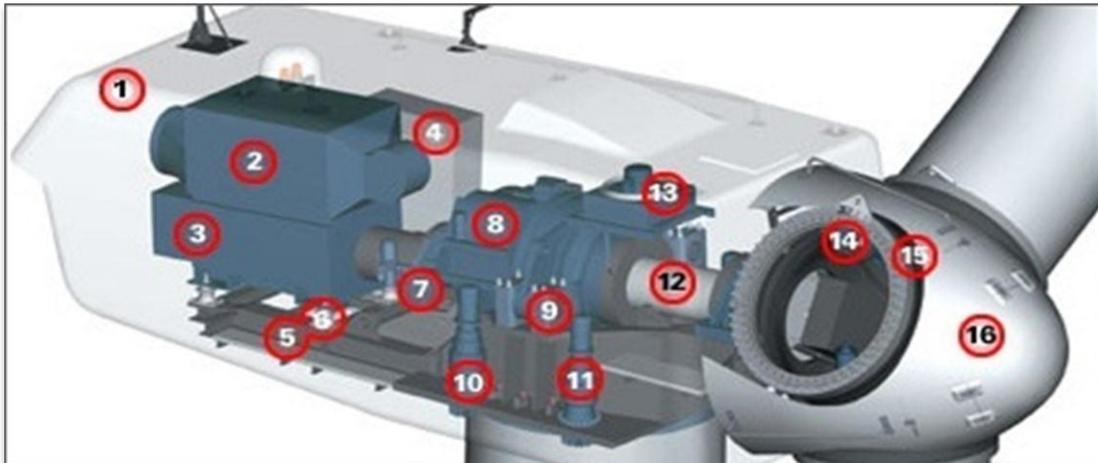


Figure I.13: Exemple de système éolien, [LAV 05].

Un mat, ou tour, supporte la nacelle (1) et la turbine (16). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. Il est tubulaire et contient une échelle voire un ascenseur. La nacelle (1) partiellement insonorisée (6), (9), avec une armature métallique (5), accueille la génératrice (3) et son système de refroidissement (2), le multiplicateur de vitesse (8) et différents équipements électroniques de contrôle (4) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne, [LAV 05].

Le multiplicateur de vitesse (quand il existe) comporte un arbre lent (12) supportant, la turbine (16) et un arbre à grande vitesse (1000 à 2000 tours/min). Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7), auquel est accouplé le générateur (3). Le multiplicateur de vitesse peut être pourvu d'un système de refroidissement (13) à huile, [LAV 05].

La turbine (16) possède trois pales (15) qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre lent. Un système électromécanique (14) permet généralement d'orienter les pales et de contrôler ainsi le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par « mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un mécanisme utilisant des servomoteurs électriques (10), (11) permet d'orienter la nacelle face au vent. Un anémomètre et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent, [LAV 05].

I.4.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages.

Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.4.6.1 *Avantages*

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- ✚ L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [CAM 03]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [CAM 03]. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [CAM 03].
- ✚ L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de C_{O2}
- ✚ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier,[CAM 03].
- ✚ Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de C_{O2}, 21 mille tonnes de S_{O2} et 17,5 mille tonnes de N_{Ox} [CAM 03]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- ✚ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie, [CAM 03].
- ✚ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique, [CAM 03].

- ✚ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace l'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains [CAM 03].
- ✚ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales, [CAM 03].
- ✚ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [CAM 03].
- ✚ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà, [CAM 03].
- ✚ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle, [CAM 03].

I.4.6.2 Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients

- ✚ L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif, [CAM 03].
- ✚ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle -ci doit donc être limitée, [CAM 03].
- ✚ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs , [CAM 03]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aeroturbines [CAM 03].
- ✚ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance

produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes, [CAM 03].

- ✚ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là où il y a le plus de vent, est en train de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés, [CAM 03].

I.4.7 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes :

- ✚ Systèmes isolés.
- ✚ Systèmes hybrides.
- ✚ Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage,[DOU 10].

I.4.7.1 *Systèmes Isolés*

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, [DOU 10].

Les systèmes isolés en général utilisent quelques formes de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif, il est nécessaire d'utiliser un onduleur,[DOU 10].

I.4.7.2 *Systèmes Hybrides*

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur,[DOU 10].

I.4.7.3 Systèmes Liés au Réseau

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne est raccordée à des grands réseaux de puissance [LOP 06]. Ceci s'explique par les nombreux avantages du fonctionnement des centrales éoliennes sur les réseaux :

- ✚ La puissance des turbines éoliennes ne doit pas être nécessairement commandée en fonction de la demande instantanée d'un client spécifique,
- ✚ Le manque de puissance délivrée par les éoliennes est compensé par les centrales conventionnelles,

Ainsi, le fonctionnement des turbines éoliennes connectées aux réseaux est techniquement moins complexe que son application individuelle isolée. [LOP 06]

I.5 LA CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE DANS LES SYSTÈMES EOLIENS

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'énergie électrique. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable, [LOP 06]. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne, [CAM 03]. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, [LOP 06] le générateur asynchrone est plus courant et économique, [LOP 06], [POI 03]. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

I.5.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone

I.5.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Écureuil (GACE)

La machine asynchrone à cage d'écureuil en fonctionnement génératrice équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde, [POI 03]. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), [BEL 07].

Les machines asynchrones à cage sont connues par leur construction extrêmement simple, leurs robustesses, leurs sécurités de fonctionnement, l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissant sur des bagues ainsi leur coût très compétitif. Elles ont aussi l'avantage d'être

fabriquées en grande quantité et dans une très grande quantité d'échelle des puissances, moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé, [BEL 07].

La majorité des applications en éolien (85%) sont à vitesse de rotation constante et à connexion directe au réseau. La figure (I.14) représente la configuration la plus simple utilisant une machine asynchrone à cage, [BEL 07]. La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine, [POI 03]. Nous remarquons l'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, qui ont pour objectif de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie, [BEL 07].

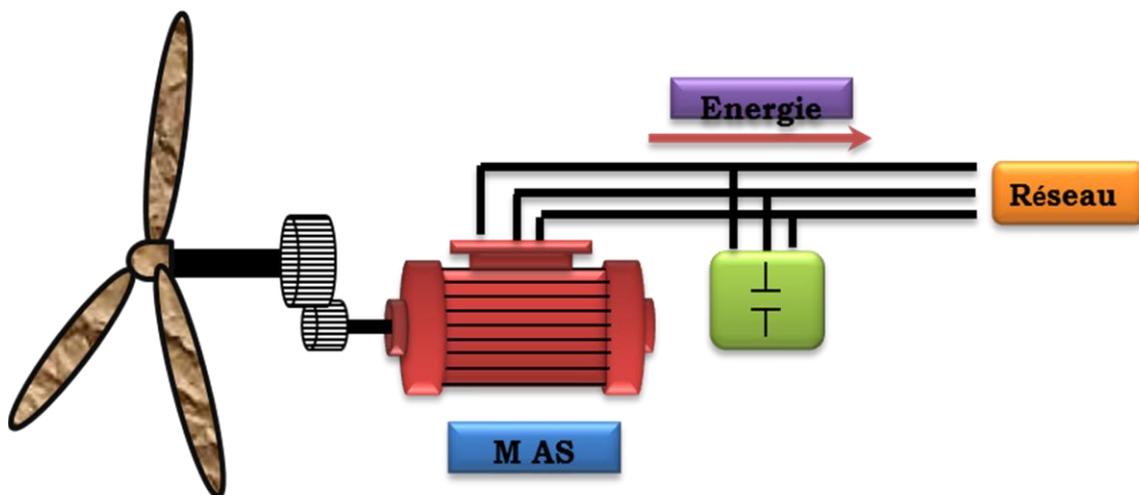


Figure I.14: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Par contre, cette configuration représente quelques inconvénients :

- il n'y a pas d'accès pour récupérer l'énergie induit dans le rotor ;
- elle ne permet pas une vitesse variable ;
- le courant débité au réseau est perturbé à cause la variation brusque du Couple ;
- elle ne fonctionne en régime autonome qu'en présence des condensateurs ;

I.5.1.2 Générateur asynchrone à double stator

Pour exploiter plus d'énergie de vent par le dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (figure I.15) :

Cette machine présente deux enroulements au stator, l'un de forte puissance à petit nombre de paires de pôles pour les vitesses de vent les plus élevées, l'autre de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les vitesses les plus faibles. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents, [BEL 07].

Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent, car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble. [POI 03], [BEL 07].

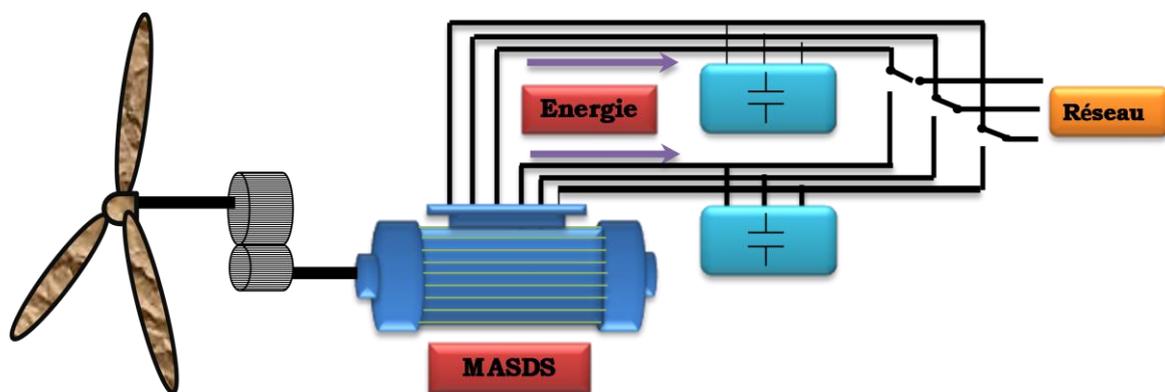


Figure I.15 : Générateur asynchrone à double stator

1.5.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Cette configuration est présentée dans la figure suivante (Figure I.16). Elle est composée d'une machine asynchrone à cage avec un seul stator, d'un multiplicateur, un redresseur et un onduleur inséré entre le stator de la machine et le réseau. Ceci augmente considérablement le coût et les pertes qui peuvent avoir une valeur de 3% de la puissance nominale de la machine. Puisque le redresseur est unidirectionnel, pour la magnétisation de la machine, on a besoin des condensateurs en parallèle au stator, [BEL 07].

Cette configuration permet un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent, et la commande MLI vectorielle de l'onduleur adapte la fréquence de la puissance fournie de la machine à la fréquence du réseau en présence de n'importe quelle vitesse du rotor.

Avec cette configuration, la puissance nominale de la génératrice détermine la puissance maximale de l'éolienne

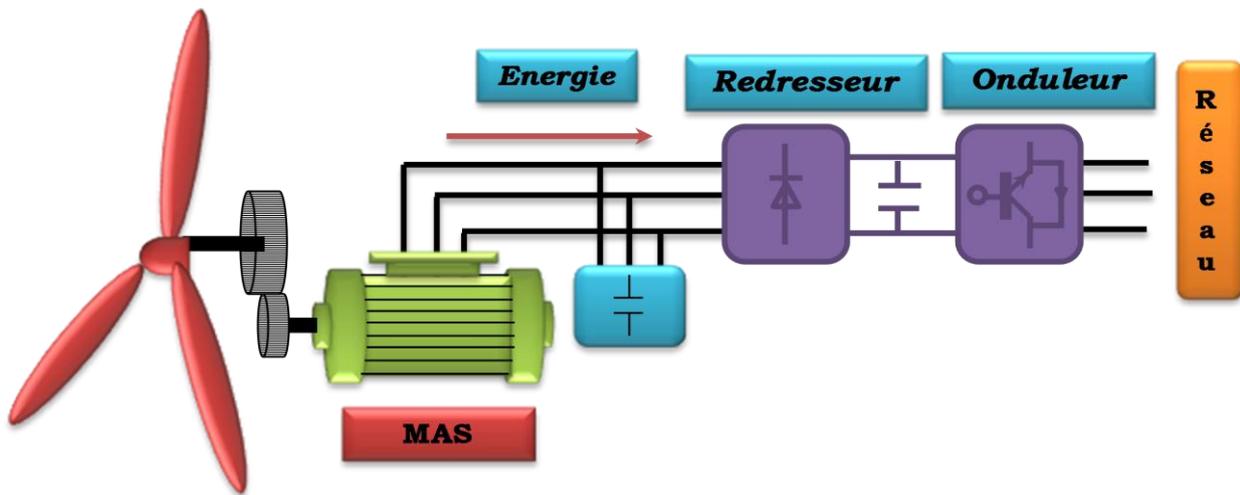


Figure I.16 : Connexion indirecte d'une machine asynchrone sur le réseau

Toutefois, le redresseur peut être remplacé par un onduleur, ce qui permet le transfert de la puissance réactive dans les deux sens (Figure I.17) et ainsi fournir la puissance réactive à la machine asynchrone et éviter les condensateurs du montage précédent.

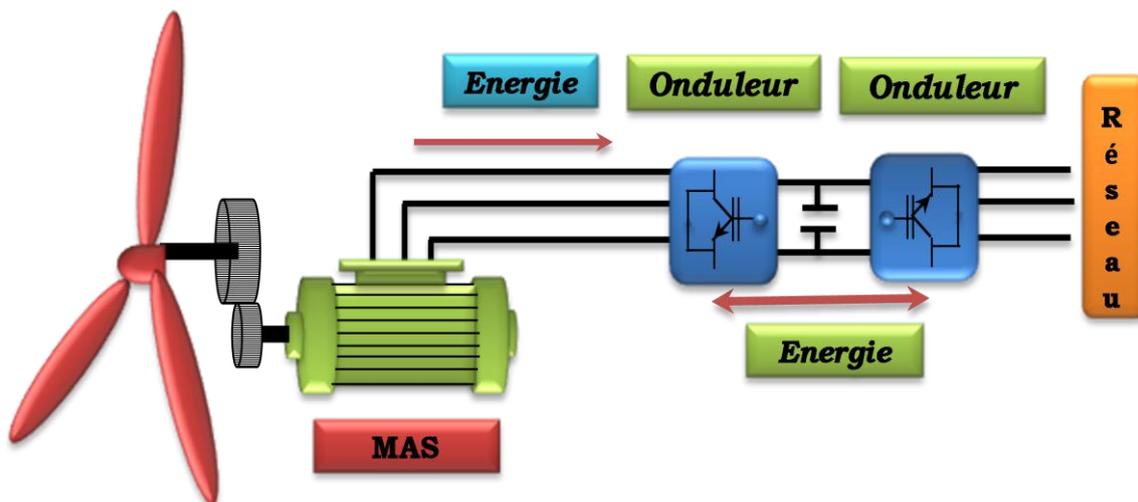


Figure I.17 : Générateur asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de deux onduleurs

Cette structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (figure I.17)

Néanmoins, ces deux solutions présentent plusieurs inconvénients : l'augmentation considérable du coût et la complexité de mise en œuvre [POI 03].

Ces deux configurations ne sont pas appliquées en pratique, pour les inconvénients cités ci-dessus. En plus, la puissance réelle extraite est beaucoup plus faible à cause de l'association du multiplicateur, la génératrice et les convertisseurs.

I.5.2 Systèmes utilisant la machine synchrone

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (Figure I.18), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [LOP 06], [CAM 03].

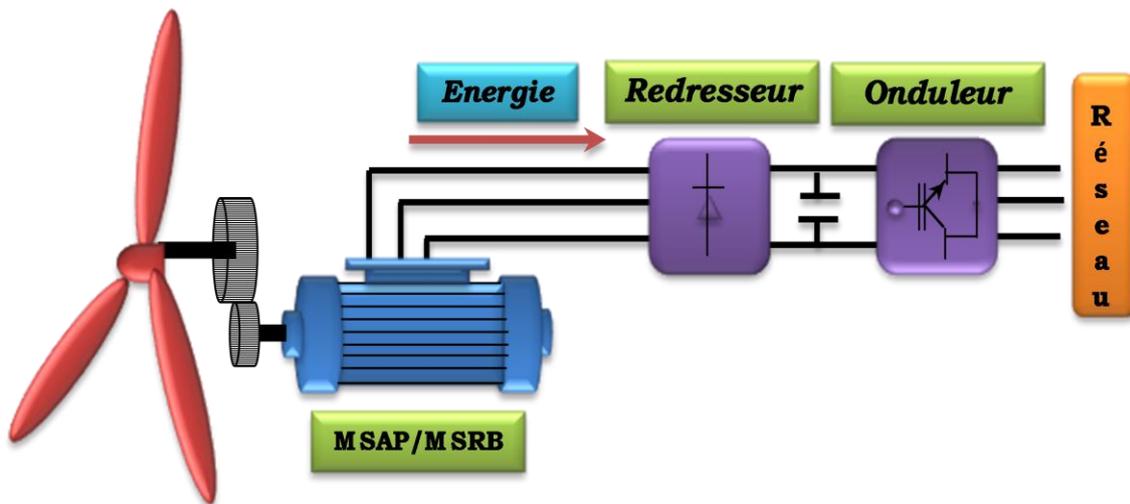


Figure I.18: système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable

I.5.2.1 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le MSRB tourne à vitesse constante, laquelle est fixée 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. [LOP 06].

1.5.2.2 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif, [LOP 06].

1.5.3 Evolution des systèmes de (G V V) vers la double alimentation.

Le système de GVV éolien idéal doit être composé d'un minimum d'éléments capables d'optimiser le transfert de l'énergie présente dans le vent. La diminution de puissance du convertisseur statique permet la minimisation des composants de filtrage et de conversion, l'accroissement de la fiabilité de l'électronique, la diminution du coût de l'ensemble et l'amélioration de la qualité d'onde générée (grâce à la diminution de l'amplitude des courants commutés par le convertisseur et l'augmentation de la fréquence de hachage), cette topologie est le meilleur choix des fabricants.[POZ 03].

1.5.3.1 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment, car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne, [BOY 06]. Le stator est directement relié au réseau tandis que les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure I.19).

La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine par le rotor permet de fonctionner à la fréquence et l'amplitude nominale du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse de synchronisme [POZ 03]. 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, [POI 03], [POZ 03], [LOP 06].

Si, par exemple, on a prévu une plage de variation de vitesse de $\pm 30\%$ autour du synchronisme, il faudra 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 dans une plage de 25% à 50% de la vitesse nominale), [POZ 03], [POI 03].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système 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, [MIR 05].

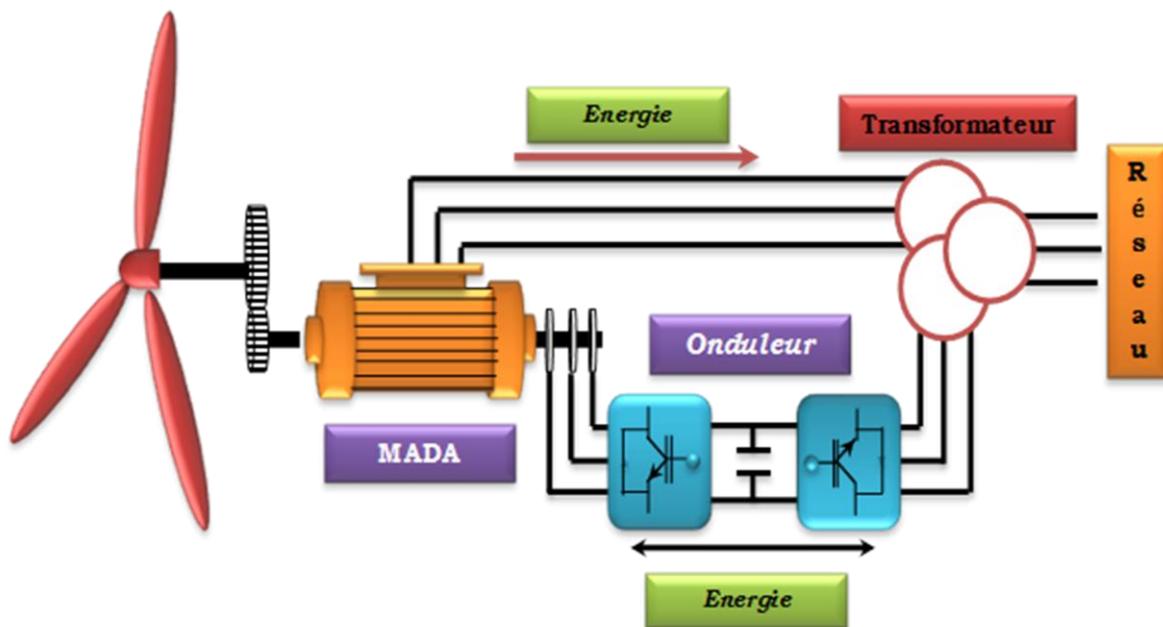


Figure I.19 : schéma de principe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée par le rotor

Le résumé des points forts de la MADA sont, [LOP 06]. :

- ✚ Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- ✚ Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- ✚ Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- ✚ La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de

synchronisme. Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

✚ Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

Pour remédier le problème de la présence de bague-balais, les chercheurs : [PAT 05], [PAT 06], [PAT 09], [ADA 07], [ADA 08], [ADA 09], [HOP 00], [HOP 01], [JAL 09], [PRO 09], [LI 01], [ZHO-97], [POZ 03], [POZ 06]..... proposent une autre structure qui s'appelle machine asynchrone à double alimentation sans balais (*brushless*). On envisage même l'utilisation de deux machines sur le même arbre, l'une servant à la production électrique et l'autre à l'alimentation des enroulements rotoriques, [BOY 06].

I.5.3.2 Machine Asynchrone à double alimentation en cascade

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la MAC et de la MADA. Elle peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée [HOP-01]. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (figure I.20). La puissance à travers l'ensemble convertisseur/BC est proportionnelle au glissement du rotor (BP). La maîtrise de l'état électromagnétique de la machine est assurée par le bobinage de commande, ce qui permet de générer dans le bobinage de puissance une tension à la fréquence et amplitude nominales du réseau même si le rotor s'éloigne de la vitesse synchronique, [POZ 03], [KHO 06], [VID 04].

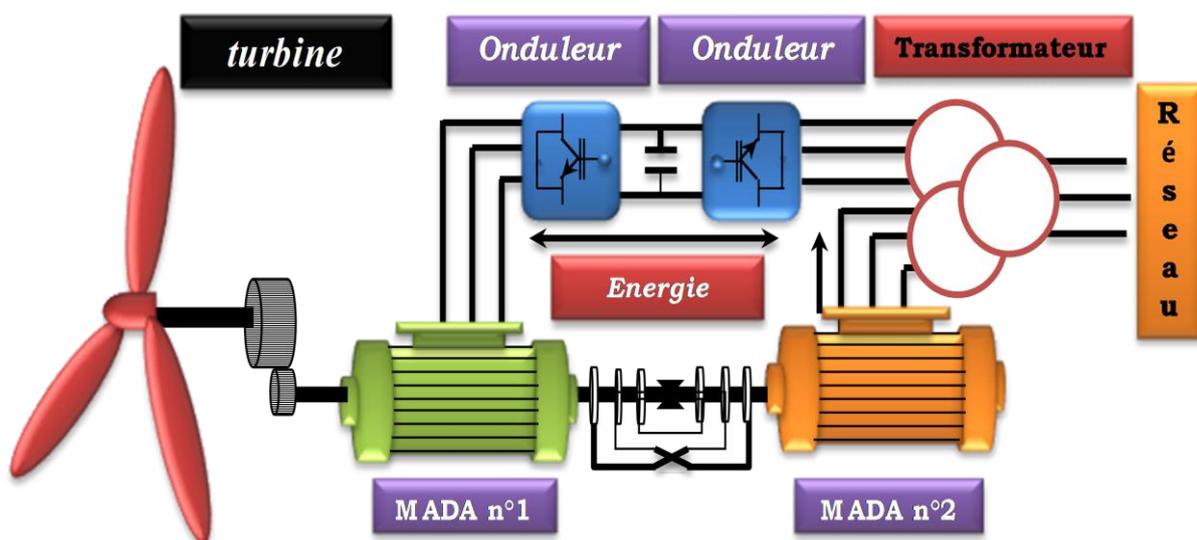


Figure I.20: Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade

- Les deux stators peuvent être inclus dans la même carcasse et le rotor peut adopter une structure à cage (Figure I.21) [HOP-01], [POZ 03]. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines, [VID 04].

I.5.3.3 Machine Asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB)

La cascade est une association de deux MADA que nous considérons comme distinctes (i.e. indépendantes). Afin d'optimiser et d'éviter l'encombrement de celui-ci. On place les enroulements des deux MADA dans des encoches communes : on parle alors de SF-CDFIG (Single Frame-Cascaded Doubly Fed Induction Generator) [HOP 01], [POZ 03], [PAT 06]. Dans une telle machine, des couplages magnétiques entre machines sont inévitables et il y a des précautions à prendre dans la conception pour les rendre nuls, en théorie, ou tout du moins aussi faibles que possible en pratique. Le point essentiel porte sur les nombres de paires de pôles des deux MADA. Afin d'obtenir deux MADA découplés magnétiquement, il faut que le flux créé par le stator de l'une ait une résultante nulle sur le stator de l'autre. Il est aisé de découpler deux bobinages en les plaçant en quadrature. Or, ici nous devons découpler des enroulements triphasés entre eux et il n'est donc pas possible dans ce cas d'obtenir un découplage par un simple décalage angulaire. On proposera plutôt un découplage par un choix judicieux des nombres de paires de pôles des deux MADA, comme cela est illustré par le schéma de la figure (I.23). On notera que les enroulements rotoriques peuvent être construits sous la forme d'une cage (figure I.22) d'après [RUN 06]. Et la construction du rotor fait d'une façon à respecter le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages stator. [POZ 03].

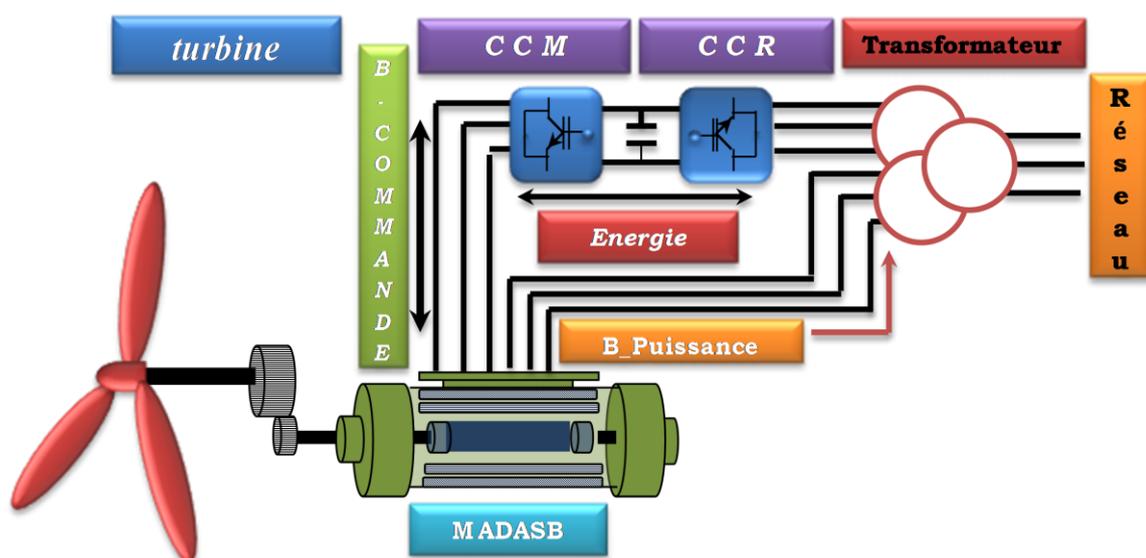


Figure I.21: machine asynchrone à double alimentation sans balais avec rotor à cage ou réductant

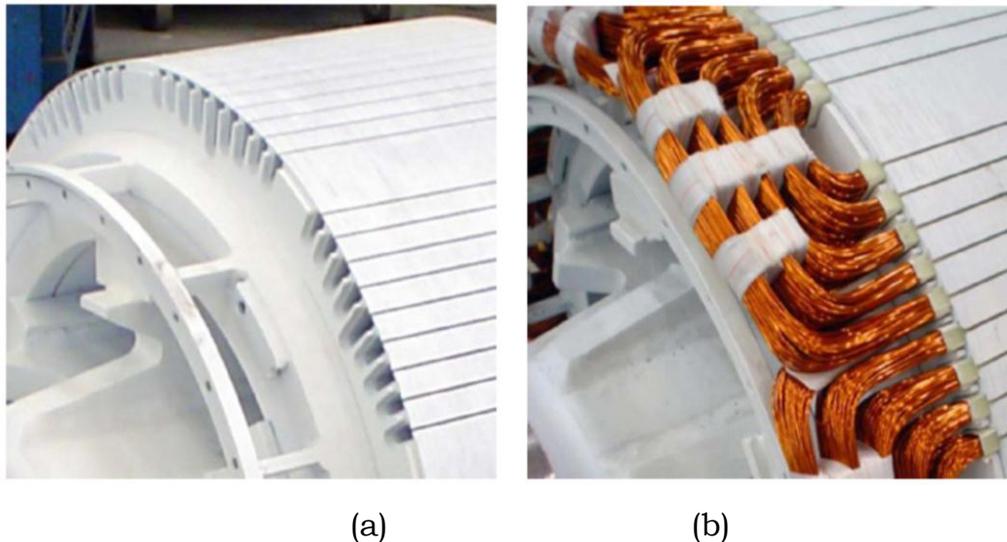


Figure I.22: Rotor de la MADASB

(a) Rotor sans conducteur; (b) Rotor Bobiné [RUN 06].

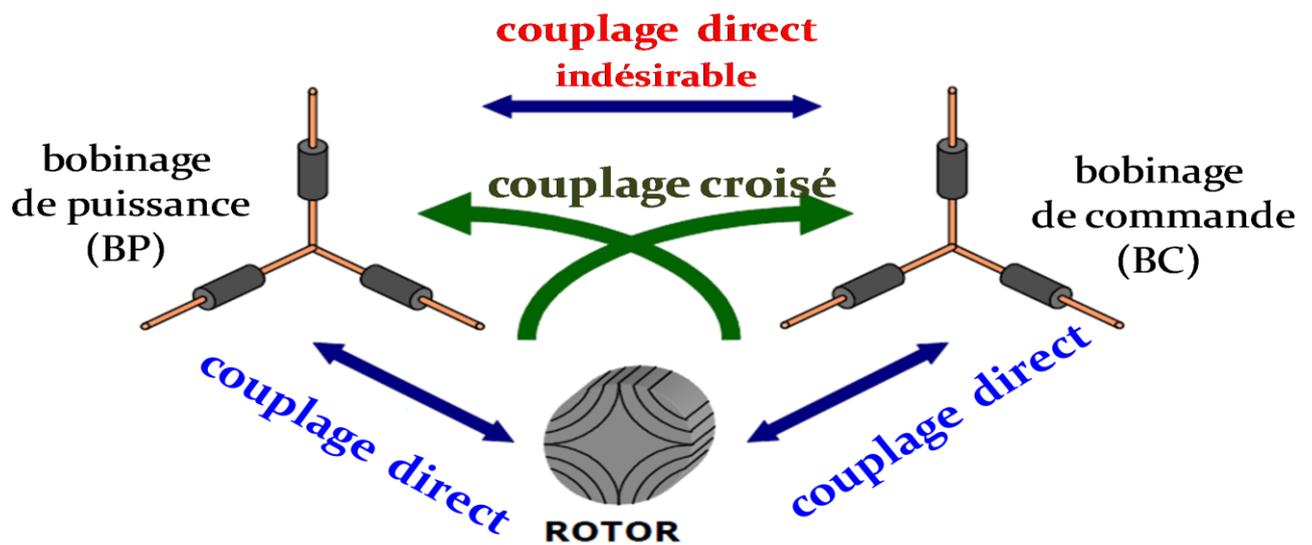


Figure I.23: Schéma de couplage croisé entre les deux stators

Les avantages potentiels de cette structure sont, [POZ 03] :

- ✚ 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.

I.5.3.4 Comparaison des topologies et choix de la MADASB

La MADASB fut proposée par René Spée (et autres) de l’Oregon State University (USA). À partir des premiers résultats de leur recherche, ils ont réalisé un brevet sur la conception de la machine et du modèle en régime permanent. Pendant la décade des années 90 ils ont publié des études diverses comprenant la conception, la modélisation [LI-91] et la commande [ZHO-97] de la machine, [POZ 03].

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

	1^{ère} génération Machine Asynchrone à Cage MAC	2^{ème} génération Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA	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

Tableau.I.1: Comparaison de différentes machines utilisées dans le SCE, [POZ 03].

Vu les avantages de la MADASB, cette dernière machine est appelée à constituer la 3^{ème} génération d'éoliennes. En attendant, l'industrie est en train d'évoluer de la GVC classique vers la GVV basée sur une structure MADA. Aujourd'hui il existe une grande quantité de parcs éoliens basés sur la GVV utilisant des structures MADA. Le choix de ces machines par les industrielles est une question de coût et de fiabilité. En effet, ces machines électriques ont été amplement utilisées dans les applications diverses pendant longtemps, donc leur disponibilité est haute, ce qui permet de réutiliser les modèles, les techniques de commande et les dispositifs auxiliaires déjà industrialisés,[POZ 03].

 Le choix de la (MADASB) a été retenu comme sujet principal de ce mémoire.

I.6 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes.

Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite la Conversion électromécanique dans les systèmes éoliens, trois grandes familles de machines sont présentées : machines asynchrones, machines synchrones et machines à structure spéciale.

Le dispositif du système éolien basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais regroupant les avantages de la MAC et de la MARB présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Cette dernière machine est appelée à constituer la 3^{ème} génération d'éoliennes.

**MODELISATION ET SIMULATION
DU SYSTEME DE CONVERSION
D'ENERGIE EOLIENNE.**

Chapitre II

Modélisation et Simulation du Système

de conversion d'Énergie Éolienne.

I.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est composé de trois parties :

Une première partie est consacrée à la modélisation et à la simulation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillée. Par la suite on calculera la puissance maximale pouvant être l'extraite à l'aide de la limite de Betz. Et enfin, en terminera la première partie par des résultats de simulation pour vérifier les modèles du système à étudier.

La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, à la modélisation de la cascade de deux machines asynchrones à double alimentation, et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais, et on terminera cette partie par une simulation de ces configurations (MADA, Cascade de deux MADA, et MADASB,) en fonctionnement générateur.

Dans la dernière partie, nous présenterons la modélisation de l'onduleur qui alimentera le stator de commande de la machine (MADASB), ainsi que la commande (MLI) de ce dernier.

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

Dans cette partie, on présente les principes de base de l'interaction entre les pales de la turbine éolienne et le vent pour en déduire les expressions simplifiées de la puissance convertie. Les différentes techniques de limitation ou de contrôle de cette puissance sont ensuite brièvement exposées.

Le schéma du système éolien basé sur une MADASB connectée au réseau électrique, incluant les différentes grandeurs mécaniques et électriques servant la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique, est illustré à la figure (II.1).

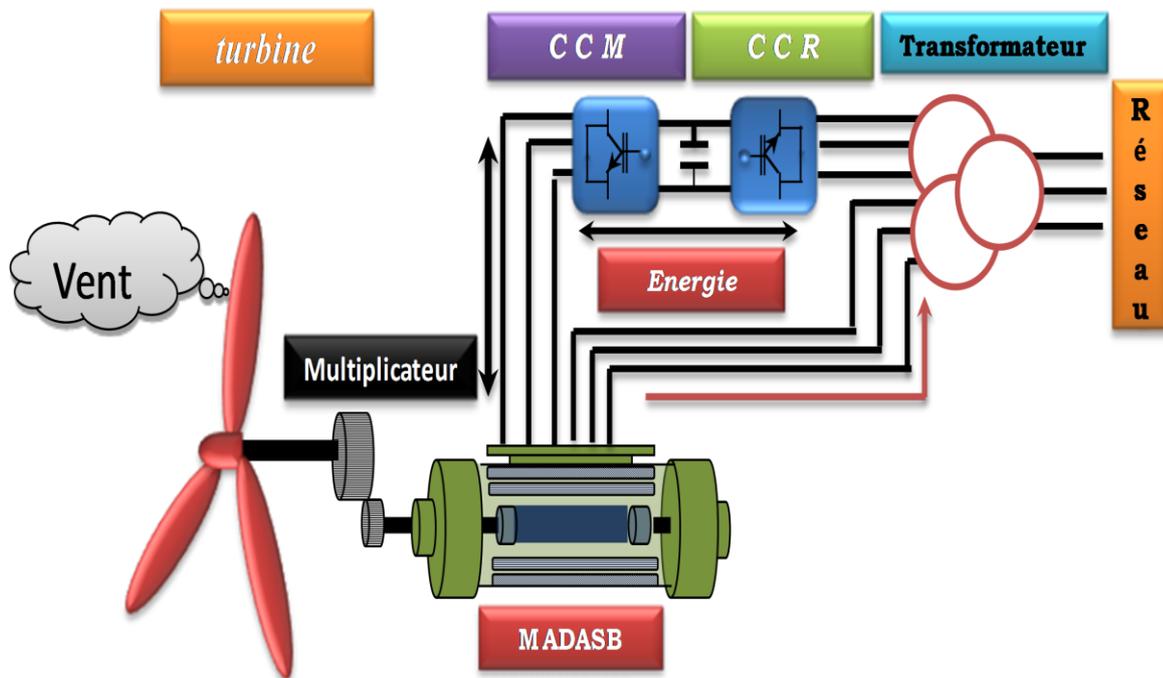


Figure II.1 : Schéma du système éolien à base d'une (MADASB) ou (BDFIG)

II.2.1. Modélisation de la turbine

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs. [MET 09]

II.2.2 Source primaire : le vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ des vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ des vitesses [BIA 07].

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés.[BIA 07], [M'UN 08]. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent, [MET 09].

II.2.2.1 Expression du vent en un point fixe

La vitesse du vent en un point $v_0(t)$ peut-être décomposée en une somme :la composante moyenne V (lentement variable) et la composante variable représentant les fluctuations $v_t(t)$:

$$v_0(t) = V + v_t(t) \quad (\text{II.1})$$

V : Vitesse moyenne du vent.

$v_t(t)$: Composante représentant la turbulence du vent.

La composante représentant la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par l'échelle de longueur L_v et l'écart type σ_v de cette turbulence. La définition de la composante turbulente se fait en 2étapes :

➤ *1^{ère} étape : reconstitution du spectre de la turbulence à partir d'un bruit blanc filtré*

Deux filtres largement utilisés sont le filtre de Von Karman et celui de Kaimal, le filtre de Von Karman peut être approché sous la forme suivante. [MUN 08],[MET 09].

$$\phi_v(S) = K_v \frac{(1 + m_1 T_v S)}{(1 + T_v S)(1 + m_2 T_v S)} \quad (\text{II.2})$$

Avec

$$m_1 = 0,4 \quad \text{et} \quad m_2 = 0,25$$

$$K_v = \sqrt{2 \cdot T_v (1 - m_2^2) \cdot \left(\frac{m_1^2}{m_2} - m_2 + 1 - m_2^2 \right)^{-1}}$$

$$T_v = L_v / V$$

K_v : Gain statique du filtre.

T_v : Constante de temps du filtre.

L_v : L'échelle de longueur de la turbulence obtenue expérimentalement et il dépend de la nature du terrain.

➤ **2^{ème} étape : définition de l'écart type de la turbulence σ_v**

L'écart type dépend de la vitesse moyenne V et d'un coefficient K_σ , qui dépend de la nature du terrain, et qui représente l'intensité de la turbulence.

$$\sigma_v = K_\sigma \cdot V \quad (\text{II.3})$$

K_σ : Le coefficient l'intensité de la turbulence.

[NIC 02], donne des ordres de grandeur de l'intensité K_σ et de l'échelle de longueur L_v de la turbulence pour divers sites.

Ainsi à partir d'un bruit blanc gaussien en entrée, il est possible de déterminer la composante de la turbulence c'est-à-dire de générer une série temporelle de la vitesse du vent dans un point $v_0(t)$ comme illustre sur la figure (II.2)

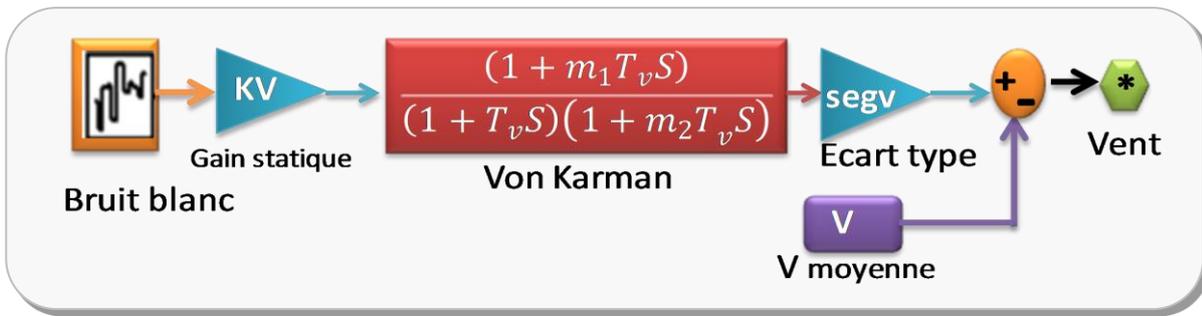


Figure II.2 : Construction de la vitesse de vent en un point.[MET 09].

II.2.2.2. Le filtre spatial

La vitesse du vent en un point de l'aire balayée par l'aéroturbine doit permettre de retrouver le couple éolien proche de celui que produirait le champ de vitesse du vent réel incident sur toute l'aire balayée par le rotor. Il a été démontré expérimentalement que seules les composantes basses fréquences du vent incident se retrouvaient dans le couple total produit par les pales. Par contre, l'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences[LAV 05].On reconstitue cet effet en appliquant sur la vitesse instantanée du vent un filtre dont la fonction de transfert simplifiée est donnée par :

$$G(s) = \frac{1}{1 + b \cdot S} \tag{II.4}$$

$$b = \gamma \cdot \frac{R_t}{V} \tag{II.5}$$

R_t : Rayon des pales de l'éolienne

γ : Facteur d'affaiblissement sur le rotor ($\gamma = 1.3$)

La figure (II.3) montre l'évolution de la vitesse du vent avant et après le filtre spatial.

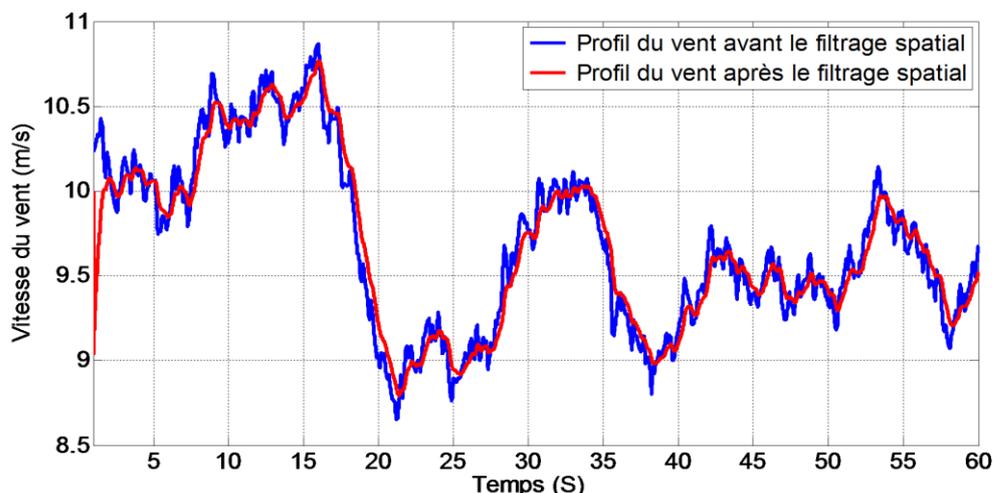


Figure II.3: Profil du vent avec et sans filtre spatial pour une vitesse moyenne $V = 10m/sec$.

D'après la figure(II. 3), nous remarquons que les pics présentant la haute variation du vent ont diminué considérablement, du fait qu'ils se sont réduits les uns avec les autres dans divers points de la turbine, ce qui en résulte que : le vent à la sortie du filtre spatial, présente la partie efficace du vent incident sur les pales de la turbine.

II.2.3 La conversion aérodynamique

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie Cinétique contenue dans le vent. Cette théorie est rappelée dans l'annexe A, elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_t :

$$P_t = C_p \cdot P_{amont} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.6})$$

Où λ est défini par:

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (\text{II.7})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de Betz, égale à (0,593) et qui n'est jamais atteinte en pratique,[HEI 98].

Dans le cadre de cette mémoire, nous utiliserons une expression approchée du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage des pales β dont l'expression a pour origine les travaux de El Aïmai [ELA 04] :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.35 - 0.00167 \cdot (\beta - 2)) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.8})$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot R_t^3 \pi \cdot V^2}{\lambda} C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.9})$$

II.2.4 Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R_t . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation Ω_t , reliée à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la figure (II.4) dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée. [GAI 10],[MET 09].

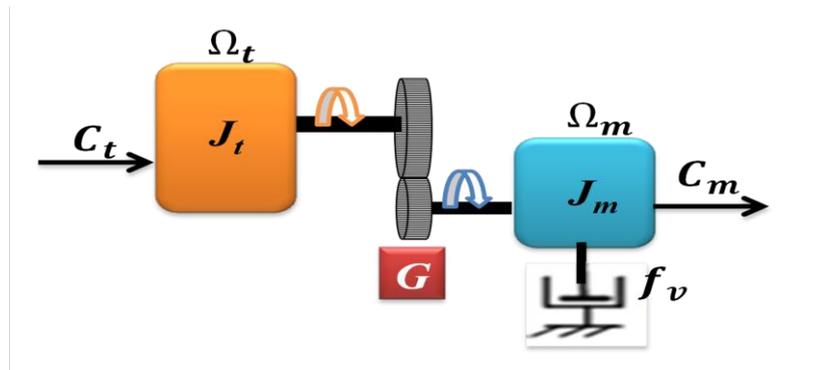


Figure II.4: Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la machine (arbre rapide) (figure II.4). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.10})$$

$$\Omega_m = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.11})$$

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

$$\left(\frac{J_T}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (II.12)$$

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique de la machine.

Le schéma bloc de la figure (II.5) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la machine, donc de la turbine, peut-être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la machine. La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice au système [GAI 10].

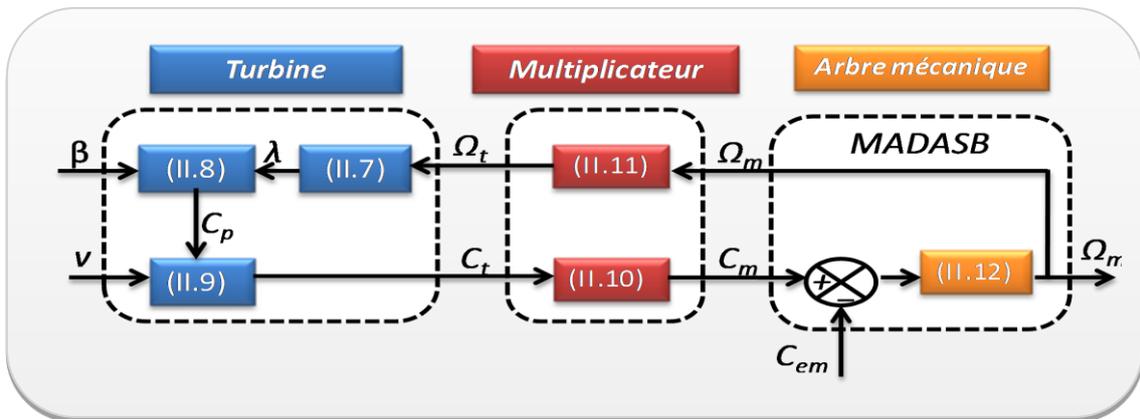


Figure II.5: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

II.2.4.1 Modèle de l'actionneur des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance, voir la figure (II.6). Les pales sont face au vent en basse vitesse et pour les fortes vitesses elles s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance.

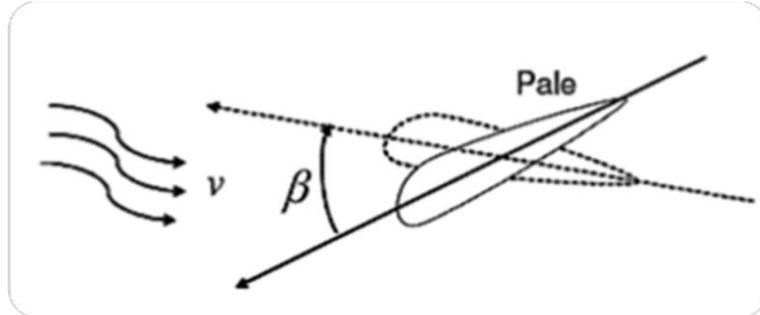


Figure II.6 : Orientation des pales

La boucle de régulation de la vitesse de variation de l'angle de calage a été approchée par une fonction de transfert de 1^{er} ordre avec une constante de temps T_β . Pour obtenir une repense réaliste, un limiteur est introduit pour limiter la vitesse de variation de β à environ $10^0/s$, [MUY 09][MET 09].

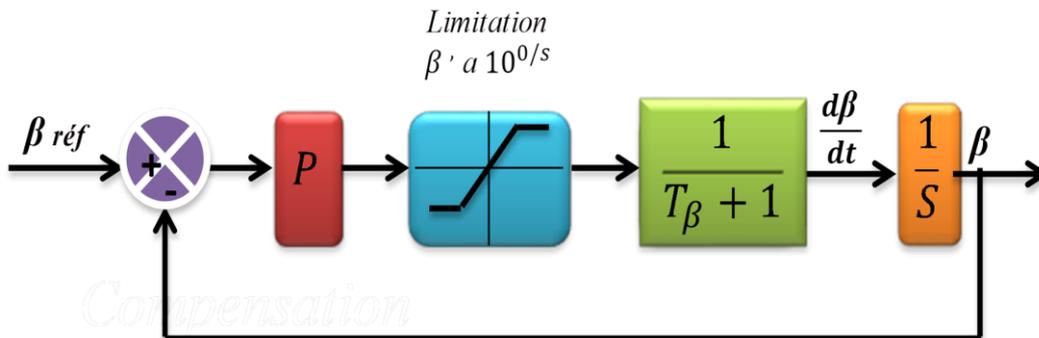


Figure II.7 : Boucle de régulation de l'angle de calage des pales [MET 09].

II.2.5 Résultats obtenus

Nous présentons la simulation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne. Les simulations sont faites dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ces résultats obtenus basées sur la structure de commande sans asservissement de la vitesse.

Nous n'allons pas raccorder l'hélice et le multiplicateur à une génératrice, mais tout simplement observer la vitesse, le couple et la puissance produits à la sortie du multiplicateur en

fonction de l'évolution du vent, mais aussi l'angle de calage β sera constant le long de simulation à la valeur 2° .

On remarque que le couple et la puissance de référence suivent les évolutions du vent. Ils sont négatifs pour respecter la convention réceptrice de l'ensemble.

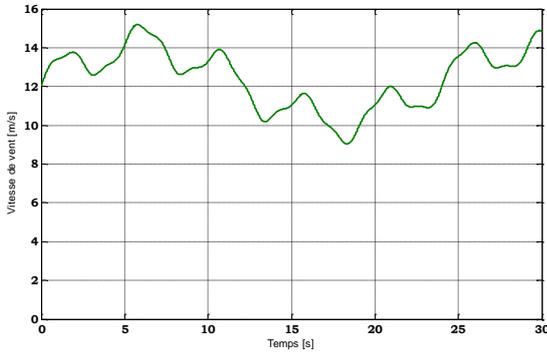


Figure II. 8 : Vitesse de vent

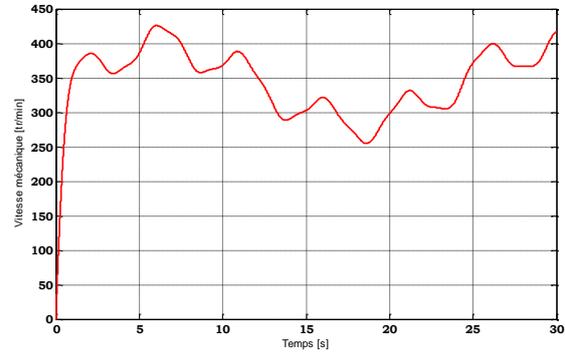


Figure II. 9 : Vitesse mécanique développée par la turbine

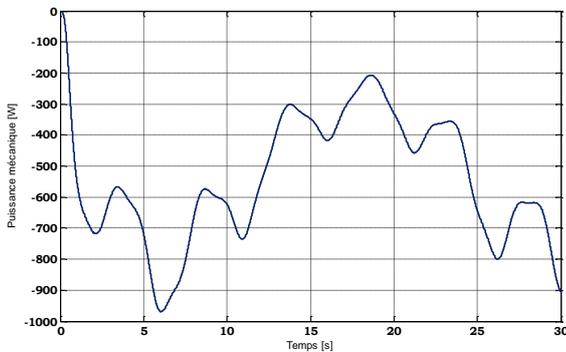


Figure II. 10 : Puissance mécanique produite par la turbine

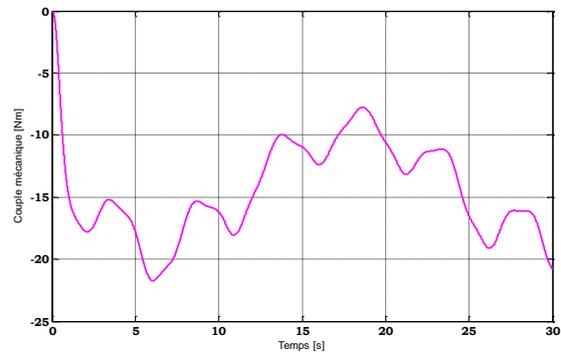


Figure II. 11 : Couple mécanique développé par la turbine

II.3 MODÉLISATION DE LA PARTIE DE CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

Dans cette partie, on modélise la machine asynchrone à double alimentation (MADA), puis on fera une association de deux MADA au niveau de rotor (électriquement et mécaniquement) et par la suite, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB). Nous présenterons dans un premier temps le modèle de la machine asynchrone dans le repère naturel, puis dans le repère de Park. Ensuite nous étudierons la connexion de la cascade de deux MADA, enfin le modèle de la (MADASB). Cette dernière sera modélisée dans le repère de Park, nous présenterons les simulations de celle-ci, en fonctionnement générateur.

III.3.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Une machine asynchrone à double alimentation (MADA) est constituée d'un stator fixe équipé de trois enroulements identiques répartis d'une manière symétrique dans les encoches au stator, et d'un rotor tournant autour de l'axe de la machine équipé lui aussi de trois enroulements identiques et symétriques couplés en étoile et reliés à un collecteur constitué de trois bagues figure, (II. 12).

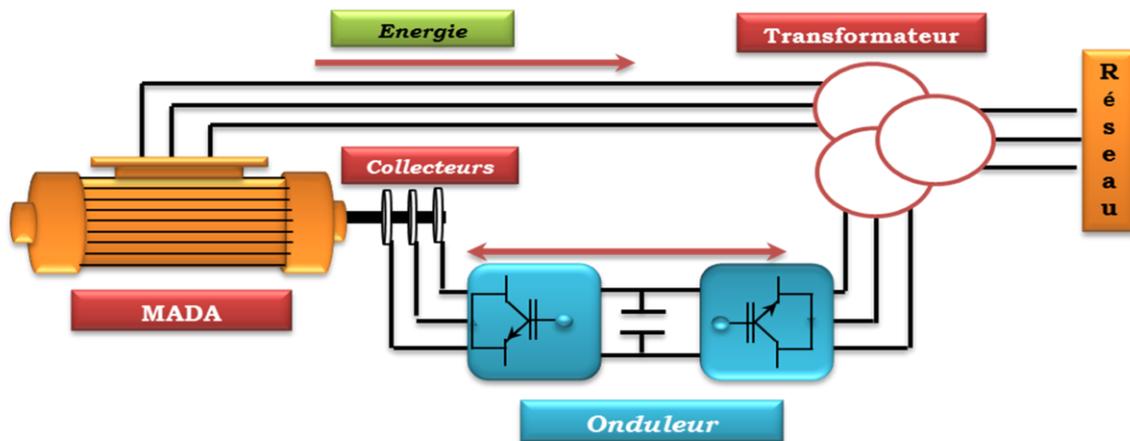


Figure II.12 : Structure d'une machine asynchrone à double alimentation.

Les trois enroulements rotoriques sont reliés à travers des balais glissants sur les bagues du rotor à un convertisseur d'électronique de puissance pour assurer une deuxième alimentation par le rotor. Selon le mode de fonctionnement, l'ensemble machine asynchrone, convertisseur et éventuellement un transformateur est appelé cascade hypo ou hyper Synchrone, [MET 09].

II.3.2 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation(MADA)

La machine asynchrone étant un système non linéaire très complexe, sa modélisation nécessite l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices sans trop exagérer pour avoir un modèle le plus proche possible de la réalité, [MET09].

II.3.2.1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone sera établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes [BOY 06]. [BOL 06] [MET09].

- L'entrefer est supposé d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoches négligeable.
- La saturation magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements sont constantes et l'effet de peau négligeable.

- On admet que la FMM créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- La machine est symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer : [ABD 97]

- ✚ L'additive des flux,
- ✚ La constance des inductances propres,
- ✚ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La position du rotor en rotation, par rapport au stator fixe est fonction de la vitesse de rotation Ω , tel que $\Omega = d\theta/dt$ où θ est l'angle entre l'enroulement statorique (A) et l'enroulement rotor (a) en chaque instant, comme montré sur la figure ci-dessous.

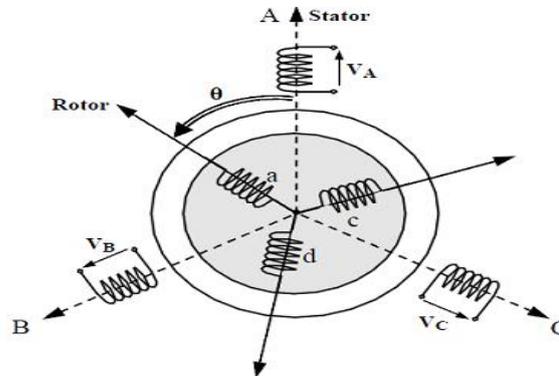


Figure II. 13 : Représentation schématique de la machine asynchrone

II.3.2.2 Rappel sur la loi de Faraday

La loi de Faraday exprime la relation entre la tension v aux bornes d'une bobine de résistance R_b d'inductance L_b , le courant i , la variation du flux totalisé ψ_t :

$$\frac{d\psi_t}{dt} = v - R_b \cdot i \quad (\text{II.13})$$

Avec $\psi_t = \psi + \psi_c$ où ψ_c est un flux de couplage magnétique avec d'autres enroulements, et ψ est le flux propre de l'enroulement [ELA 04].

II.3.2.3 Mise en équation de la partie électrique dans le plan α, b, c

D'après les hypothèses simplificatrices, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

En appliquant la loi de Faraday aux enroulements de la machine asynchrone, on détermine les équations différentielles exprimant les différents flux [ELA 04] :

✚ Pour le stator :

$$\left(\frac{d}{dt}\right) \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

✚ Pour le rotor :

$$\left(\frac{d}{dt}\right) \begin{pmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.15})$$

On définit les vecteurs flux suivants :

$$\underline{\psi}_s = [\psi_{sabc}] = \begin{pmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{pmatrix} \text{ et } \underline{\psi}_r = [\psi_{rabc}] = \begin{pmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi que les vecteurs courants :

$$\underline{I}_s = [i_{sabc}] = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix} \text{ et } \underline{I}_r = [i_{rabc}] = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Les flux sont exprimés également d'une façon matricielle :

$$\begin{pmatrix} \psi_{sabc} \\ \psi_{rabc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Où

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{pmatrix} = l_s \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

- l_s : Inductance propre des enroulements statoriques ;
- m_s : Inductance mutuelle des enroulements statoriques $m_s = -\frac{l_s}{2}$.

Et

$$[L_r] = \begin{pmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{pmatrix} = l_r \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

- l_r : Inductance propre des enroulements rotoriques
- m_r : Inductance mutuelle des enroulements rotoriques $m_r = -\frac{l_r}{2}$.

Et finalement :

$$[M_{sr}] = M_{max} \cdot \begin{pmatrix} \cos(p \cdot \theta) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p \cdot \theta) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(p \cdot \theta) \end{pmatrix} \quad (\text{II.21})$$

M_{max} : représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

Sous forme matricielle, les équations de la machine deviennent :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}[\psi_{sabc}] &= [v_{sabc}] - [R_s][i_{sabc}] \\ \frac{d}{dt}[\psi_{rabc}] &= [v_{rabc}] - [R_r][i_{rabc}] \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

Où

$$\underline{V}_s = [v_{sabc}] = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix} \text{ et } \underline{V}_r = [v_{rabc}] = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix}, [I] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$[R_s] = R_s \cdot [I] \quad \text{et} \quad [R_r] = R_r \cdot [I]$$

II.3.2.4 Modèle généralisé de la machine asynchrone dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$ permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, o). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère. Le produit matriciel définissant la transformation de Park est donné par [ELA 04] :

$$[x_{dqp}] = [P(\theta)] \cdot [x_{abc}] \tag{II.23}$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} \cos(p \cdot \theta) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(p \cdot \theta) & -\sin\left(p \cdot \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(p \cdot \theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \tag{II.24}$$

Avec

- $\theta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques ;
- $\theta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

La figure III.19 montre alors la disposition des systèmes d'axes dans l'espace électrique. $O_{s\alpha}$ et $O_{s\beta}$ (respectivement $O_{r\alpha}$ et $O_{r\beta}$) sont les axes du repère diphasé obtenu avec la transformation de Concordia correspondant aux tensions statoriques (respectivement rotoriques) [ELA 04].

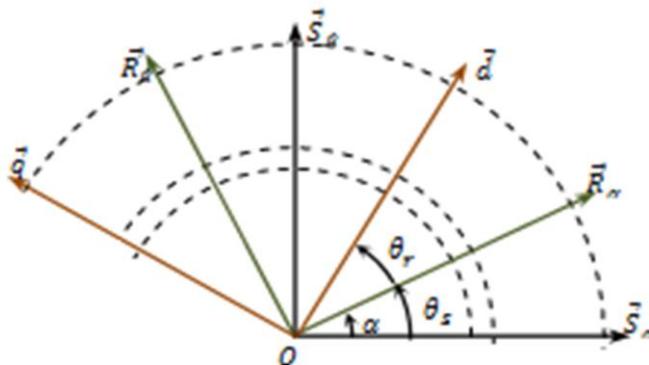


Figure II.14 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace

Le rotor et le stator de la machine, alors désignée machine de Park, tournent à la même vitesse de sorte que les flux et les courants sont liés par une expression indépendante du temps. En appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel (équations II.14 et II.15), un modèle de la machine est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires [ELA 04] :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [\psi_{sdqo}] &= [v_{sdqo}] - [R_s][i_{sdqo}] - [\lambda][\psi_{sdqo}] \frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d}{dt} [\psi_{rdqo}] &= [v_{rdqo}] - [R_r][i_{rdqo}] - [\lambda][\psi_{rdqo}] \frac{d\theta_r}{dt} \end{aligned} \quad (\text{II.25})$$

Avec

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Dans le repère de Park, les flux et les courants sont liés par :

$$\begin{pmatrix} \psi_{sdqo} \\ \psi_{rdqo} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_{sp}] & [M_{srp}] \\ [M_{srp}] & [L_{rp}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sdqo} \\ i_{rdqo} \end{pmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Avec

$$\begin{aligned} [L_{sp}] &= \begin{pmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{pmatrix} \\ [L_{rp}] &= \begin{pmatrix} l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r - m_r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

$$[M_{srp}] = \begin{pmatrix} \frac{3 \cdot M_{max}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3 \cdot M_{max}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3 \cdot M_{max}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Dans la suite, on notera $\frac{3 \cdot M_{max}}{2} = M$.

Si les grandeurs électriques triphasées sont équilibrées, alors les grandeurs homopolaires sont égales à zéro. Dès lors, les transformées de Park induisent des vecteurs comportant seulement les deux composantes : directe d et quadrature q [ELA 04].

On écrit alors les équations matricielles précédentes (II.25) comme suivant :

A) Les équations électriques

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \cdot \omega_e \\
 v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \cdot \omega_e \\
 v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \psi_{rq} \cdot (\omega_e - \omega_r) \\
 v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \psi_{rd} \cdot (\omega_e - \omega_r)
 \end{aligned} \tag{II.29}$$

$$\begin{cases} \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad \text{et } \theta_e = \theta_s = \theta + \theta_r \omega_e \tag{II.30}$$

Où,

ω_e : est la vitesse angulaire arbitraire.

B) Les équations du flux :

$$\begin{aligned}
 \psi_{sq} &= L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\
 \psi_{sd} &= L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\
 \psi_{rq} &= L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \\
 \psi_{rd} &= L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd}
 \end{aligned} \tag{II.31}$$

Où,

- $L_s = l_s - m_s$: est l'inductance cyclique du stator ;
- $L_r = l_r - m_r$: est l'inductance cyclique du rotor.

II.3.2.5 Calcul du couple électromagnétique

On obtient la puissance instantanée absorbée par la machine en calculant la somme des produits de chaque f.é.m. avec son courant [ELA 04] :

$$P_m = (e_{sd} \cdot i_{sd} + e_{sq} \cdot i_{sq}) + (e_{rd} \cdot i_{rd} + e_{rq} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II.32})$$

En exprimant les f.é.m et en factorisant par rapport aux vitesses angulaires, on obtient :

$$P_m = (\psi_{sd} \cdot i_{sq} + \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \cdot \omega_s + (\psi_{rd} \cdot i_{rq} + \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \cdot \omega_r \quad (\text{II.33})$$

En exprimant les flux en fonction des courants à partir de l'équation (II.31) on constate que :

$$\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd} = -(\psi_{rd} \cdot i_{rq} - \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II.34})$$

Dans ces conditions, on obtient deux expressions pour le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \text{ ou } C_{em} = p \cdot (\psi_{rd} \cdot i_{rq} - \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II.35})$$

Si l'on s'intéresse à l'expression utilisant les grandeurs au rotor on obtient :

$$C_{em} = p \cdot (\psi_{rd} \cdot i_{rq} - \psi_{rq} \cdot i_{rd}) \quad (\text{II.36})$$

On pose :

$$c_{rd} = p \cdot \psi_{rd} \cdot i_{rq} \quad (\text{II.37})$$

$$c_{rq} = -p \cdot \psi_{rq} \cdot i_{rd}$$

On écrit alors

$$C_{em} = c_{rd} + c_{rq} \quad (\text{II.38})$$

Si l'on utilise les grandeurs statoriques, l'expression du couple devient :

$$C_{em} = p \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.39})$$

On pose :

$$c_{sd} = p \cdot \psi_{sd} \cdot i_{sq} \quad (\text{II.40})$$

$$c_{sq} = -p \cdot \psi_{sq} \cdot i_{sd}$$

On écrit alors :

$$C_{em} = c_{sd} + c_{sq} \quad (II.41)$$

La première expression du couple (II.36) conduit à la commande vectorielle de la machine dite « à flux rotorique orienté », alors que la seconde expression (II.39) sera utilisée pour la commande dite « à flux statorique orienté » [ELA 04].

En dérivant la relation reliant l'angle statorique à celui du rotor suivante :

$$\theta_s = \theta_r + \alpha \quad (II.42)$$

On retrouve alors la relation entre la pulsation statoriques ω_s et la pulsation rotorique ω_r :

$$\omega_r = \omega_s - p \cdot \Omega_{méc} \quad (II.43)$$

$\Omega_{méc}$: est la vitesse de rotation de la machine.

Pour la machine polyphasée (m phases) ramenée à la machine biphasée. Il faut multiplier toutes les expressions du couple électromagnétique par le coefficient $K = m/2$ [ABD 97]

par exemple l'expression du couple s'écrit comme suivant :

$$C_{em} = \frac{m \cdot p}{2} \cdot (\psi_{sd} \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (II.44)$$

Donc, l'équation mécanique de la machine s'écrit

$$J \frac{d}{dt} \omega = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (II.45)$$

Où

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{méc} \quad (II.46)$$

III.3.2.6. Choix du référentiel

Le système d'équations (II.29) représente le modèle linéaire de la machine asynchrone double alimentation dans un repère arbitraire tournant à une vitesse quelconque ω_e . Le choix

d'un référentiel dépend essentiellement du but de la modélisation et de la compatibilité avec les autres composantes du système étudié, [MET 09]. [TIR 10].

A) Référentiel lié au stator

Ce référentiel, appelé souvent stationnaire, est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et caractérisé par la relation suivante [MET 09]. [TIR 10].

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{II.47})$$

B) Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il est caractérisé par la relation suivante : [MET 09].

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{II.48})$$

C) Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. [TIR 10].

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \Phi_{sq} \cdot \omega_s \\ v_{sq} &= R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \Phi_{sd} \cdot \omega_s \\ v_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \Phi_{rq} \cdot \omega_r \\ v_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \Phi_{rd} \cdot \omega_r \end{aligned} \quad (\text{II.49})$$

$$C_e = \frac{L_m \cdot p}{2} \cdot (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_r - C_e - C_{vis}$$

II.3.3 Description de la cascade de deux MADA

Cette configuration peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée [HOP-01]. Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (MADA2), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, appelé Bobinage de Commande (MADA1), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel (figure II.15). La puissance à travers l'ensemble convertisseur/MADA1 est proportionnelle au glissement du rotor

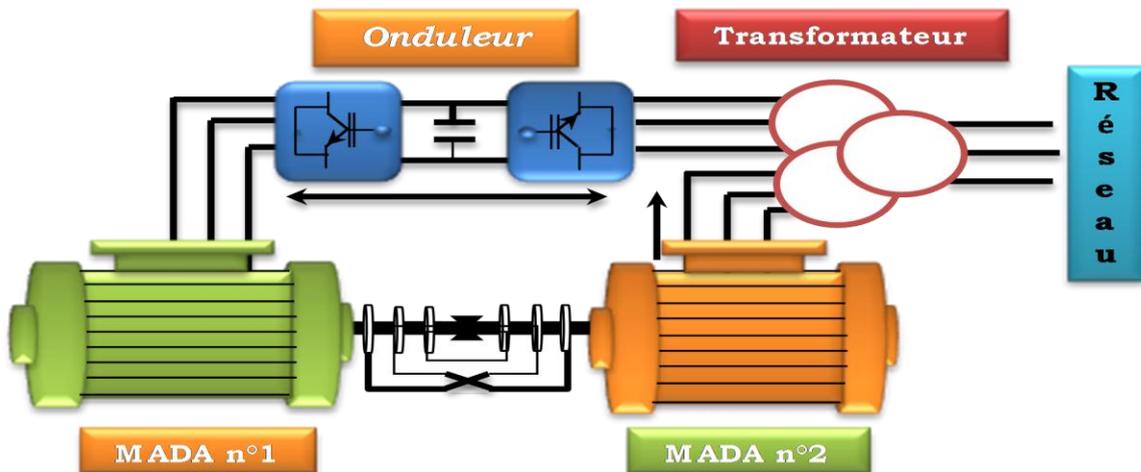


Figure II.15 : Structure de la cascade de deux MADA.

II.3.4 Modélisation de la cascade de deux MADA

Dans ce près suit, on va modéliser la cascade de deux MADA en exploitant le modèle précédent de la MADA, on va coupler les deux MADA électriquement et mécaniquement au niveau du rotor. Ce couplage est modélisé ici en supposant qu'il n'y a pas de défaut tel qu'une coupure de ligne et qu'il n'y a ni perte ni stockage d'énergie dans les connexions [PAT 06]. Les grandeurs et paramètres associés à chaque machine seront identifiés par les indices 1 et 2 correspondants respectivement à la MADA n°1 et à la MADA n°2. Le modèle mathématique de la cascade dans le référentiel d-q liée au champ tournant est donné par :

➤ Les équations des tensions

$$\begin{aligned} v_{s1}^d &= R_{s1} \cdot i_{s1}^d + \frac{d\psi_{s1}^d}{dt} - \psi_{s1}^q \cdot \omega_{s1} \\ v_{s1}^q &= R_{s1} \cdot i_{s1}^q + \frac{d\psi_{s1}^q}{dt} + \psi_{s1}^d \cdot \omega_{s1} \end{aligned} \quad (\text{II.50})$$

$$\begin{aligned}
 0_r^d &= (R_{r1} + R_{r2}) \cdot i_{r1}^d + \frac{d\psi_r^d}{dt} - \psi_r^q \cdot \omega_r \\
 0_r^q &= (R_{r1} + R_{r2}) \cdot i_r^q + \frac{d\psi_r^q}{dt} + \psi_r^d \cdot \omega_r
 \end{aligned} \tag{II.51}$$

$$\begin{aligned}
 v_{s2}^d &= R_{s2} \cdot i_{s2}^d + \frac{d\psi_{s2}^d}{dt} - \psi_{s2}^q \cdot \omega_{s2} \\
 v_{s2}^q &= R_{s2} \cdot i_{s2}^q + \frac{d\psi_{s2}^q}{dt} + \psi_{s2}^d \cdot \omega_{s2}
 \end{aligned} \tag{II.52}$$

➤ **Les équations du flux**

$$\begin{aligned}
 \psi_{s1}^q &= L_{s1} \cdot i_{s1}^q + L_{m1} \cdot i_{r1}^q \\
 \psi_{s1}^d &= L_{s1} \cdot i_{s1}^d + L_{m1} \cdot i_{r1}^d
 \end{aligned} \tag{II.53}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_r^q &= (L_{r1} + L_{r2}) \cdot i_r^q + L_{m2} \cdot i_{s2}^q - L_{m1} \cdot i_{s1}^q \\
 \psi_r^d &= (L_{r1} + L_{r2}) \cdot i_r^d + L_{m2} \cdot i_{s2}^d - L_{m1} \cdot i_{s1}^d
 \end{aligned} \tag{II.54}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_{s2}^q &= L_{s2} \cdot i_{s2}^q + L_{m2} \cdot i_{r2}^q \\
 \psi_{s2}^d &= L_{s2} \cdot i_{s2}^d + L_{m2} \cdot i_{r2}^d
 \end{aligned} \tag{II.55}$$

➤ **Les équations mécaniques :**

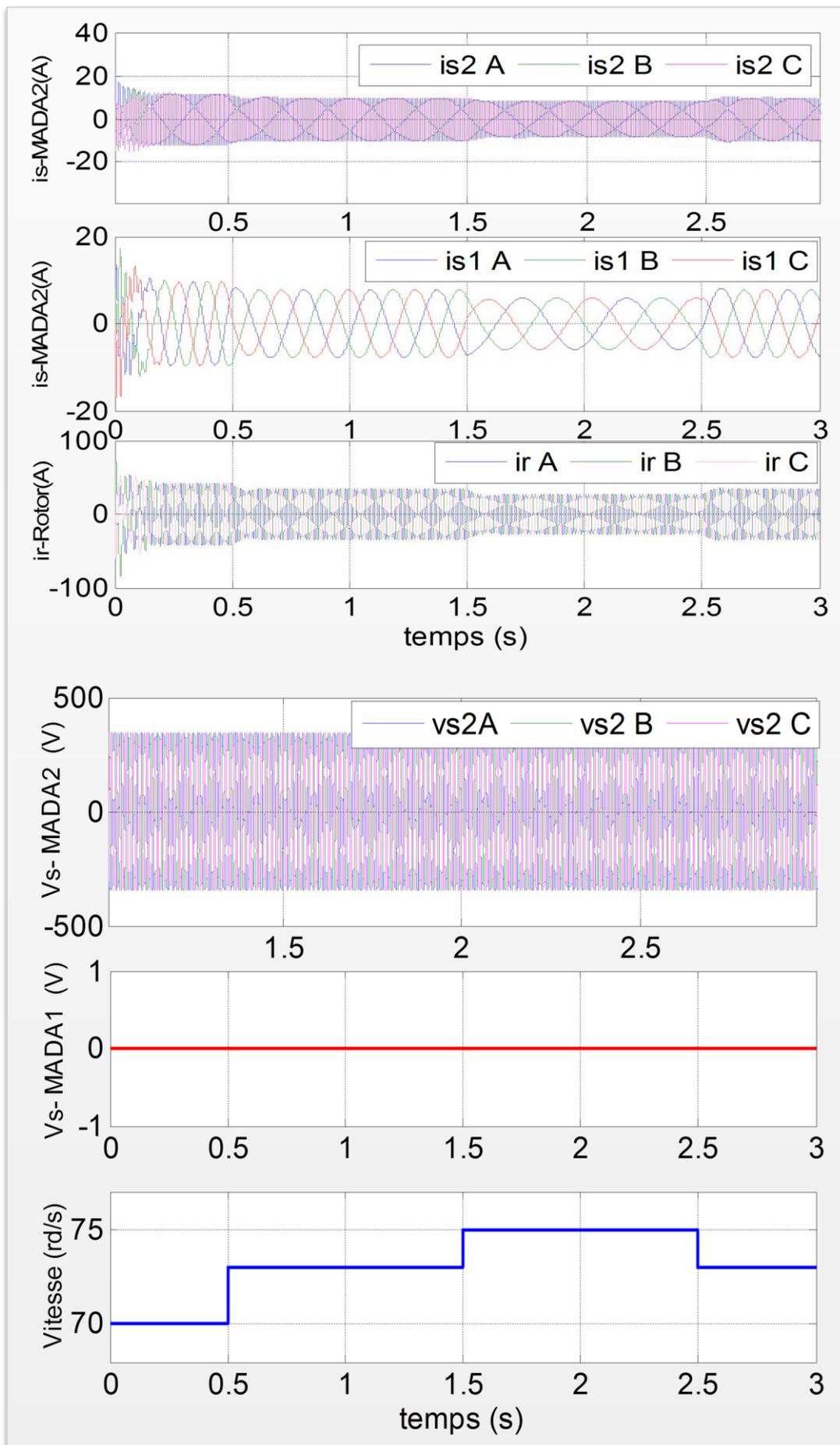
$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot (p_1 \cdot (\psi_{s1}^d \cdot i_{s1}^q - \psi_{s1}^q \cdot i_{s1}^d) + p_2 \cdot (\psi_{s2}^d \cdot i_{s2}^q - \psi_{s2}^q \cdot i_{s2}^d)) \tag{II.56}$$

$$(J_1 + J_2) \frac{d}{dt} \Omega = (C_{r1} + C_{r2}) - (C_{em1} + C_{em2}) - (C_{vis1} + C_{vis2}) \tag{II.57}$$

II.3.4.1 Validation du modèle de la cascade de deux MADA

A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler aussi la cascade de deux MADA en fonctionnement générateur, avec le stator de la première MADA en court-circuit. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle de deux machines de puissance 4 KW donnée.

Les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle de la cascade de deux MADA entraînée à une vitesse variables égale à la plage, (70 rd/s ÷ 75 rd/s), alimentée directement par une source de tension triphasée parfaite au niveau du stator de la MADA n°2 avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de $\sqrt{2} * 220 V$



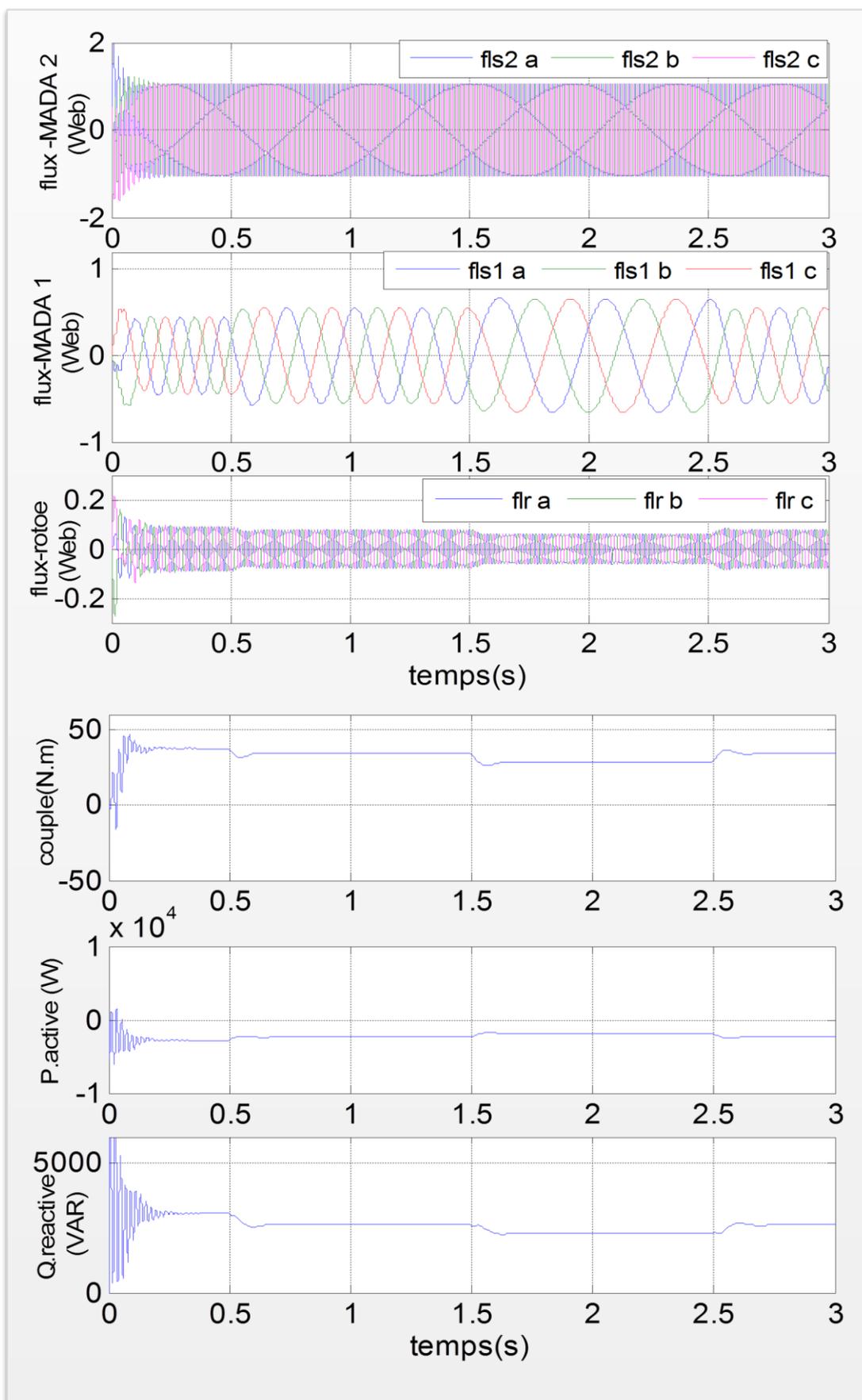


Figure II. 16 : Résultat de simulation de la cascade de deux MADA

II.3.5 Description de la MADA Sans Balais (BDFIG)

Les deux stators (MADA n°1 et MADA n°2) peuvent être inclus dans la même carcasse et le rotor peut adopter une structure à cage, [HOP-01], [POZ 03]. Les barres rotoriques sont croisées entre les deux machines, [VID 04]. Un bobinage connecté directement au réseau (appelé Bobinage de Puissance, BP) et l'autre bobinage connecté au convertisseur bidirectionnel (appelé Bobinage de Commande, BC). (figure II.17)

Si on considère un réseau de puissance infinie, la tension du bobinage de puissance a une amplitude et une fréquence constante. On verra qu'avec cette configuration les variables électriques du bobinage de commande dépendent directement du courant du BP souhaité.

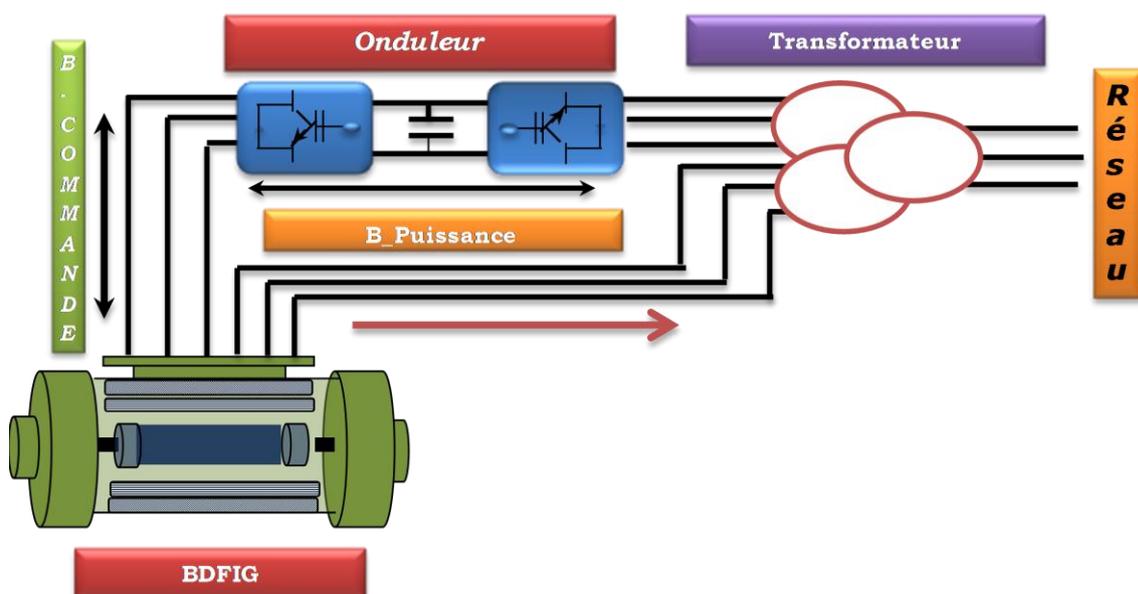


Figure II.17 : Structure de la MADA Sans Balais (BDFIG)

II.3.5.1 Contraintes constructives et d'alimentation pour le fonctionnement correct de la MADASB

Dans la conception d'une MADASB il faut garantir un rapport précis entre le nombre de pôles des deux bobinages du stator et le nombre de spires du rotor. Il existe donc une contrainte physique que doivent respecter les machines type BDFIG. En même temps l'utilisation d'une BDFIG correctement conçue ne garantit pas le fonctionnement de la machine ; il est nécessaire de respecter 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). [POZ 03].

La caractéristique principale de la BDFIG c'est que le Bobinage de Commande peut modifier le courant de rotor qui a été induit par le Bobinage de Puissance. De cette manière, on obtient au travers du rotor un couplage magnétique croisé entre les deux bobinages du stator [POZ 03].

Dans l'annexe B on va définir les conditions à respecter pour garantir le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages du stator à travers le rotor. Pour cela, on va analyser la forme de la densité de flux que crée chaque bobinage du stator dans l'entrefer [POZ 03].

II.3.6 Modélisation de la MADA Sans Balais (BDFIG)

Une modélisation correcte de la MADASB devient indispensable pour la conception, l'analyse de fonctionnement et de la commande. Le modèle de la MADASB permet de connaître, à priori, les caractéristiques de fonctionnement de la machine. Pour pouvoir reproduire ces modes de fonctionnement dans une machine réelle on devra connaître la liaison existante entre les paramètres du modèle et les grandeurs physiques mesurables dans la machine.[POZ 03].

Dans ce paragraphe on développe le modèle biphasé de la MADASB en régime permanent avec sa connexion typique. On va exprimer le modèle de la machine en fonction des courants de la machine, et pour cela en exploitant le modèle précédent de la cascade de deux MADA., [POZ 03]. développé des équations approchées qui établissent le fonctionnement général de la MADASB

Le stator de la MADASB est formé par deux bobinages triphasés équilibrés, et le rotor a une structure à cage spéciale (figure I.18, chapitre.I_section (I.5.3.3)). Dans les travaux de modélisation de la machine, on utilise (P) pour les bobinages de Puissance du stator et (C) pour les bobinages de Commande du stator.

Il faut remarquer que pour éviter le couplage magnétique direct non souhaité entre les deux bobinages du stator leur nombre de paires de pôles doit être différent ($P_p \neq P_c$)

Le modèle mathématique de la MADASB dans le référentiel (d-q) liée au champ tournant est donné par :

A) Équations des tensions :

$$\begin{aligned}
 v_{sp}^d &= R_{sp} \cdot i_{sp}^d + \frac{d\Phi_{sp}^d}{dt} - \Phi_{sp}^q \cdot \omega_{sp} \\
 v_{sp}^q &= R_{sp} \cdot i_{sp}^q + \frac{d\Phi_{sp}^q}{dt} + \Phi_{sp}^d \cdot \omega_{sp} \\
 0_r^d &= R_r \cdot i_r^d + \frac{d\Phi_r^d}{dt} - \Phi_r^q \cdot \omega_r \\
 0_r^q &= R_r \cdot i_r^q + \frac{d\Phi_r^q}{dt} + \Phi_r^d \cdot \omega_r \\
 v_{sc}^d &= R_{sc} \cdot i_{sc}^d + \frac{d\Phi_{sc}^d}{dt} - \Phi_{sc}^q \cdot \omega_{sc} \\
 v_{sc}^q &= R_{sc} \cdot i_{sc}^q + \frac{d\Phi_{sc}^q}{dt} + \Phi_{sc}^d \cdot \omega_{sc}
 \end{aligned} \tag{III.58}$$

B) Les équations du flux

$$\begin{aligned}
 \Phi_{sp}^d &= L_{sp} \cdot i_{sp}^d + L_{mp} \cdot i_r^d \\
 \Phi_{sp}^q &= L_{sp} \cdot i_{sp}^q + L_{mp} \cdot i_r^q \\
 \Phi_r^d &= L_r \cdot i_r^d + L_{mc} \cdot i_{sc}^d + L_{mp} \cdot i_{sp}^d \\
 \Phi_r^q &= L_r \cdot i_r^q + L_{mc} \cdot i_{sc}^q + L_{mp} \cdot i_{sp}^q \\
 \Phi_{sc}^d &= L_{sc} \cdot i_{sc}^d + L_{mc} \cdot i_r^d \\
 \Phi_{sc}^q &= L_{sc} \cdot i_{sc}^q + L_{mc} \cdot i_r^q
 \end{aligned} \tag{III.59}$$

C) Les équations mécaniques

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot (p_p \cdot (\Phi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q - \Phi_{sp}^q \cdot i_{sp}^d) + p_c \cdot (\Phi_{sc}^d \cdot i_{sc}^q - \Phi_{sc}^q \cdot i_{sc}^d)) \tag{II.60}$$

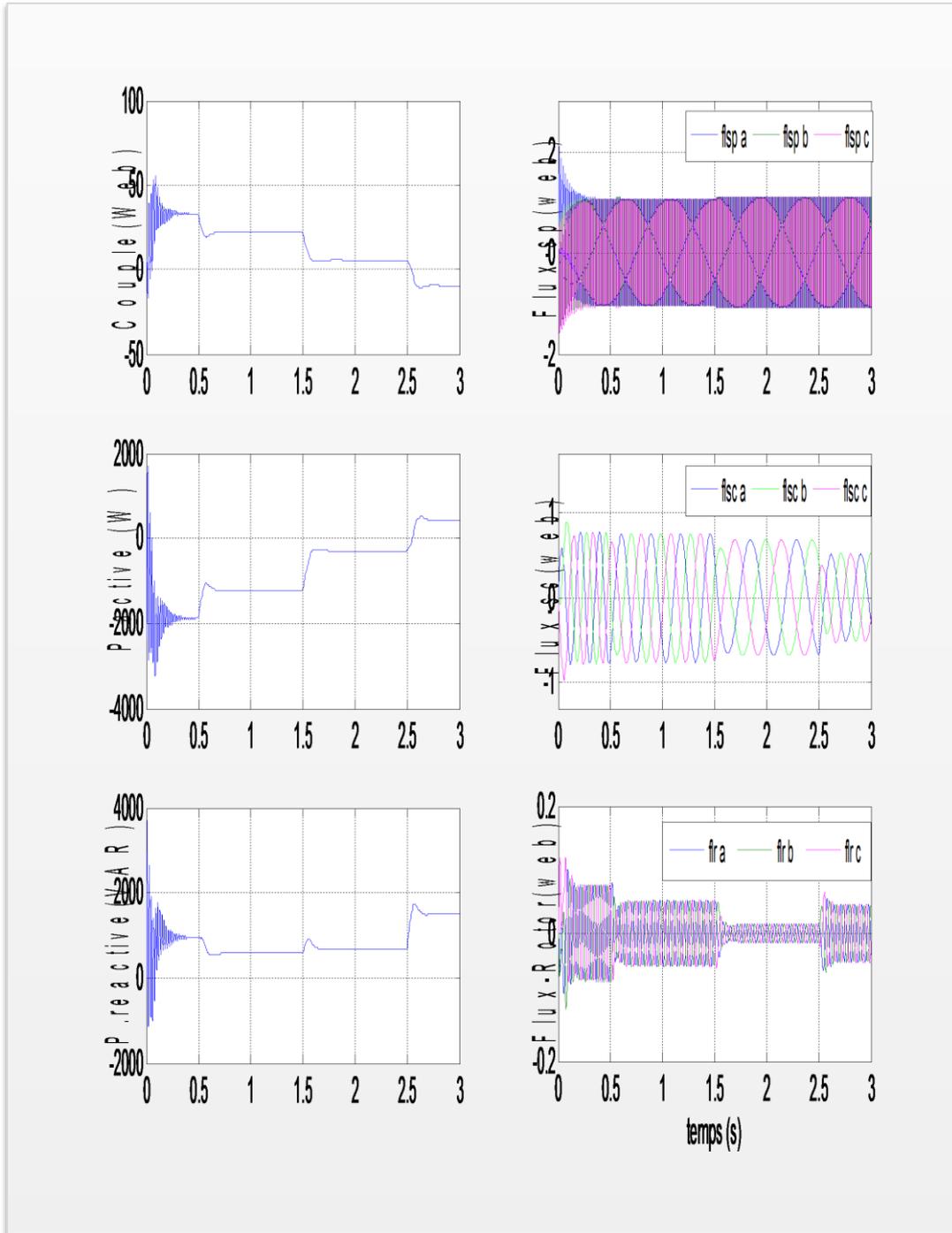
$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_r - C_e - C_{vis} \tag{II.61}$$

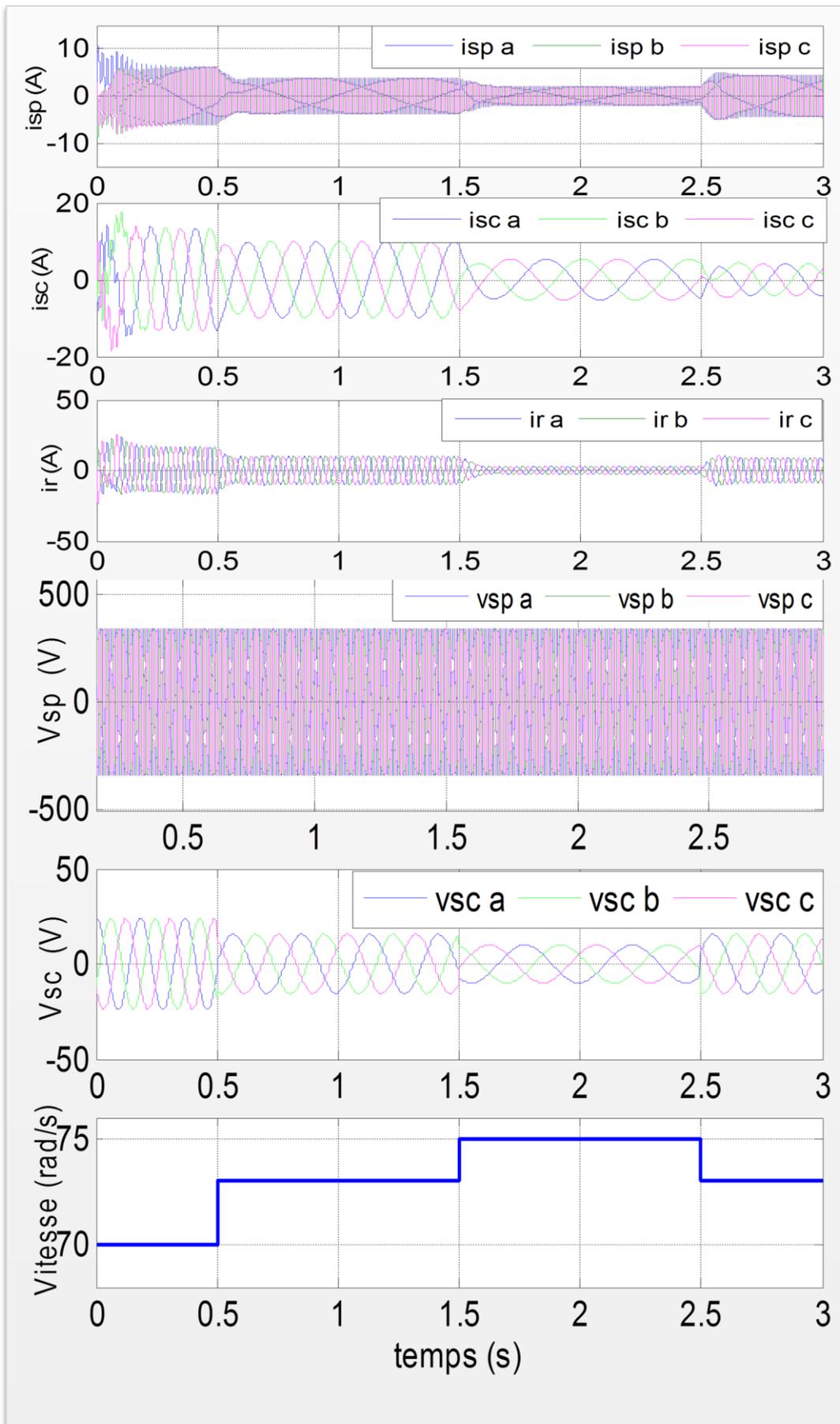
II.3.6.1 Validation du modèle de MADASB

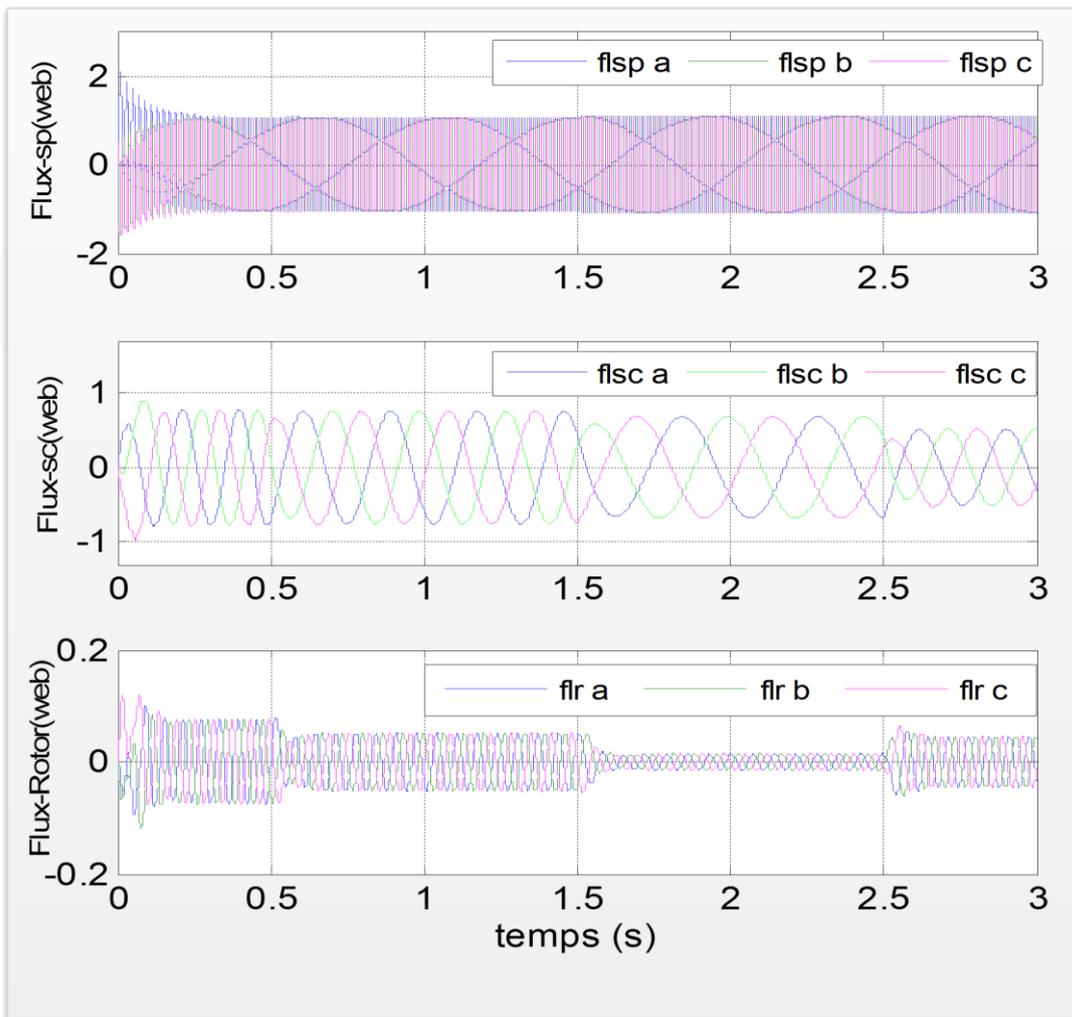
A l'aide de logiciel MATLAB, on va simuler aussi la MADASB en fonctionnement générateur. la MADASB entraînée à une vitesse variable égale à la plage (70 rd/s ÷ 75 rd/s). Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine prototype BDFIG de 2.5 kW.

➤ *la double alimentation de la BDFIG*

Dans ce mode de fonctionnement La machine est alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du bobinage de Puissance avec une fréquence du réseau qui est $f_{sp} = 50\text{Hz}$ et d'amplitude de $v_{sp} = \sqrt{2} * 220\text{ V}$. et l'autre au niveau du bobinage de Commande avec une fréquence f_{sc} est égale ($\omega_{sc} = (\omega_{sp} - (P_p + P_c) * \omega)$) et d'amplitude de $v_{sc} = \sqrt{2} * 50\text{ V}$.







*Figure II. 18 : Résultat de simulation de la MADA Sans Balais (BDFIG)
avec la Double alimentation*

II.4 MODÉLISATION DE L'ONDULEUR TRIPHASÉ A(MLI)

II.4.1 Définition

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT..). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI). Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI. L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [TIR 10]. La figure II.20 représente le schéma de principe d'un onduleur triphasé qui alimente la machine (MADASB).

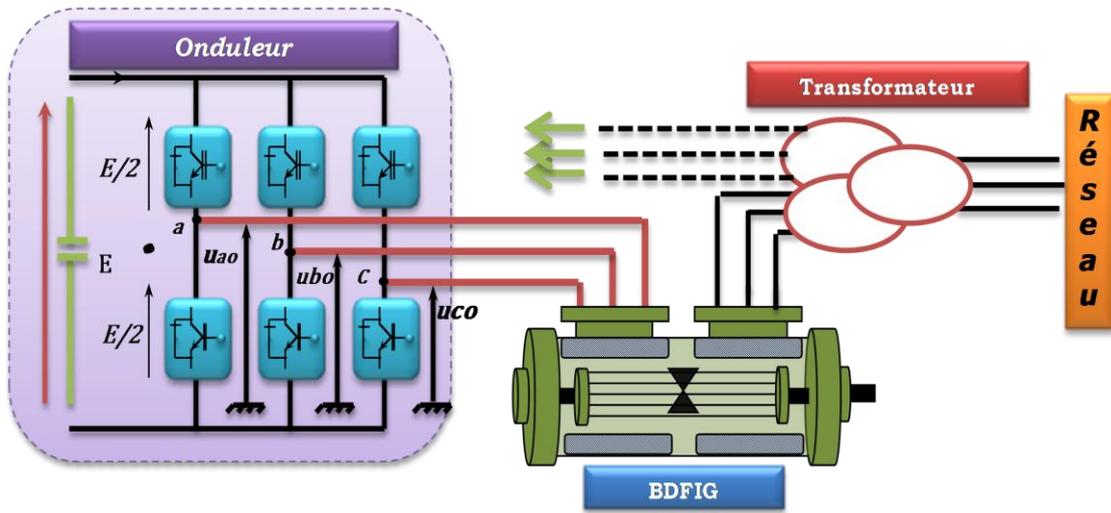


Figure. II 19: Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant la BDFIG, [TIR 10].

La commande des deux transistors du même bras doit être complémentaire pour assurer la continuité des courants de sortie et éviter le court-circuit de la source [ELB 09].

II.4.2 Tensions des phases statoriques

On peut définir les tensions des phases a, b, c par rapport au point milieu o de la source comme suit

✚ Pour la tension de la phase a :

$$\begin{aligned}
 u_{ao} &= +\frac{E}{2} && \text{Si } T_1 \text{ est fermé ;} \\
 u_{ao} &= -\frac{E}{2} && \text{Si } T_4 \text{ est fermé ;} \\
 u_{ao} &= 0 && \text{Si } T_1 \text{ et } T_4 \text{ sont ouverts;}
 \end{aligned}
 \tag{II.61}$$

✚ Pour la tension de la phase b :

$$\begin{aligned}
 u_{bo} &= +\frac{E}{2} && \text{Si } T_2 \text{ est fermé ;} \\
 u_{bo} &= -\frac{E}{2} && \text{Si } T_5 \text{ est fermé ;} \\
 u_{bo} &= 0 && \text{Si } T_2 \text{ et } T_5 \text{ sont ouverts;}
 \end{aligned}
 \tag{II.62}$$

✚ Pour la tension de la phase c :

$$\begin{aligned}
 u_{co} &= +\frac{E}{2} && \text{Si } T_3 \text{ est fermé ;} \\
 u_{co} &= -\frac{E}{2} && \text{Si } T_6 \text{ est fermé ;} \\
 u_{co} &= 0 && \text{Si } T_3 \text{ et } T_6 \text{ sont ouverts;}
 \end{aligned}
 \tag{II.63}$$

II.4.3 Tensions composées de la charge

On peut déduire les tensions composées en utilisant les tensions de phase précédentes exprimées par rapport au point milieu :

$$\begin{aligned} u_{ao} &= u_{an} - u_{no} \\ u_{bo} &= u_{bn} - u_{no} \\ u_{co} &= u_{cn} - u_{no} \end{aligned} \tag{II.64}$$

Et comme le système est supposé en équilibre, c'est-à-dire :

$$i_{an} + i_{bn} + i_{cn} = 0 \text{ et } u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \tag{II.65}$$

$$u_{no} = \frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \tag{II.66}$$

On obtient finalement les expressions des tensions simples de la machine :

$$\begin{aligned} u_a = u_{an} &= u_{ao} - u_{no} = \frac{1}{3}(2u_{ao} - u_{bo} - u_{co}) \\ u_b = u_{bn} &= u_{bo} - u_{no} = \frac{1}{3}(2u_{bo} - u_{ao} - u_{co}) \\ u_c = u_{cn} &= u_{co} - u_{no} = \frac{1}{3}(2u_{co} - u_{ao} - u_{bo}) \end{aligned} \tag{II.67}$$

On peut aussi écrire ces tensions sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ao} \\ u_{bo} \\ u_{co} \end{bmatrix} \tag{II.68}$$

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (figure II.21).

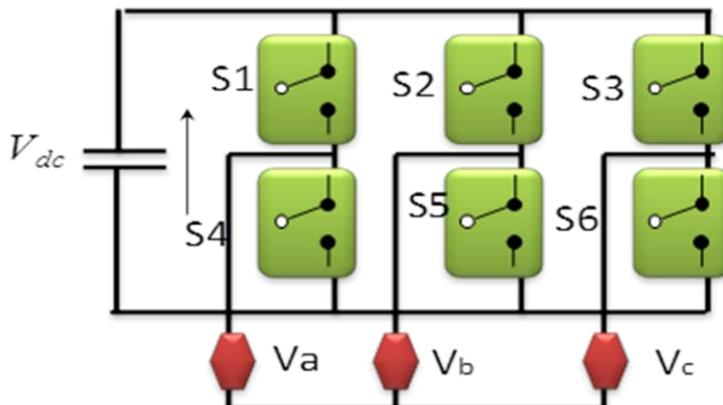


Figure. II.20 Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux

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

✚ Branche1 :

$S_a=0$ Si S1 est ouvert et S4 est fermé ;

$S_a=1$ Si S1 est fermé et S4 est ouvert.

✚ Branche2 :

$S_b=0$ Si S2 est ouvert et S5 est fermé;

$S_b=1$ Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

✚ Branche3 :

$S_c=0$ Si S3 est ouvert et S6 est fermé;

$S_c=1$ Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

La détermination des fonctions S_i dépend de la stratégie de commande. Dans cette partie, nous allons montrer une stratégie de commande que nous avons présentée, et aussi la commande en MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsions) avec porteuse.

II.4.3 Principe de l'onduleur de tension a MLI

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme des créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (En général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [GRE 97].

Cette modulation est utilisée par les commandes modernes des machines à courant alternatif les tensions de référence sont les tensions simples désirées à la sortie de l'onduleur.

- ✚ Le signal de référence est échantillonné sur des intervalles T (MLI régulière)
- ✚ Pour chaque phase, on envoie une impulsion de largeur centrée sur la période (MLI symétrique) dont la valeur moyenne est égale à la valeur de la tension de référence à l'instant d'échantillonnage.
- ✚ Tous les interrupteurs d'un même demi –pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période, [BON 98], [GRE 97].

II.4.3.1 Stratégie de commande

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulosinusoidale 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.22).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation m égale au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence du modulante.

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (II.70)$$

- L'indice d'amplitude r égal au rapport de l'amplitude de référence sur l'amplitude de la porteuse.

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (II.72)$$

- La valeur maximale de la tension de phase à la sortie de l'onduleur vaut exactement :

$$V_{max} = r \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (II.73)$$

II.4.3.2 Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangulosinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [FOR D3] :

➤ *Etape 1 :*

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (II.73)$$

Tel que :

V_{dc} : la tension du bus continu.

➤ *Etape 2 :*

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_i = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_i = 0 \end{cases} \quad (II.74)$$

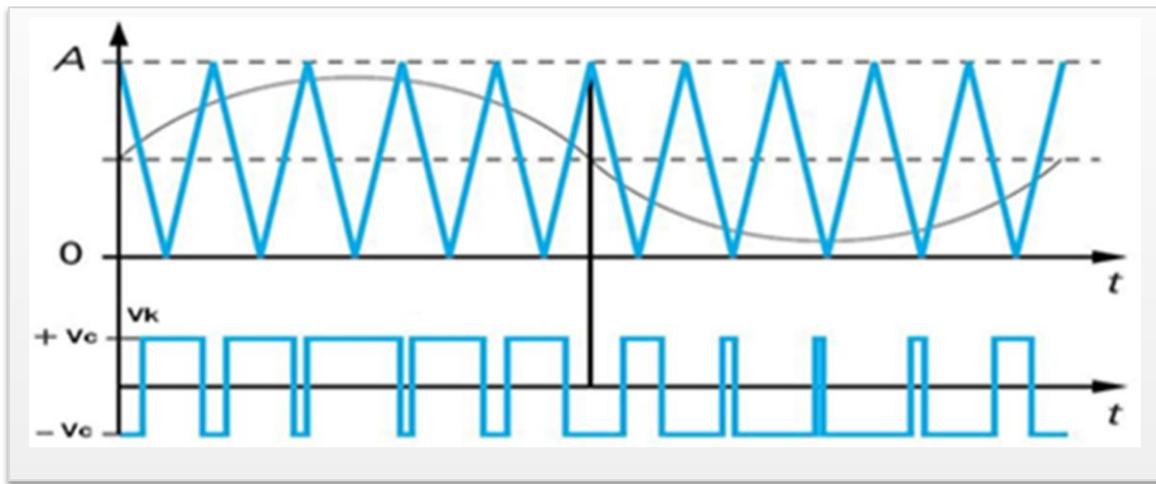


Figure.II.21 – Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale

II.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles de système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la machine (MADASB). Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice, la cascade de deux MADA et puis la machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB). En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Des résultats de simulation sont présentés. Dans la dernière partie, nous avons présenté le modèle de l'onduleur, son principe de fonctionnement et la technique de commande MLI.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la Commande indépendante des puissances active et réactive de la MADASB

*CONTROLE INDEPENDANT DES
PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE
DE LA MADASB*

Chapitre III

Contrôle indépendant des puissances active et réactive de la MADASB

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on va faire la commande vectorielle par orientation du flux qui présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentées sans balais aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans cette optique, nous avons proposé dans ce chapitre un algorithme de contrôle indépendant des puissances active et réactive pour la BDFIG basées sur l'orientation du flux statorique (bobinage de puissance), utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques du bobinage de puissance, (BP) et les grandeurs statoriques du bobinage de commande,(CP). Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux du bobinage de commande en vue de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator (bobinage de puissance) et le réseau.

III.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE A FLUX ORIENTE

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif. A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force est maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ [TIR 10].

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par BLASCHKE au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par l'autre composante. [TIR 10].

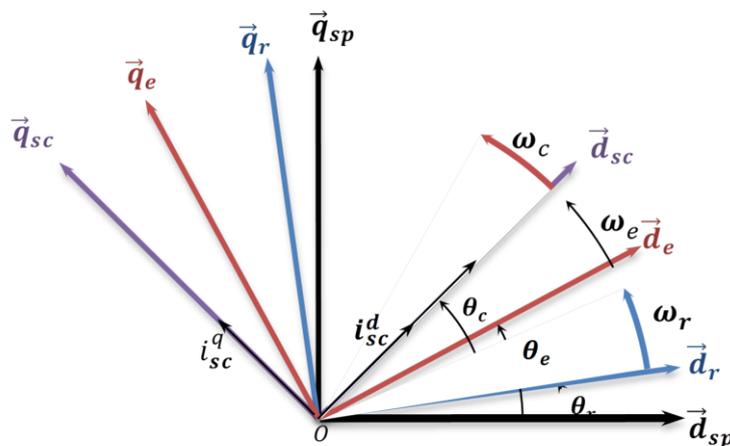


Figure. III.1: Position du référentiel par rapport au flux

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable.

Lors de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un repère lié au champ tournant, les champs statoriques des deux machines et rotoriques et d'entrefer de la cascade tournent à la vitesse du référentiel (d, q) par rapport au stator de la machine de puissance.[TIR 10].

L'orientation de l'un de ces quatre champs suivant l'axe « d » du référentiel constitue le principe de base de la commande vectorielle. Grâce à la transformée de PARK, on obtient un modèle similaire à la MCC à excitation séparée.

De nombreuses variantes de la commande vectorielle ont été présentées dans la littérature, et que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension (voltage source inverter-VSI)
- Commande en courant (current controlled inverter-CCI).

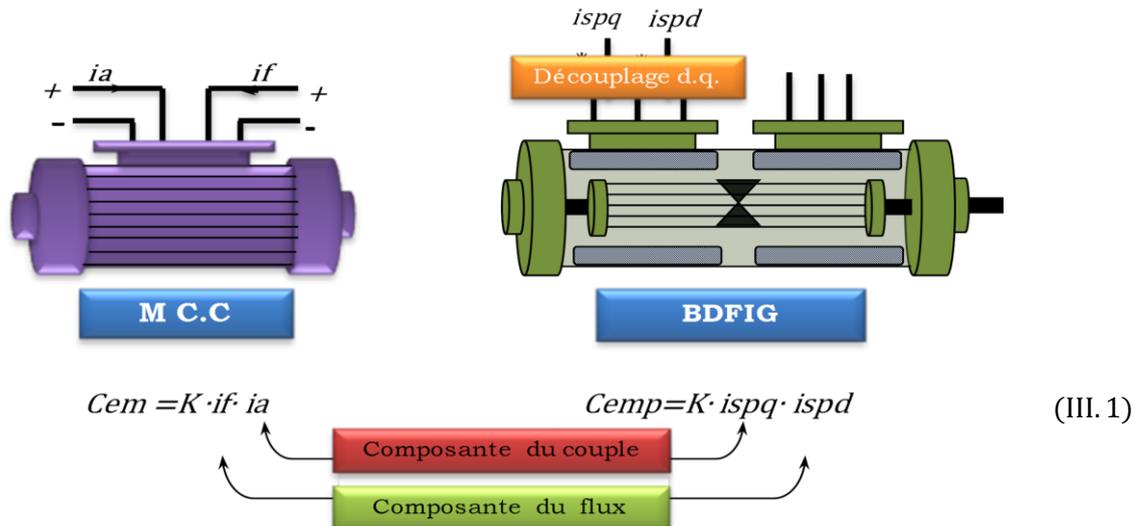


Figure. III. 2 : Schéma du principe de découplage pour la MADASB par analogie avec la machine à C.C.

Couple électromagnétique de la machine à courant continu :

$$C_{em} = K \cdot \psi_f \cdot i_a \tag{III.2}$$

$$\psi_f = K' \cdot i_f \tag{III.3}$$

Couple électromagnétique de la machine (bobinage de puissance) qui nous allons l'examiner :

$$C_{ep} = \frac{3}{2} \cdot (p_p \cdot (\Phi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q - \Phi_{sp}^q \cdot i_{sp}^d)) \tag{III.4}$$

En se basant sur cette équation, on peut réaliser un découplage de telle façon à ce que le couple est commandé uniquement par le courant statorique en quadrature i_{sp}^q (l'axe q doit être dépourvu du flux ($\Phi_{sp}^q = 0$), et le flux par le courant statorique de la machine de commande i_{sc}^d .

La relation finale du couple de la machine de puissance est:

$$C_{ep} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot \Phi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q \tag{III.5}$$

III.3 STRATEGIE DE COMMANDE DE LA (MADASB)

La commande scalaire peut être valable pour des applications de performances réduites comme les pompes et ventilateurs, mais les résultats ne sont pas satisfaisants pour des systèmes plus exigeants, comme peut-être le cas des éoliennes. Il faut donc développer un schéma de commande vectorielle pour la BDFM. [POZ 03].

Dans la bibliographie [ZHO-97] on trouve un algorithme de commande vectorielle qui utilise deux systèmes d'orientation synchrones, chacun correspondant à un des deux bobinages du stator et synchronisé avec sa source d'excitation. L'angle entre ces deux systèmes de référence est appelé «angle synchrone» de la MADASB, [POZ 03].

III.3.1 Commande Vectorielle de la MADASB a Flux Statorique Orienté

La MADASB présente une complexité supplémentaire parce que le stator est composé par deux bobinages de nombre de pôles différents. Chaque paire de pôles définit un système de référence possible pour représenter les équations dynamiques de la machine, [POZ 03]. Grâce à l'équation (II.58), (II.59) et (II.60) qui transforme les variables d'un système l'autre, on a pu obtenir un modèle vectoriel avec un même référentiel générique lié à un des deux bobinages du stator.

Ce modèle avec un système de référence unique représente un outil puissant pour développer le schéma de commande vectorielle. Ce modèle peut se référer à un des deux bobinages du stator, mais comme l'alimentation du BP est fixe il est plus convenable de lier le système de référence au BP. Il faut choisir aussi l'orientation exacte du système de référence du BP. On peut choisir un référentiel fixe lié aux bobinages $(\alpha p, \beta p)$ ou mobile (d, q) en considérant une grandeur électrique déterminée pour l'orientation du référentiel. Traditionnellement, dans les machines asynchrones on utilise un référentiel mobile lié au flux du stator ou du rotor, et on obtient des variables électriques de valeur constante en régime établi. Avec la BDFIG, on suit la même stratégie et on fixe l'orientation sur un flux de la machine. Comme la MADASB travaille avec une tension du BP constante, la valeur du flux du (BP) est pratiquement constante. L'orientation liée au flux du bobinage de puissance est donc la plus conseillée. [POZ 03].

III.3.1.1 Schéma de commande

On donne alors le modèle vectoriel de la BDFIG dans un référentiel lié au flux du BP (d, q),

$$\begin{aligned} v_{sp}^d &= R_{sp} \cdot i_{sp}^d + \frac{d\Phi_{sp}^d}{dt} - \Phi_{sp}^q \cdot \omega_{sp} & \Phi_{sp}^d &= L_{sp} \cdot i_{sp}^d + L_{mp} \cdot i_r^d \\ v_{sp}^q &= R_{sp} \cdot i_{sp}^q + \frac{d\Phi_{sp}^q}{dt} + \Phi_{sp}^d \cdot \omega_{sp} & \Phi_{sp}^q &= L_{sp} \cdot i_{sp}^q + L_{mp} \cdot i_r^q \end{aligned} \quad (III.6)$$

$$\begin{aligned} 0_r^d &= R_r \cdot i_r^d + \frac{d\Phi_r^d}{dt} - \Phi_r^q \cdot \omega_r & \Phi_r^d &= L_r \cdot i_r^d + L_{mc} \cdot i_{sc}^d + L_{mp} \cdot i_{sp}^d \\ 0_r^q &= R_r \cdot i_r^q + \frac{d\Phi_r^q}{dt} + \Phi_r^d \cdot \omega_r & \Phi_r^q &= L_r \cdot i_r^q + L_{mc} \cdot i_{sc}^q + L_{mp} \cdot i_{sp}^q \end{aligned} \quad (III.7)$$

$$\begin{aligned} v_{sc}^d &= R_{sc} \cdot i_{sc}^d + \frac{d\Phi_{sc}^d}{dt} - \Phi_{sc}^q \cdot \omega_{sc} & \Phi_{sc}^d &= L_{sc} \cdot i_{sc}^d + L_{mc} \cdot i_r^d \\ v_{sc}^q &= R_{sc} \cdot i_{sc}^q + \frac{d\Phi_{sc}^q}{dt} + \Phi_{sc}^d \cdot \omega_{sc} & \Phi_{sc}^q &= L_{sc} \cdot i_{sc}^q + L_{mc} \cdot i_r^q \end{aligned} \quad (III.8)$$

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot \left(p_p \cdot (\Phi_{sp}^d \cdot i_{sp}^q - \Phi_{sp}^q \cdot i_{sp}^d) + p_c \cdot (\Phi_{sc}^d \cdot i_{sc}^q - \Phi_{sc}^q \cdot i_{sc}^d) \right) \quad (III.9)$$

Avec :

$$\Phi_{sp}^d = |\Phi_{sp}| \quad \text{et} \quad \Phi_{sp}^q = 0 \quad (III.10)$$

Pour développer les algorithmes de commande, il faut travailler avec les relations(III.6) – (III.9) et obtenir les rapports entre les diverses variables de la machine. L'orientation suivant le flux du BP simplifie énormément les équations dynamiques puisque la valeur de $|\Phi_{sp}|$ est pratiquement constante, et donc que les termes qui présentent le facteur $\frac{d|\Phi_{sp}|}{dt}$ sont presque nuls.

Dans le schéma de commande, on utilise la technique de boucles multiples en cascade. Ce schéma de commande proposé essaye d'établir le couple de la machine par la commande du courant du BP. La commande du courant du BP est obtenue en modifiant le courant du BC, et finalement en faisant varier la tension du BC on peut établir le courant du BC..[POZ 03]

On montre maintenant les «chemins» de régulation de l'algorithme de commande :

❖ Commande de la puissance réactive du Bobinage de Puissance :

$$(Q_p^*) \rightarrow (i_{sp}^{d*}) \rightarrow (i_{sc}^{d*}) \rightarrow (v_{sc}^{d*})$$

❖ Commande de la vitesse ou de la puissance active du Bobinage de Puissance :

$$(w^*) \rightarrow (C_e^*) \rightarrow (i_{sp}^q)^* \rightarrow (i_{sc}^q)^* \rightarrow (v_{sc}^q)^*$$

$$(P_p^*) \rightarrow (i_{sp}^q)^* \rightarrow (i_{sc}^q)^* \rightarrow (v_{sc}^q)^*$$

Le premier «chemin» de commande définit les niveaux des courants d'excitation de la MADASB. Comme le flux du stator est maintenu presque constant par la tension du réseau, il n'est pas nécessaire d'utiliser la consigne $(i_{sp}^d)^*$ pour maintenir une valeur constante de flux, et on peut donc utiliser ce degré de liberté pour commander la puissance réactive du BP.

Le deuxième «chemin» de commande définit les niveaux des puissances actives de la MADASB. La consigne de $(i_{sc}^q)^*$ est utilisée pour commander la puissance active du BP ou pour commander le couple électromagnétique total de la MADASB. Finalement en variant la consigne de T_{em} à travers un régulateur on peut commander la vitesse du rotor.

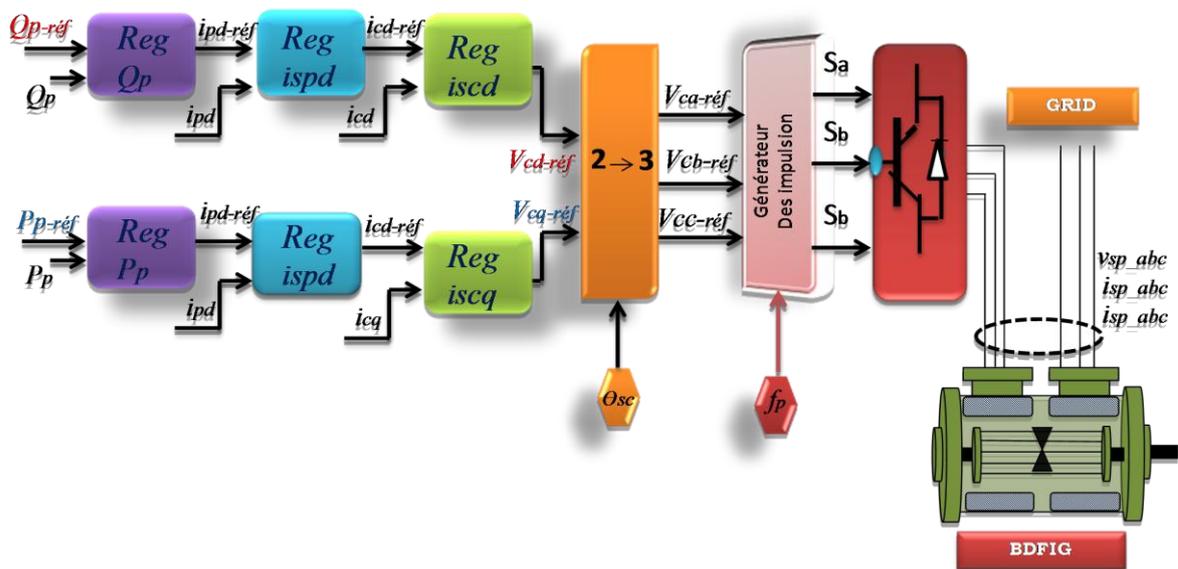


Figure. III.3: Schéma général de commande vectorielle

La figure. III.3 montre le schéma général de commande proposé[POZ 03].Ce schéma nécessite la position du flux du BP pour l'orientation des axes dq. L'estimation du flux du BP est assurée par un modèle de tension. Cette méthode intègre directement la FEM (force électromotrice) sinusoïdale. Bien que cette méthode soit simple, il faut prendre quelques précautions pour éviter l'intégration de composantes continues dans les grandeurs mesurées et

pour résoudre le problème des conditions initiales. Cet estimateur de flux a été amplement traité dans le cas des machines asynchrones à cage. [POZ 03]

L'estimation de T_{em} est nécessaire pour la commande de couple et de vitesse. Dans le cas de la commande de vitesse, il ne faut pas un estimateur de T_{em} très exact. L'algorithme d'estimation de couple électromagnétique évalue la relation (III.9) dans le référentiel souhaité. Cette dernière relation nécessite la connaissance de ω_{sc} , qui est bien estimé par un modèle de tension ou à partir d'un modèle de courant.

La puissance du BP est obtenue à partir du calcul direct des relations (III.36) et (III.39). Il faut noter que la connaissance de la position du rotor est nécessaire pour la transformation des variables du BC dans le référentiel dq

III.3.2 Contrôle Indépendant Des Puissances Active et Réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADASB, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

III.3.2.1 Commande du courant du BP

Pour le calcul du rapport entre les courants du BP et du BC on considère le flux du BP comme une variable fixée par la tension d'alimentation (variable indépendante). Ainsi en utilisant la relation (III.6) le courant du rotor peut être exprimé en fonction des variables du stator :

$$i_r = \frac{1}{L_{mp}} \cdot (\Phi_{sp} - L_{sp} \cdot i_{sp}) \quad (III.11)$$

$$\Phi_r = \frac{1}{L_{mp}} \cdot (L_r \cdot \Phi_{sp} - L_{sp} \cdot L_r \cdot \sigma_p i_{sp}) \quad ; \sigma_p = \left(1 - \frac{L_{mp}^2}{L_{sp} \cdot L_r}\right) \quad (III.12)$$

En considérant les relations (III.11) et (III.12) on peut exprimer l'équation de tension du rotor (III.7) en fonction des variables du stator :

$$0 = \frac{R_r}{L_{mp}} \cdot \Phi_{sp} - \frac{L_{sp} \cdot R_r}{L_{mp}} \cdot i_{sp} - \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp}} \frac{di_{sp}}{dt} + L_{mc} \frac{di_{sc}}{dt} + \frac{L_r}{L_{mp}} \frac{d\Phi_{sp}}{dt} + j \cdot \omega_r \left(-\frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp}} \cdot i_{sp} + L_{mc} \cdot i_{sc} + \frac{L_r}{L_{mp}} \cdot \Phi_{sp} \right) \quad (III.13)$$

Ou : $\omega_r = \omega_{sp} - p_p \cdot \omega$ et $\omega_{sc} = \omega_{sp} - (p_p + p_c) \cdot \omega$

De la relation (III. 13) on peut obtenir les fonctions de transfert de i_{sc} en fonction de i_{sp} et Φ_{sp} . Cependant, pour faciliter le découplage entre les termes d et q de cette équation, on a préféré calculer la dérivée de i_{sc} et réaliser l'intégration de cette grandeur. De cette manière, en utilisant (III. 13) on peut obtenir la relation suivante de la dérivée de i_{sc} :

$$\begin{aligned} \frac{di_{sc}^d}{dt} = & \frac{L_{sp} \cdot R_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^d - \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot \frac{di_{sp}^d}{dt} - \frac{R_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} |\Phi_{sp}| \\ & - \frac{L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} - \omega_r \cdot \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^q + \omega_r \cdot i_{sc}^q \end{aligned} \quad (III.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{sc}^q}{dt} = & \frac{L_{sp} \cdot R_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^q - \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot \frac{di_{sp}^q}{dt} + \omega_r \cdot \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^d - \omega_r \cdot i_{sc}^d \\ & - \omega_r \frac{L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} |\Phi_{sp}| \end{aligned} \quad (III.15)$$

Les relations (III. 14) et (III. 15) peuvent être réorganisées en deux termes:

$$\frac{di_{sc}^d}{dt} = X_1(i_{sp}^d) + Y_1(i_{sp}^q, i_{sc}^q, |\Phi_{sp}|) \quad (III.16)$$

$$\frac{di_{sc}^q}{dt} = X_2(i_{sp}^q) + Y_2(i_{sp}^d, i_{sc}^d, |\Phi_{sp}|) \quad (III.17)$$

$$X_1(i_{sp}^d) = \frac{L_{sp} \cdot R_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^d - \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot \frac{di_{sp}^d}{dt} \quad (III.18)$$

$$X_2(i_{sp}^q) = \frac{L_{sp} \cdot R_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^q - \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot \frac{di_{sp}^q}{dt} \quad (III.19)$$

$$Y_1 = -\frac{R_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} |\Phi_{sp}| - \frac{L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} - \omega_r \cdot \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^q + \omega_r \cdot i_{sc}^q \quad (III.20)$$

$$Y_2 = \omega_r \cdot \frac{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} \cdot i_{sp}^d - \omega_r \cdot i_{sc}^d - \omega_r \frac{L_r}{L_{mp} \cdot L_{mc}} |\Phi_{sp}| \quad (III.21)$$

Les fonctions $X_1(i_{sp}^d)$ et $X_2(i_{sp}^q)$ reflètent un rapport linéaire entre les composantes vectorielles directes des courants du BP et du BC, tandis que $Y_1(i_{sp}^q, i_{sc}^q, |\Phi_{sp}|)$ et $Y_2(i_{sp}^d, i_{sc}^d, |\Phi_{sp}|)$ représentent le couplage de courant entre les composantes vectorielles croisées d et q. Si dans le schéma de commande on ajoute les termes

Y_1 et Y_2 à travers d'une action directe (feedforward) la régulation de courant se caractérisera par le système de premier ordre suivant :

$$i_{sp} = \frac{K_p}{\tau_p \cdot S + 1} X(S), \quad K_p = \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot R_r}, \quad \tau_p = \frac{\sigma_p \cdot L_r}{R_r} \quad (\text{III.22})$$

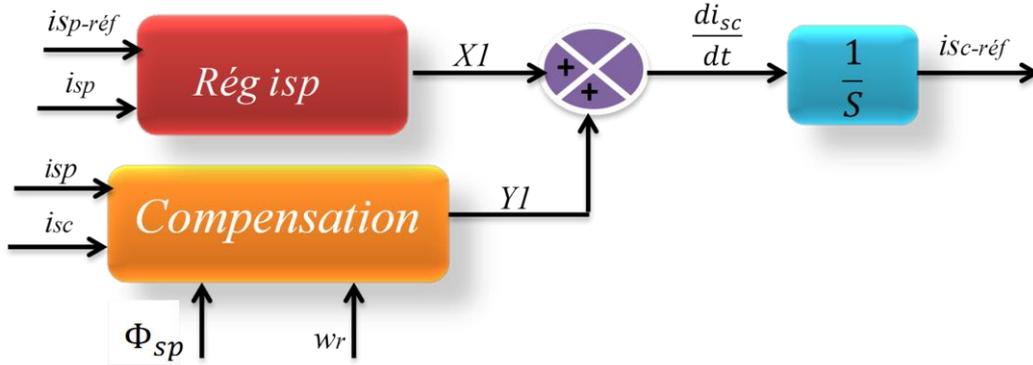


Figure. III.4 : Schéma de commande i_{sp}

III.3.2.2 Commande du courant du B-C

Pour déterminer l'équation dynamique du système utilisé dans la commande de i_{sc} on substitue la relation (III. 11) dans les équations (III. 8), ce qui donne :

$$\Phi_{sc} = \frac{L_{mc}}{L_{mp}} \cdot \Phi_{sp} - \frac{L_{sp} \cdot L_{mc}}{L_{mp}} \cdot i_{sp} + L_{sc} \cdot i_{sc} \quad (\text{III.23})$$

$$v_{sc} = R_{sc} \cdot i_{sc} + L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} + \frac{L_{mc}}{L_{mp}} \frac{d\Phi_{sp}}{dt} - \frac{L_{sp} \cdot L_{mc}}{L_{mp}} \cdot \frac{di_{sp}}{dt} + j\omega_{sc} \cdot \left(R_{sc} \cdot i_{sc} + \frac{L_{mc}}{L_{mp}} \cdot \Phi_{sp} - \frac{L_{sp} \cdot L_{mc}}{L_{mp}} \cdot i_{sp} \right) \quad (\text{III.24})$$

On veut exprimer l'équation de tension v_{sc} précédente en fonction de i_{sc} . Pour cela, on substitue le terme de $\frac{di_{sp}}{dt}$ par l'expression résultante en (III. 14) et (III. 15):

$$\begin{aligned} \frac{di_{sp}^d}{dt} &= \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r} \cdot \left(L_{mc} \frac{di_{sc}^d}{dt} - \frac{R_r \cdot L_{sp}}{L_{mp}} \cdot i_{sp}^d + \frac{R_r}{L_{mp}} |\Phi_{sp}| + \frac{1}{L_{mp}} \frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \right) \\ &\quad + \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r} (\omega_r \cdot L_{sp} \sigma_p \cdot i_{sp}^q - \omega_r \cdot L_{mc} i_{sc}^q) \end{aligned} \quad (III.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{sp}^q}{dt} &= \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r} \cdot \left(L_{mc} \frac{di_{sc}^q}{dt} - \frac{R_r \cdot L_{sp}}{L_{mp}} \cdot i_{sp}^q + \frac{\omega_r}{L_{mp}} |\Phi_{sp}| \right) \\ &\quad + \frac{L_{mp} \cdot L_{mc}}{L_{sp} \cdot \sigma_p \cdot L_r} (-\omega_r \cdot L_{sp} \sigma_p \cdot i_{sp}^d + \omega_r \cdot L_{mc} i_{sc}^d) \end{aligned} \quad (III.26)$$

$$\begin{aligned} v_{sc}^d &= R_{sc} \cdot i_{sc}^d + \left(L_{sc} - \frac{L_{mc}^2}{\sigma_p \cdot L_r} \right) \frac{di_{sc}^d}{dt} + \frac{L_{sp} \cdot L_{mc} R_r}{L_{mc} \cdot \sigma_p \cdot L_r} \cdot i_{sp}^d - \frac{L_{mc} R_r}{L_{mp} \cdot \sigma_p \cdot L_r} |\Phi_{sp}| \\ &\quad + \frac{L_{mc}}{L_{mp}} \left(1 - \frac{1}{\sigma_p} \right) \frac{d\Phi_{sp}}{dt} - p_p \omega \frac{L_{mc} \cdot L_{sp}}{L_{mp}} \cdot i_{sp}^q \\ &\quad + \left[\frac{L_{mc}^2}{\sigma_p \cdot L_r} \omega_r - (\omega_r - p_p \omega) L_{sc} \right] \cdot i_{sc}^q \end{aligned} \quad (III.27)$$

$$\begin{aligned} v_{sc}^q &= R_{sc} \cdot i_{sc}^q + \left(L_{sc} - \frac{L_{mc}^2}{\sigma_p \cdot L_r} \right) \frac{di_{sc}^q}{dt} + \frac{L_{sp} \cdot L_{mc} R_r}{L_{mc} \cdot \sigma_p \cdot L_r} \cdot i_{sp}^q + p_p \omega \frac{L_{mc} \cdot L_{sp}}{L_{mp}} \cdot i_{sp}^q \\ &\quad - \frac{L_{mc}}{L_{mp}} \cdot \left[\frac{\sigma_p - 1}{\sigma_p} \cdot p_p \omega_r \right] |\Phi_{sp}| \\ &\quad + \left[\frac{L_{mc}^2}{\sigma_p \cdot L_r} \omega_r - (\omega_r - p_p \omega) L_{sc} \right] \cdot i_{sc}^d \end{aligned} \quad (III.28)$$

Dans ce cas, on peut aussi réorganiser les relations (III. 27) et (III. 28) en deux termes:

$$v_{sc}^d = X'_1(i_{sc}^d) + Y'_1(i_{sp}^d, i_{sp}^q, i_{sc}^q, |\Phi_{sp}|) \quad (III.29)$$

$$v_{sc}^q = X'_2(i_{sp}^d) + Y'_2(i_{sp}^d, i_{sp}^q, i_{sc}^d, |\Phi_{sp}|) \quad (III.30)$$

dont les expressions individuelles sont :

$$X'_1(i_{sc}^d) = R_{sc} \cdot i_{sc}^d + \left(L_{sc} - \frac{L_{mc}^2}{\sigma_p \cdot L_r} \right) \frac{di_{sc}^d}{dt} \quad (III.31)$$

$$X'_2(i_{sp}^d) = R_{sc} \cdot i_{sc}^q + \left(L_{sc} - \frac{L_{mc}^2}{\sigma_p \cdot L_r} \right) \frac{di_{sc}^q}{dt} \quad (III.32)$$

$$Y_1' = -\frac{L_{mc}R_r}{L_{mp}\cdot\sigma_p\cdot L_r}|\Phi_{sp}| + \frac{L_{mc}}{L_{mp}}\left(1 - \frac{1}{\sigma_p}\right)\frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} - p_p\omega\frac{L_{mc}\cdot L_{sp}}{L_{mp}}\cdot i_{sp}^q + \left[\frac{L_{mc}^2}{\sigma_p\cdot L_r}\omega_r - (\omega_r - p_p\omega)L_{sc}\right]\cdot i_{sc}^q \quad (\text{III.33})$$

$$Y_2' = +\frac{L_{sp}\cdot L_{mc}R_r}{L_{mc}\cdot\sigma_p\cdot L_r}\cdot i_{sp}^q + p_p\omega\frac{L_{mc}\cdot L_{sp}}{L_{mp}}\cdot i_{sp}^q - \frac{L_{mc}}{L_{mp}}\cdot\left(\frac{\sigma_p - 1}{\sigma_p}\cdot p_p\omega_r\right)|\Phi_{sp}| + \left[\frac{L_{mc}^2}{\sigma_p\cdot L_r}\omega_r - (\omega_r - p_p\omega)L_{sc}\right]\cdot i_{sc}^d \quad (\text{III.34})$$

Dans l'équation (III.32) on a négligé le terme correspondant à la dérivée du flux du BP, ($\frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \approx 0$). Avec les actions directes Y_1' et Y_2' le système à contrôler prend la forme suivante :

$$i_{sc} = \frac{K_c}{\tau_c\cdot S + 1}X'(S), \quad K_c = \frac{1}{R_{sc}}, \quad \tau_c = \frac{L_{sc} - L_{mc}^2/(\sigma_p\cdot L_r)}{R_{sc}} \quad (\text{III.35})$$

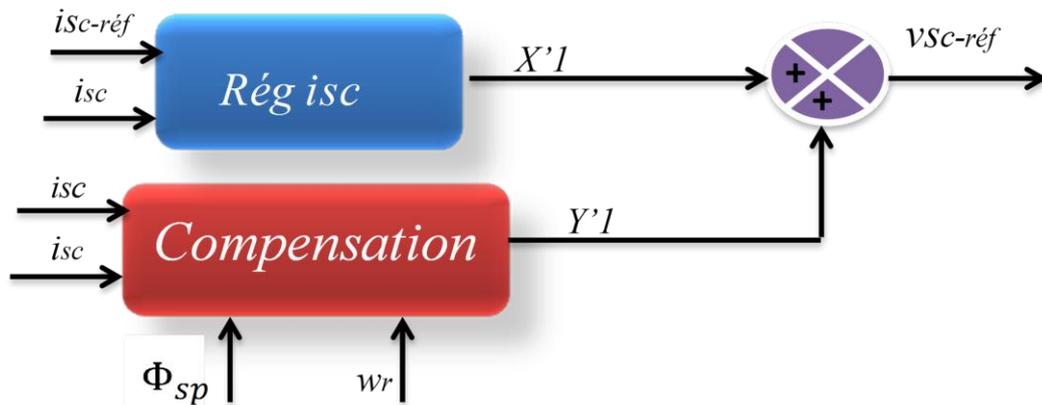


Figure. III.5 : Schéma de commande i_{sc}

III.3.2.2 Commande de la puissance réactive du BP

L'équation générale de la puissance réactive est :

$$Q_{sp} = \frac{3}{2} \cdot (v_{sp}^q i_{sp}^d - v_{sp}^d i_{sp}^q) \quad (\text{III.36})$$

En utilisant la relation (III. 6) on exprime la puissance réactive du BP en fonction du flux et du courant.

$$Q_{sp} = \frac{3}{2} \cdot \omega_{sp} |\Phi_{sp}| \cdot i_{sp}^d - \frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \cdot i_{sp}^q \quad (\text{III.37})$$

Comme ($\frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \approx 0$) on peut négliger le terme de i_{sp}^q . La fonction de transfert de la régulation de Q_{sp} doit tenir compte la dynamique en boucle fermée de la commande de i_{sp}^d :

$$\frac{Q_{sp}(s)}{i_{sp}^d(s)} = \frac{3}{2} \cdot \omega_{sp} |\Phi_{sp}| \cdot FT(s)_{\text{Rég}_i^d} \quad (\text{III.38})$$

III.3.2.3 Commande de la puissance active du BP

On fait du même pour calculer l'équation de la puissance active, et on obtient :

$$P_{sp} = \frac{3}{2} \cdot (v_{sp}^d i_{sp}^d + v_{sp}^q i_{sp}^q) \quad (\text{III.39})$$

On peut exprimer cette équation :

$$P_{sp} = \frac{3}{2} \cdot \omega_{sp} |\Phi_{sp}| \cdot i_{sp}^q + \frac{3}{2} \cdot \frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \cdot i_{sp}^d + \frac{3}{2} R_{sp} \cdot |i_p^2| \quad (\text{III.40})$$

En tenant compte du fait que ($\frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \approx 0$), la perturbation du système de commande est due uniquement aux pertes de joule. La fonction de transfert pour la régulation de P_{sp} est égale à :

$$\frac{P_{sp}(s)}{i_{sp}^q(s)} = \frac{3}{2} \cdot \omega_{sp} |\Phi_{sp}| \cdot FT(s)_{\text{Rég}_i^q} \quad (\text{III.41})$$

III.3.3 Ensemble des algorithmes de commande

La figure. III.6 montre l'ensemble des algorithmes de commande. Les actions feedforward Y_1, Y_2, Y_1' , et Y_2' sont calculées à partir de (III.20), (III.21), (III.33) et (III.34) en considérant que ($\frac{d|\Phi_{sp}|}{dt} \approx 0$). A priori, on peut agir sans implanter les actions feedforward en commandant correctement les différentes grandeurs.

Cependant, dans ce cas-là on obtient des dynamiques de régulation moins performantes.

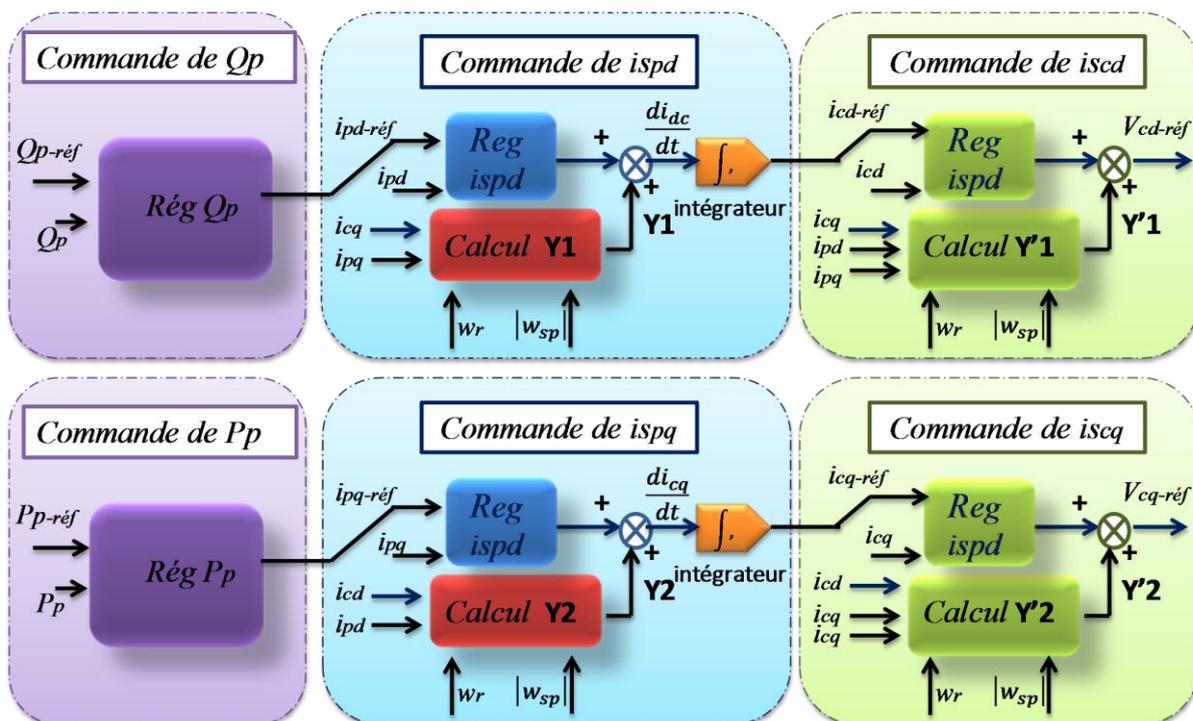


Figure. III.6 : Structures des régulateurs dans la commande vectorielle.

III.3.4 Simulation de la commande vectorielle

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la MADASB obtenu et validé dans le chapitre II. Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande en puissances d'une machine prototype BDFIG de 2.5kW entraînée à une vitesse fixe 600 (t/min) et pilotée au BC par un onduleur de tension à deux niveaux.

Le BP est connectée à une source triphasée parfaite d'une tension constante de 243 volts efficaces par phase. Tous les graphiques suivants montrent les composantes vectorielles des courants en utilisant une transformée triphasé-biphasé qui conserve ses valeurs maximales. La synthèse des régulateurs utilisés est détaillée dans l'annexe C.

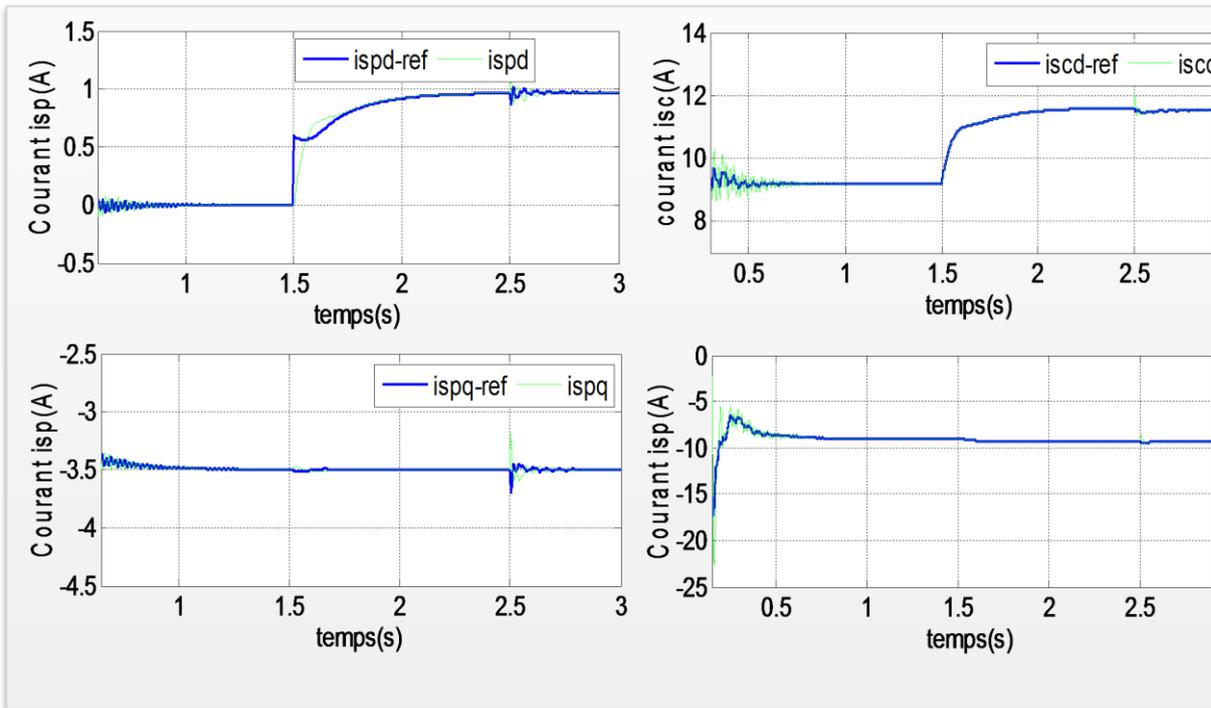


Figure. III.7 : Réponse de Courants statorique du bobinage de puissance et de commande ($ispd, ispq, iscd, iscq$)

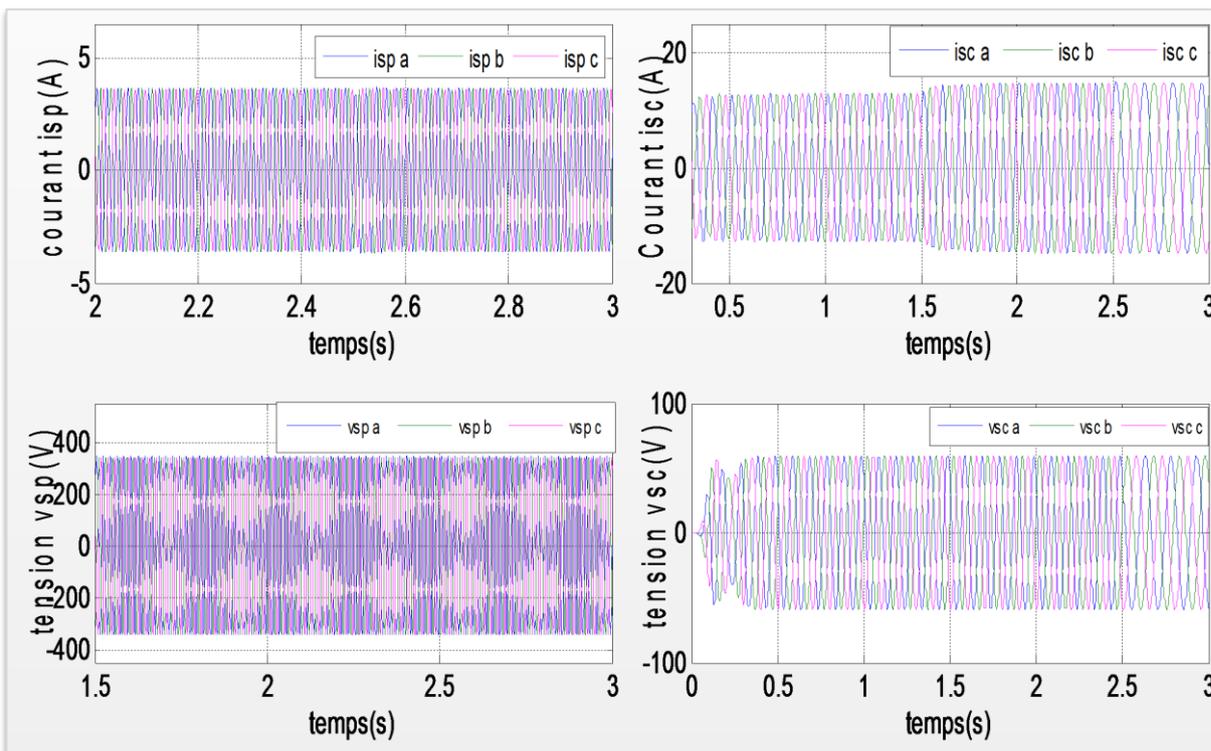


Figure. III.8 : Tension et Courants statorique du bobinage de puissance et de commande (isp, isc, vsp, vsc)

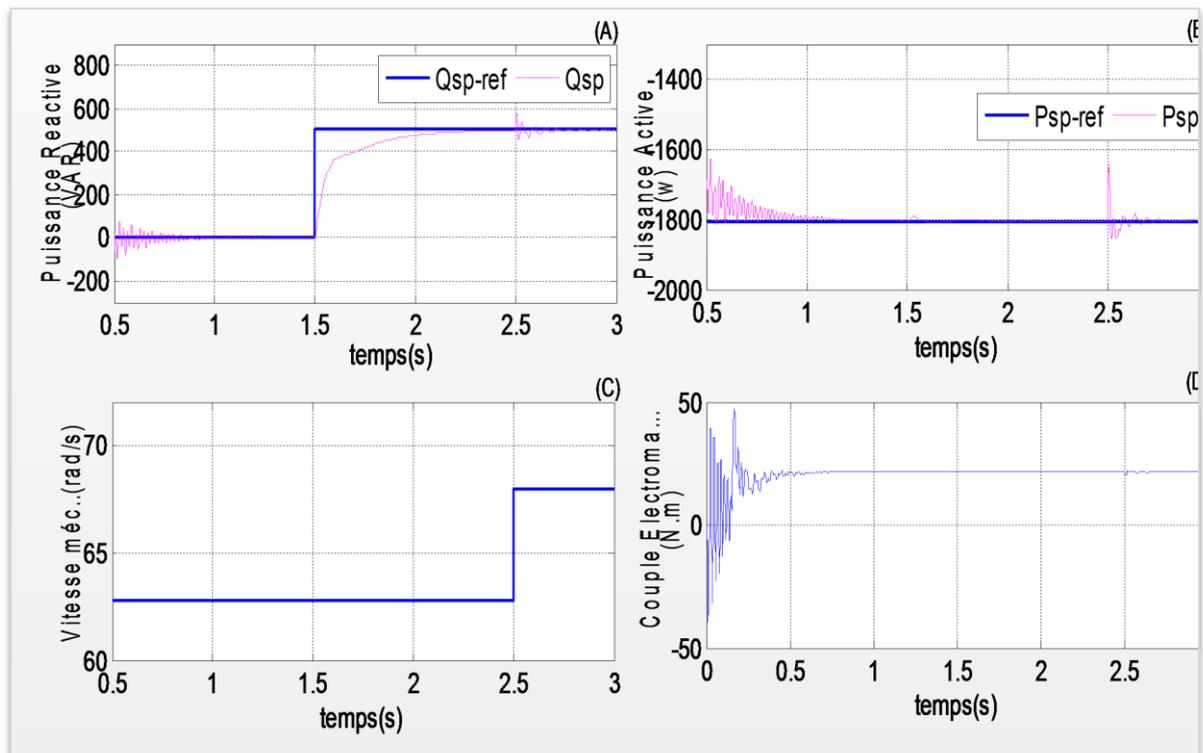


Figure. III.9 : (A), Réponse de Puissance Réactive du bobinage de puissance statorique

(B), Réponse de Puissance Active du bobinage de puissance statorique

(C) Vitesse mécanique, (D) Couple électromagnétique totale du la MADASB

III.3.5 Interprétation des résultats

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, cette commande permet de découpler les expressions des puissances active et réactive du générateur. La composante quadrature du courant statorique (bobinage de commande) i_{sc}^q contrôle la puissance active, et la composante directe i_{sc}^d contrôle la puissance réactive échangée entre le stator (bobinage de puissance) et le réseau.

les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant, on remarque des oscillations aux instants d'application de échelon de puissance réactive a($t=1.5s$) et l'échelon de la vitesse a($t=2.5s$) dues au couplage entre les deux axes de la machine. La puissance active 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.

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié et appliqué l'algorithme de commande vectorielle pour la BDFIM qui permet la régulation de la puissance active et réactive du BP, pour une vitesse de rotation quelconque,

à partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler les puissances (active et réactive) de sorte que la composante directe du courant statorique de la machine (B C) contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC

L'orientation suivant le flux de stator du BP permet une réponse non couplée performante avec des régulateurs simples (dans ce cas on a utilisé des régulateurs de type PI). Chaque système de commande individuel est caractérisé par une fonction de transfert simple.

*ASSERVISSEMENT DE LA CHAÎNE
TURBINE-MADASB-CONVERTISSEURS*

Chapitre IV

Asservissement de la chaîne

Turbine-MADASB-Convertisseurs

IV.1 INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, il a été question de l'étude détaillée des différentes parties constituant une chaîne éolienne. Celles-ci ne peuvent pas fonctionner indépendamment et leurs utilités s'avèrent par la complémentarité qu'elles constituent.

Dans cette optique une commande régissant l'ensemble de la chaîne éolienne constituée de l'aérogénérateur, la MADASB et de la cascade (Onduleur –Bus continu –Redresseur) sera réalisée. Elle se basera sur deux principes différents. Une comparaison en sera faite pour choisir la commande la plus adéquate.

Nous présenterons la modélisation des éléments complémentaires, en commençant par l'onduleur MLI, ensuite nous présenterons le redresseur MLI alimentant le bus continu et

Nous terminerons par des simulations du système global.

IV.2. TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE PUISSANCE

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la figure IV.1, [POI 03], [GAI 10]:

- **Zone 1** : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.
- **Zone 2** : le vent atteint une vitesse minimale V_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal 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 .
- **Zone 3** : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale V_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

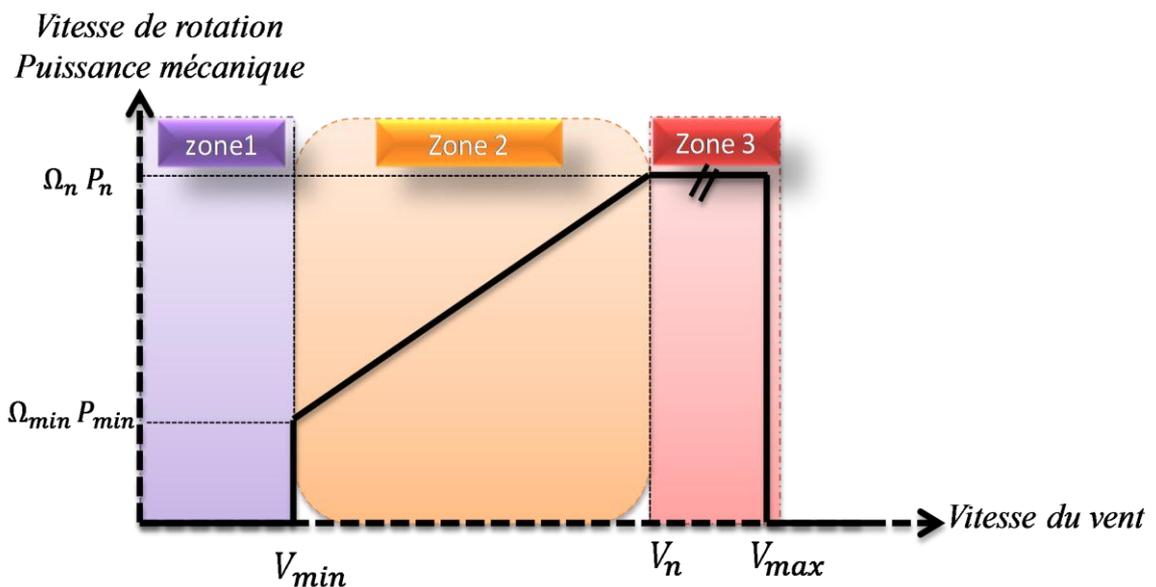


Figure IV.1 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable. [GAI 10]

Dans le cadre de cette mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales β est constant.

IV.2.1 Recherche du point de puissance maximale « MPPT »

Un algorithme « MPPT », de l'anglais « *Maximum Power Point Tracker* » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [GAS11].

Comme il a été constaté dans le premier chapitre, la puissance exploitée varie en fonction de la vitesse du convertisseur électromécanique, pour une vitesse de vent fixe en admettant un point maximal appelé : « MPP maximum power point ».

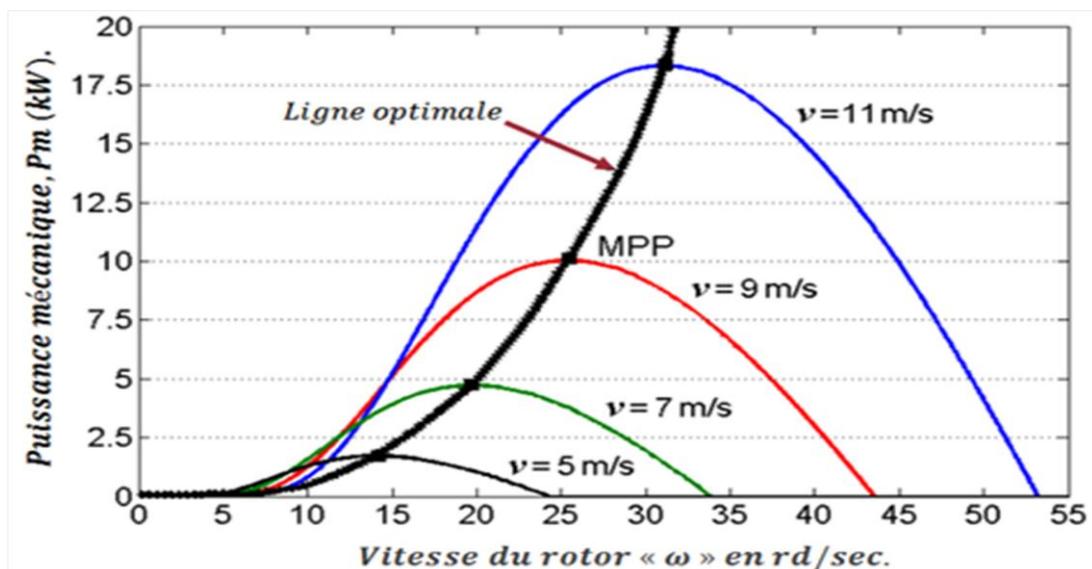


Figure IV.2 : Ligne de puissance optimale et points 'MPP' pour diverses vitesses de vent.

Étant donné que, les paramètres d'une éolienne (i.e., la vitesse réduite « λ » optimale de l'efficacité aérodynamique) sont inconnus, les algorithmes « MPPT » visent généralement à maintenir le point de fonctionnement optimal en mettant à zéro la valeur du gradient :

$$\frac{d(P_{éol})}{d\Omega} = \frac{d(P_{éol})}{dt} \frac{dt}{d\Omega} \quad (\text{IV.01})$$

Où « $P_{éol}$ » est la puissance éolienne totale et « Ω » présente la vitesse du convertisseur électromécanique. Par conséquent, l'entrée de commande, ce qui représente la référence de vitesse éolienne, dépend de la position du point de fonctionnement et sa tendance à bouger, exprimée par le signe du gradient, présenté par l'équation ci-dessus (voir le tableau « IV.1 » et la figure « IV.3 »)[GAS11]

$\frac{dy}{dt} \backslash \frac{d(P_{éol})}{dt}$	< 0	> 0
< 0	$\Omega \nearrow$ cas « I »	$\Omega \searrow$ cas « II »
> 0	$\Omega \searrow$ cas « III »	$\Omega \nearrow$ cas « IV »

Tableau IV.1 : Principe de control de l'MPPT [GAS11].

Comme la puissance de la turbine (puissance éolienne) n'est pas disponible pour la mesure, une estimation de sa valeur est obtenue à partir de la puissance active mesurée, cette dernière est utilisée pour la localisation du point de fonctionnement optimal « MPP », conduisant à une approche quelque peu statique.

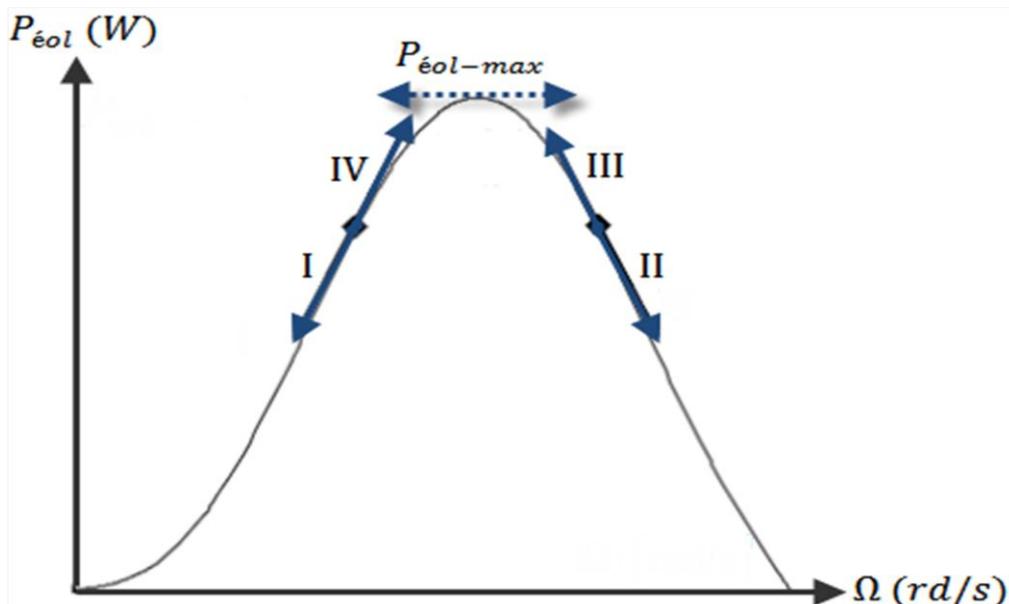


Figure IV.3: Principe de la MPPT dans le plan (Ω - P) [GAS11].

IV.2.2 Algorithmes de maximisation de la puissance extraite

Le but de la commande à vitesse variable de la MADASB est d'extraire le maximum de puissance éolienne. Pour cela, nous avons besoin d'un algorithme agissant sur les variables de consigne afin d'avoir le meilleur rendement possible du dispositif étudié

Pour l'étude de ces modes de contrôle, on supposera que la machine et le convertisseur sont idéaux : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la machine est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande[GAI 10].

IV.2.2.1 Algorithme de perturbation et observation « P&O »

Parmi les algorithmes les plus utilisés pour la recherche du point de puissance maximale, nous citons : l'algorithme de perturbation et observation. L'algorithme « P&O » de MPPT est surtout utilisé, en raison de sa facilité de mise en œuvre. Il est basé sur le critère suivant : si la vitesse de fonctionnement du générateur éolien est perturbée, dans une direction donnée, et si la puissance fournie par le générateur augmente, cela signifie que le point de fonctionnement a progressé vers le « MPP » et, par conséquent, la vitesse de la machine doit être encore perturbée dans la même direction. Sinon, si la puissance exploitée du générateur diminue, le point de fonctionnement s'est éloigné du « MPP » et par conséquent, la direction de la perturbation de la vitesse de fonctionnement doit être inversée[GAS 11]

La seule difficulté qui peut nous faire face, est le choix de la valeur de « $\Delta\Omega$ » que nous devons soustraire ou ajouter à la référence, afin d'atteindre le point de puissance maximale « MPP »[GAS 11]:

✚ Si « $\Delta\Omega$ » est grande par rapport à celle optimale : l'algorithme de MPPT sera rapide, mais caractérisé par une ondulation assez importante (la vitesse du point de puissance maximale oscillera autour de « $\Omega_{ref} + \Delta\Omega$ » et « $\Omega_{ref} - \Delta\Omega$ »).

✚ Si « $\Delta\Omega$ » est petite par rapport à celle optimale : l'algorithme de MPPT sera très long et la vitesse finale de référence sera atteinte qu'après un temps très important (exploitation minimale de la puissance pendant longtemps)

Pour cela, nous devons choisir la valeur « $\Delta\Omega$ » d'une façon relative et non pas absolue, relative en fonction de la dérivée de la puissance par rapport à la vitesse de la machine :

$$\Delta\Omega = \left(\frac{dP_{\text{éol}}}{d\Omega}\right) / C = \left(\frac{P_k - P_{k-1}}{\Omega_k - \Omega_{k-1}}\right) / C = \frac{P_k - P_{k-1}}{C(\Omega_k - \Omega_{k-1})} \quad (\text{IV.02})$$

C : Coefficient d'ajustement du système avec l'algorithme de MPPT, de sorte que :

$$\frac{P_k - P_{k-1}}{C \cdot (\Omega_k - \Omega_{k-1})} < \Delta\Omega_{\text{max}} = 3 \frac{rd}{s} \quad (\text{IV.03})$$

Il reste le temps d'échantillonnage « T_E » de l'algorithme MPPT (la durée de l'application d'une référence de vitesse « $\Omega_{\text{ref}} \mp \Delta\Omega$ »), il dépend de la rapidité du système. [GAS 11]

L'organigramme assurant le déroulement de l'algorithme «**P & O**» est illustré comme suite

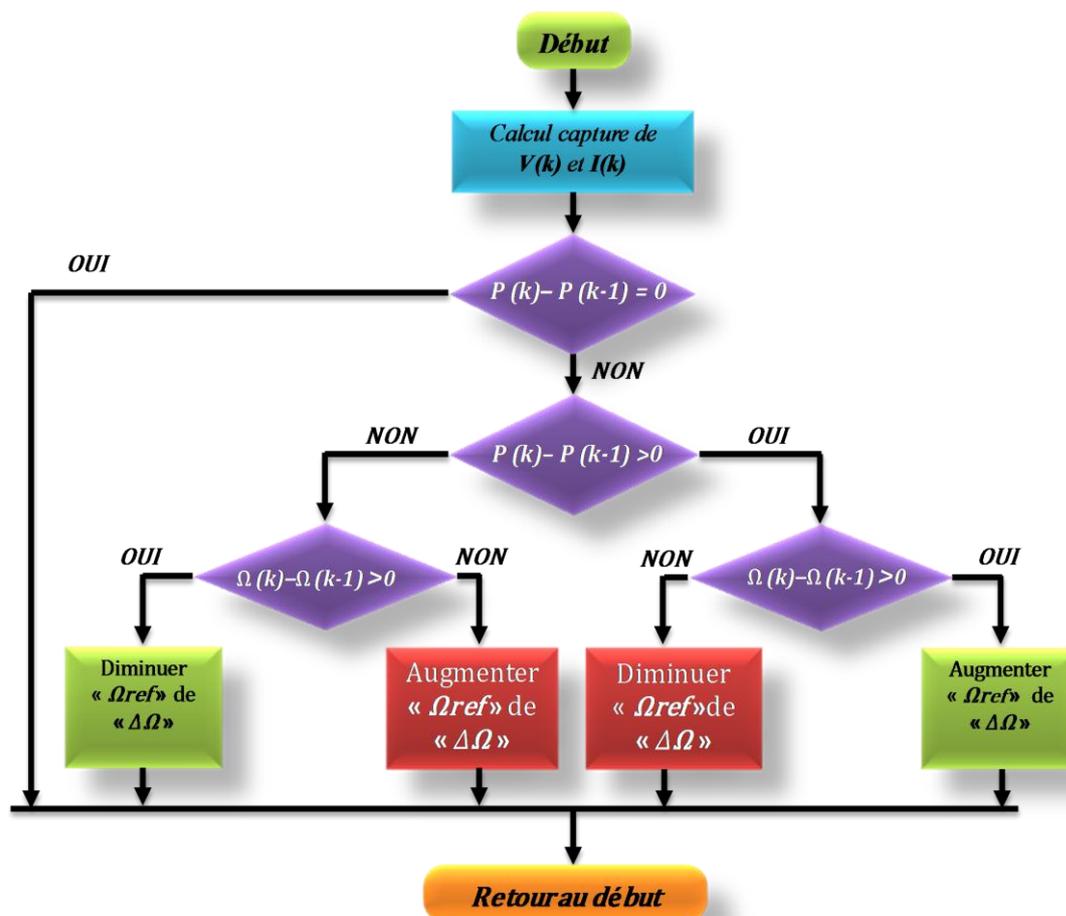


Figure IV.4 : Organigramme de l'algorithme « P&O ». [GAS 11]

IV.2.2.2 Algorithme de contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

La première méthode de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la machine de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la machine doit être effectué, comme, montre la figure (IV.5)[GAI 10].

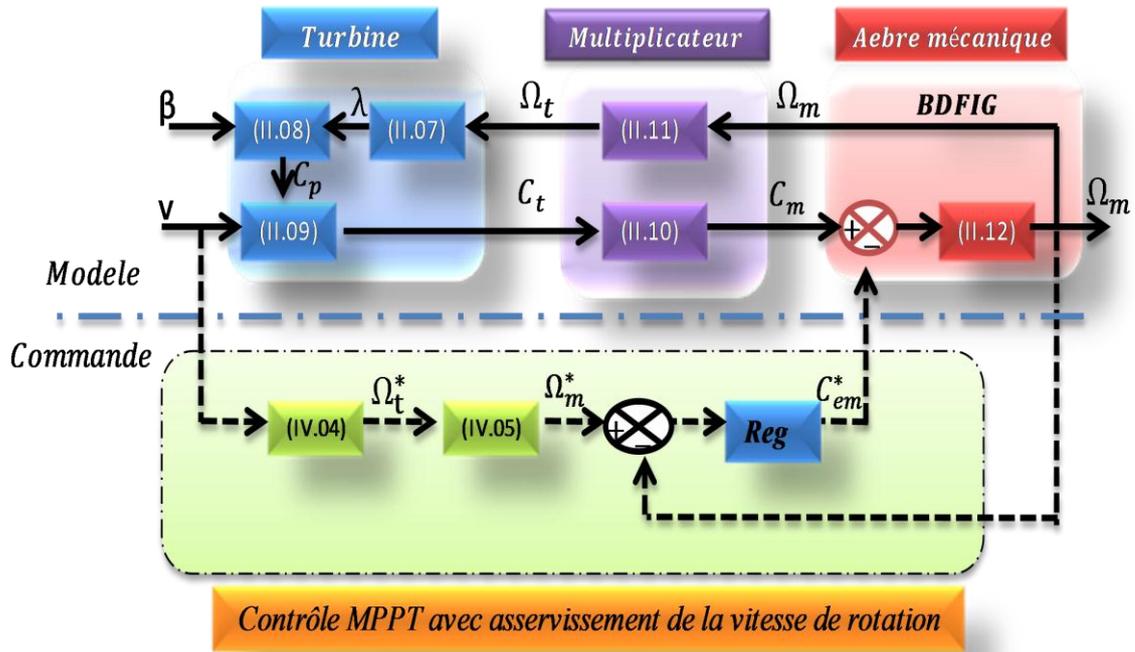


Figure IV.5 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

Le couple électromagnétique de référence C_{em}^* permettant d'obtenir une vitesse de rotation Ω_m égale à sa valeur de référence Ω_m^* est obtenu en sortie du régulateur de vitesse ("Reg" sur la Figure IV.5). Ce régulateur, de type Proportionnel Intégral (PI), permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple mécanique C_m considéré comme une perturbation[GAI 10].

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient C_p . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale λ_{opt} (pour β constant et égal à 2°), comme montre la figure (IV.6).

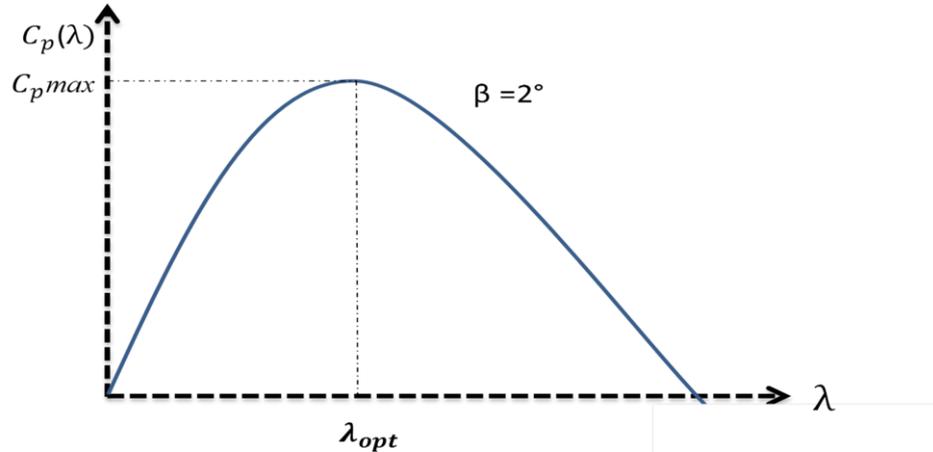


Figure IV.6 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour $\beta = 2^\circ$.

La vitesse de rotation de référence de la turbine Ω_t^* est obtenue à partir de l'équation (III.7) et est définie par :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R_t} \quad (IV.04)$$

Nous en déduisons la référence de vitesse de rotation de la machine en prenant en compte le gain du multiplicateur par :

$$\Omega_m^* = G \cdot \Omega_t^* \quad (IV.05)$$

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation [GAI 10]. Ce mode de contrôle est étudié à la section suivante. Il sera retenu dans la suite de nos travaux.

IV.2.2.3 Algorithme de contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui

implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul, [GAI 10] Dans ce cas, à partir de l'équation (III.12), nous pouvons écrire:

$$\left(\frac{J_T}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} = 0 \quad (\text{IV.06})$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($f_v \cdot \Omega_m = 0$) par rapport au couple mécanique C_m , on peut alors écrire :

$$C_m = C_{em} \quad (\text{IV.07})$$

La figure (IV.7) présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

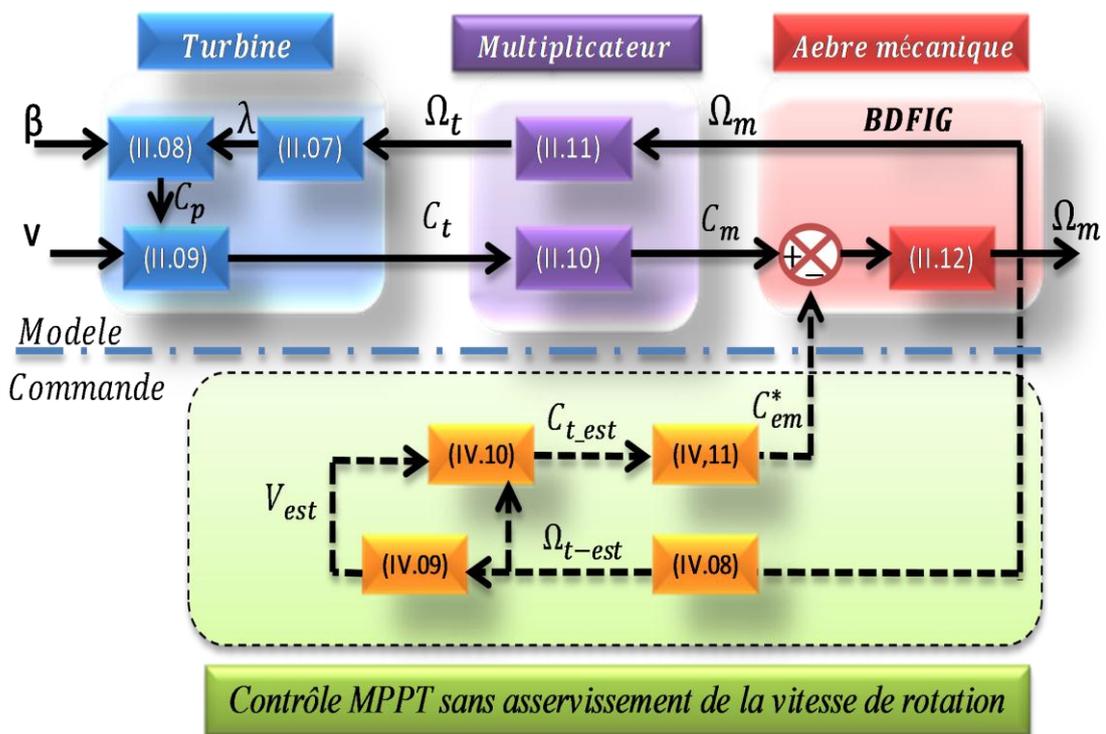


Figure IV.7 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation.

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée Ω_{T-est} , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la machine :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_m}{G} \quad (IV.08)$$

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

$$V_{est} = \frac{\Omega_{t-est} \cdot R_t}{\lambda} \quad (IV.09)$$

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

$$C_{t-est} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot R_t^2 \pi \cdot V_{est}^3}{\Omega_{t-est}} C_p \quad (IV.10)$$

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

$$C_{em}^* = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (IV.11)$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum C_{p_max} . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par:

$$C_{em}^* = K \cdot \Omega_m^2 \quad (IV.12)$$

Où K est une constante définie par :

$$C_{t-est} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot C_{p_max} \cdot R_t^5}{G^3 \lambda_{opt}^3} \quad (IV.13)$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (Zone 2) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de la machine[GAI 10].

IV.3 MODELISATION DE LA LIAISON DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La figure IV.8 illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée.

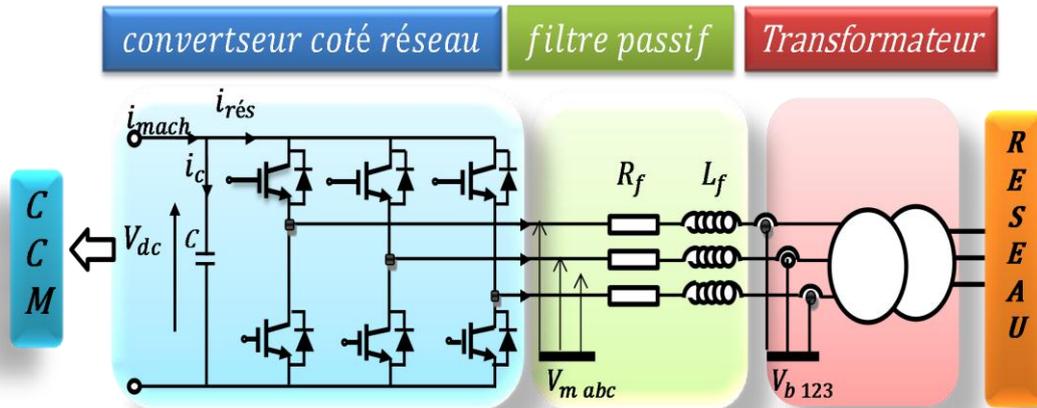


Figure IV.8 : Connexion du CCR au réseau électrique.

Avec :

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

Comme montré sur la figure ci-dessus, nous avons introduit un deuxième convertisseur de puissance pour faire la liaison du stator (BC) au réseau électrique à travers un filtre passif (R-L). Le convertisseur de puissance aura deux rôles :

- ✚ Assurer le transit de puissance entre le stator (Bobinage de commande) de la machine (MADASB) et le réseau électrique.
- ✚ Maintenir la tension du bus continu constante en contrôlant le transit de puissance entre le stator (BC) de la machine et le réseau.

Le rôle du filtre est d'atténuer les harmoniques d'ordre supérieur générés par le convertisseur de puissance du côté du réseau. Notons qu'un éventuel transformateur aurait dû être introduit entre le filtre et le réseau pour adapter la tension de sortie du convertisseur à celle du réseau. Dans notre cas, le transformateur est considéré comme un simple gain de tension.

IV.3.1 Modèle du bus continu

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

$$i_c = C \left(\frac{dV_{DC}}{dt} \right) \quad (IV.14)$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (Figure 1-6) :

$$i_{cond} = i_{red} - i_{ond} \quad (IV.15)$$

Ainsi, le bus continu sera modélisé par la fonction de transfert suivante :

$$V_{DC} = \frac{1}{C.S} \quad (IV.16)$$

IV.3.2 Modélisation du convertisseur coté réseau

Le deuxième convertisseur étant à deux niveaux et réversible donc identique au convertisseur coté rotor. Son modèle sera donc identique à celui étudié dans le chapitre précédent.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

De plus, s'il fonctionne en redresseur, le courant redressé sera donné par :

$$i_{red} = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

IV.3.3 Modélisation du filtre passif

Les courants transités entre le convertisseur et le réseau sont imposés par les bobines constituant le filtre passe-bas [MET 09]. La tension aux bornes du filtre est donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{b1} \\ V_{b2} \\ V_{b3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{res a} \\ V_{res b} \\ V_{res c} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \quad (IV.19)$$

Soit en appliquant la transformation de Park :

$$\begin{bmatrix} V_{bd} \\ V_{bq} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \end{bmatrix} + L_f S \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \end{bmatrix} + L_f \omega_s \begin{bmatrix} -I_{fq} \\ I_{fd} \end{bmatrix} \quad (IV.20)$$

On pose :

$$\begin{aligned} -L_f \omega_s I_{fq} &= e_q \\ L_f \omega_s I_{fd} &= e_d \end{aligned} \quad \text{et} \quad \begin{aligned} V_{bd} - e_q &= V_{fd} \\ V_{bq} - e_d &= V_{fq} \end{aligned} \quad (\text{IV.21})$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} V_{fd} \\ V_{fq} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \end{bmatrix} + L_f S \begin{bmatrix} I_{fd} \\ I_{fq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

D'où on obtient deux fonctions de transfert identiques représentant le modèle du filtre passif dans le repère de Park.

$$\frac{I_{fd}}{V_{fd}} = \frac{I_{fq}}{V_{fq}} = \frac{1}{R_f + L_f S} \quad (\text{IV.23})$$

IV.3.4 Régulation de la tension du bus continu

Jusqu'à présent nous avons supposé que la tension dans l'étape continue était constante, mais elle va réellement dépendre des puissances transférées dans les convertisseurs côté machine et celui du côté du réseau. En effet, tel qu'on le voit sur la figure IV.9 on peut exprimer le courant dans le condensateur C par :

$$\dot{i}_c = \dot{i}_{mac} - \dot{i}_{res} \quad (\text{IV.24})$$

En multipliant par la tension du bus continu V_{dc} , on trouve :

$$P_c = P_{mac} - P_{res} \quad (\text{IV.25})$$

Tel que :

- $P_c = V_{dc} \cdot \dot{i}_c$: est la puissance emmagasinée dans le condensateur.
- $P_{mac} = V_{dc} \cdot \dot{i}_{mac}$: est la puissance transitée par le convertisseur coté stator (BC).
- $P_{res} = V_{dc} \cdot \dot{i}_{res}$: est la puissance transitée par le convertisseur coté réseau.

En négligeant les pertes dans le filtre R-L, la référence de la puissance qui doit être transitée par le convertisseur sera donnée par :

$$P_{res} = P_{mac} - P_c = I_{mac} - I_c V_{dc} \quad (\text{IV.26})$$

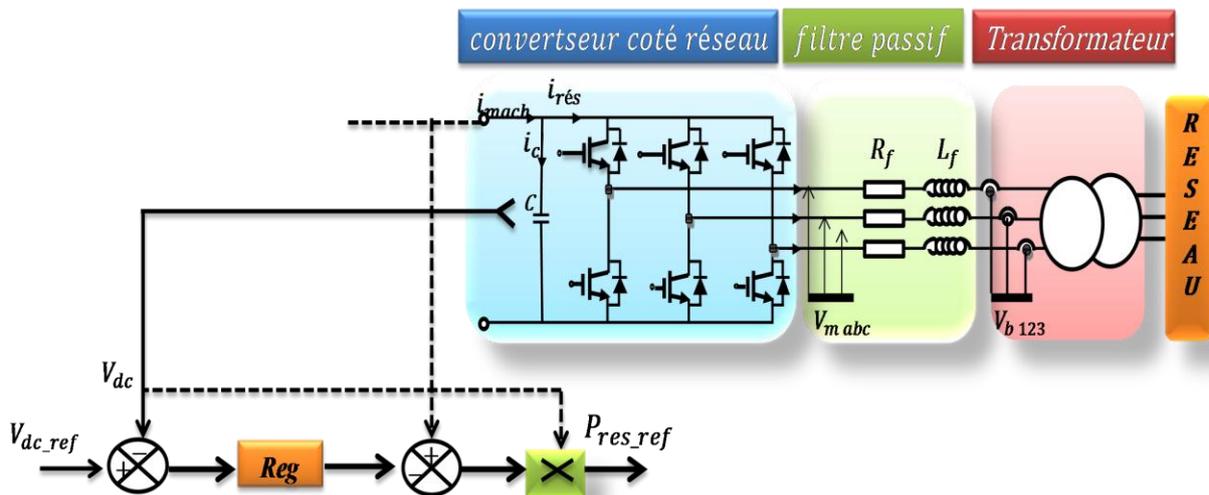


Figure IV.9 : Schéma bloc de régulation du bus continu.

Ainsi, la régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif du condensateur. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation externe, permettant de maintenir une tension constante quelque soit le sens de transit de la puissance statorique (BC) [MET 09].

IV.3.5 Contrôle des courants cote réseau

Les puissances active et réactive transitées au réseau à travers le filtre sont données par :

$$P_{ref} = V_{resd}I_{fd} + V_{resq}I_{fq} \quad (IV.27)$$

$$Q_{ref} = V_{resq}I_{fd} + V_{resd}I_{fq}$$

Par inversion de ces relations, il est alors possible d'imposer des références pour la puissance active P_{ref} et la puissance réactive Q_{ref} en imposant les courants de références suivants [MET 09].

$$I_{fd_ref} = \frac{P_{ref}.V_{resd} + Q_{ref}.V_{resq}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2} \quad (IV.28)$$

$$I_{fq_ref} = \frac{P_{ref}.V_{resq} - Q_{ref}.V_{resd}}{V_{resd}^2 + V_{resq}^2}$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu et la composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée. Le système de commande doit permettre de maintenir constante la tension du bus continu, et d'obtenir des courants sinusoïdaux à la sortie du filtre d'amplitude et de fréquence identiques à celles du réseau.

À partir du modèle du filtre établi dans le paragraphe IV.3.3, nous pouvons déduire le schéma bloc suivant.

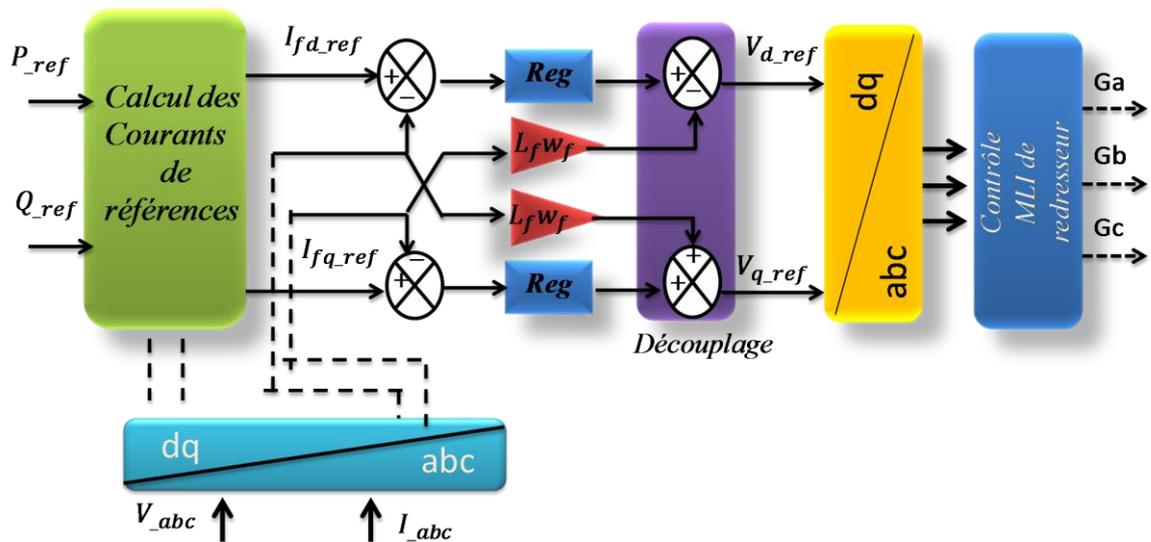


Figure IV.10 : schéma fonctionnel de régulateur du courant coté réseau

Le convertisseur coté réseau sera alors commandé par deux grandeurs, la puissance active et la puissance réactive. La puissance réactive de référence sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire, et la puissance active sera estimée à partir de la valeur de référence de la tension du bus continu.

IV.4 PERFORMANCES DE LA CHAÎNE COMPLETE

Nous allons maintenant pouvoir assembler les différents modèles développés précédemment afin d'obtenir le système de conversion d'énergie éolienne présenté à la Figure IV.11. Notre but est de modéliser puis simuler une éolienne avec une machine asynchrone à double alimentation et commande indépendante des puissances actives et réactives, avec une hélice à commande de pas et contrôle optimal pour un rendement maximum de la conversion du vent en électricité.

Cette partie consiste à placer la MADASB dans des conditions de fonctionnement les plus proches possible d'un système éolien. Le schéma synoptique global de la simulation réalisée est présenté sur la figure (IV.11) D'où la puissance débitée par le générateur éolien est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

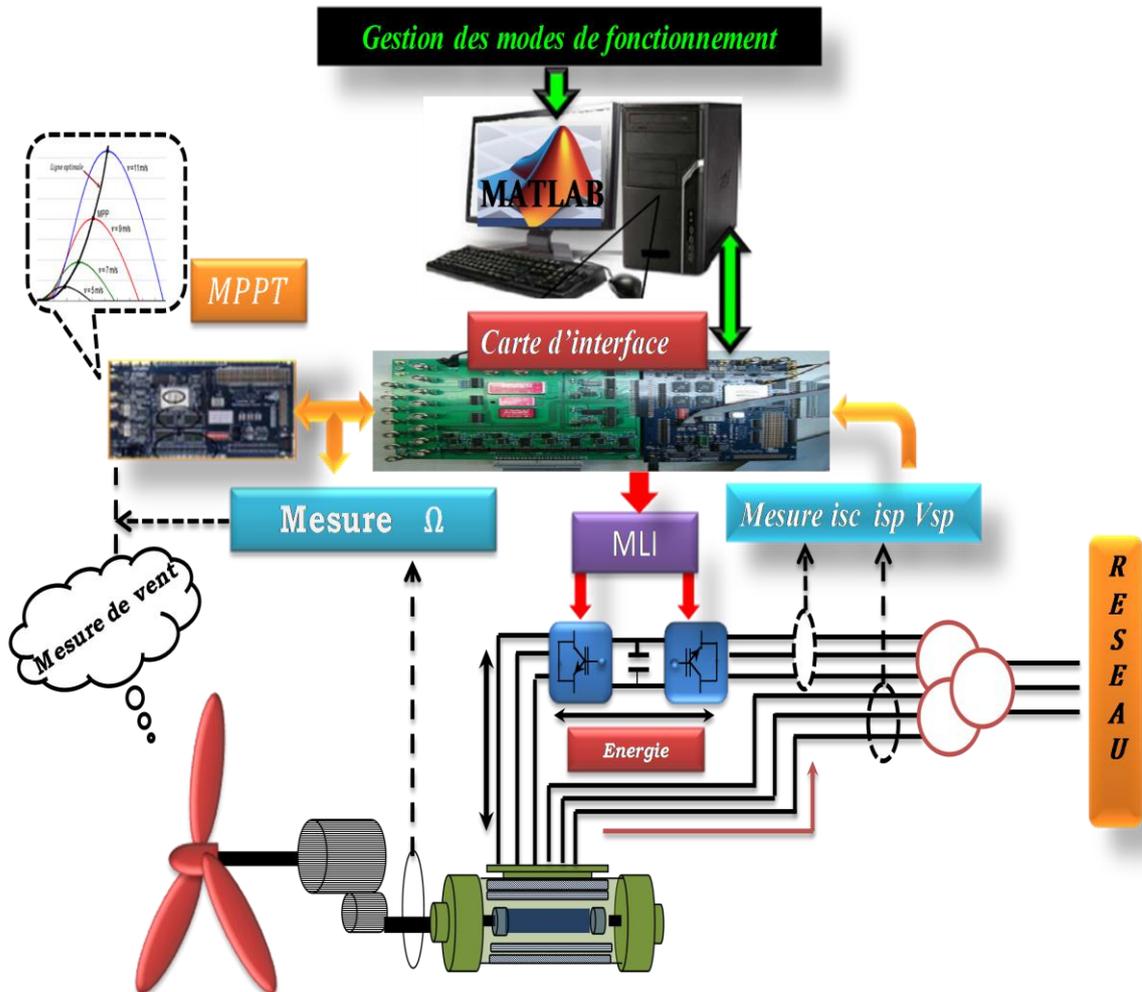


Figure IV.11 : schéma structurel du système éolien global

IV.4.1 Résultats de simulation du système complet

Le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a une valeur moyenne de (10m/s). Le coefficient de puissance est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta = 2^\circ$), qui nous donne un $\lambda_{opt} = 9.14$. On remarque que le Coefficient C_p atteint une valeur moyenne de 0,49, on cherche à le garder au maximum possible dont le but de maximiser la production. Il varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

Les différents résultats de simulation du comportement du système global sous MATLAB SIMULINK sont donnés par les figures ci-dessous, les principaux paramètres du système sont résumés dans les tableaux (Annexe D).

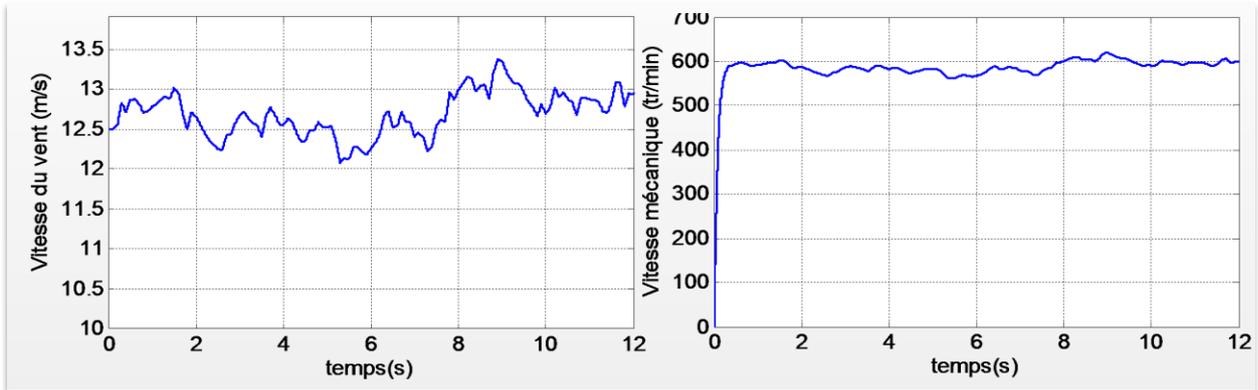


Figure IV.12 : Vitesse du vent

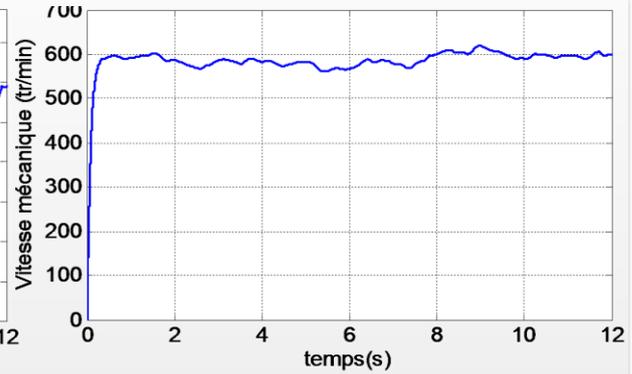


Figure IV.13 : Vitesse mécanique de la BDFIG

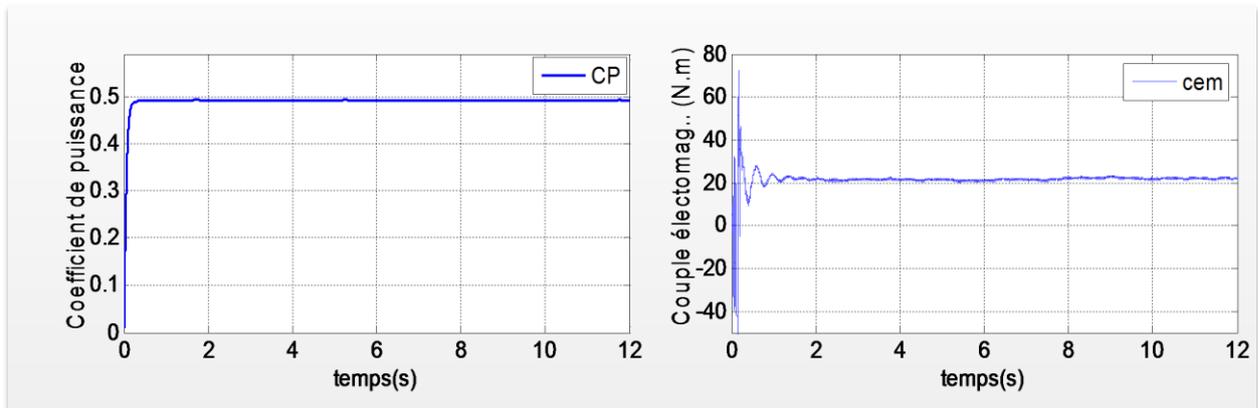


Figure IV.14 : Coefficient de puissance de la turbine éolienne

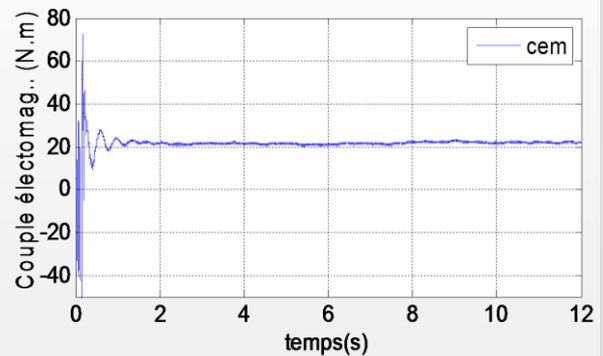


Figure IV.15 : Couple électromagnétique de la BDFIG

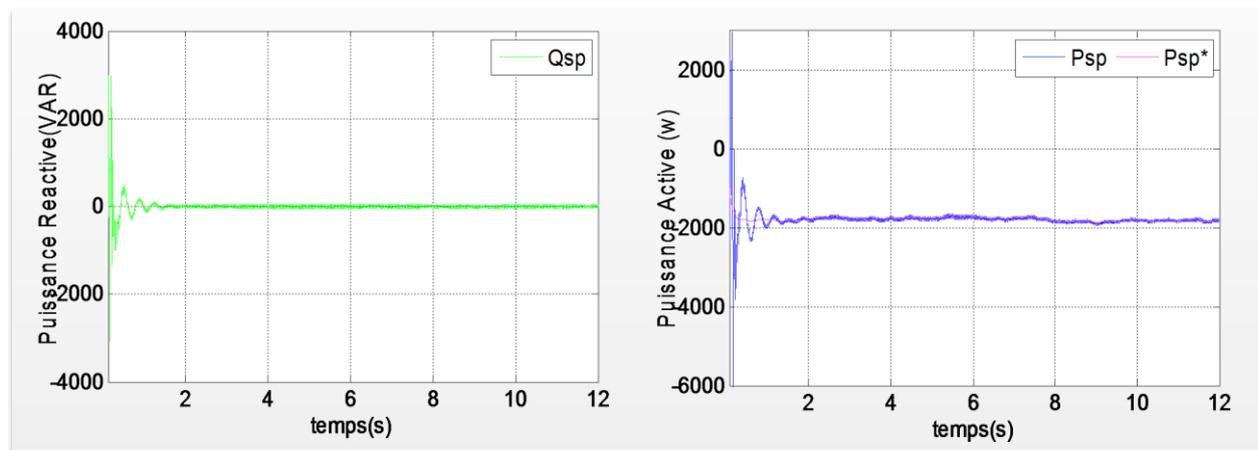


Figure IV.16 : Suivi de consigne de la Puissance réactive de la BDFIG

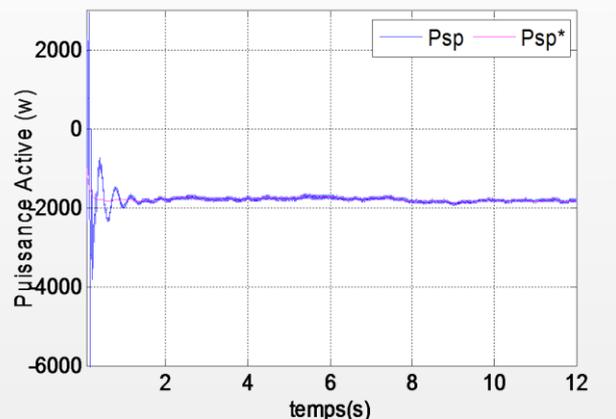


Figure IV.17 : Suivi de consigne de la Puissance active de la BDFIG

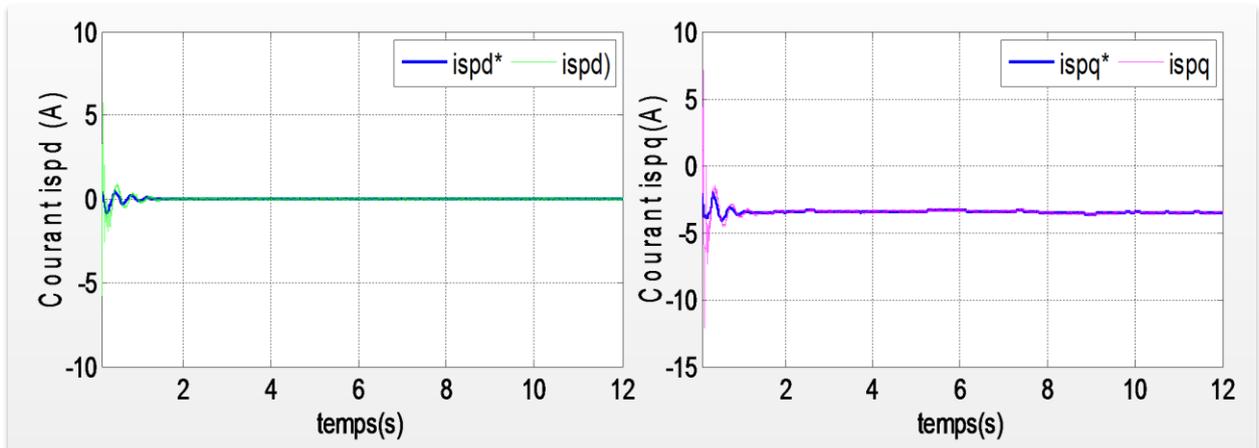


Figure IV.18 (A) : Suivi de consigne du Courant statorique(BP) selon l'axe d

Figure IV.18 (B) : Suivi de consigne du Courant statorique(BP) selon l'axe q

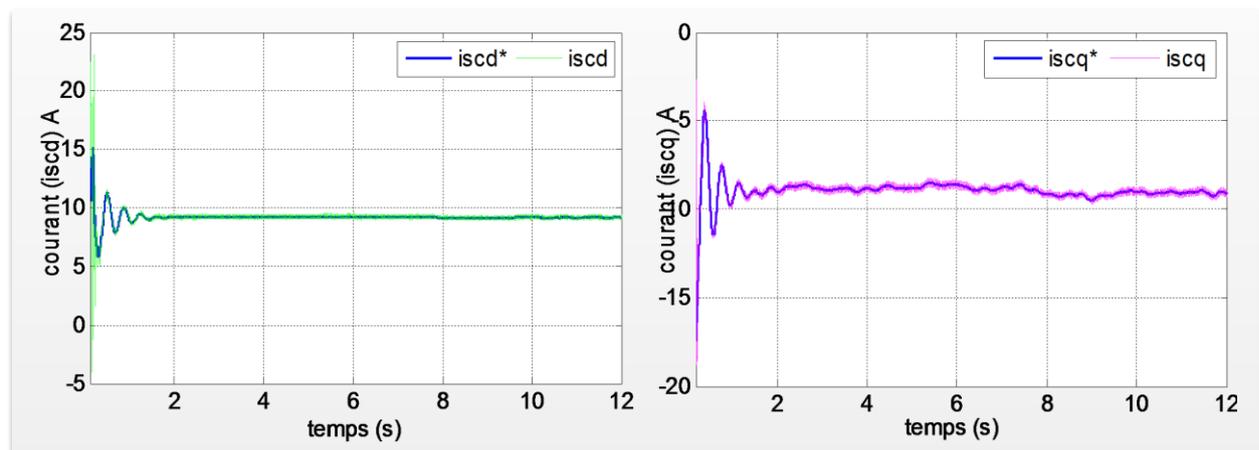


Figure IV.19 (A) : Suivi de consigne du Courant statorique(BC) selon l'axe d

Figure IV.19 (B) : Suivi de consigne du Courant statorique(BC) selon l'axe q

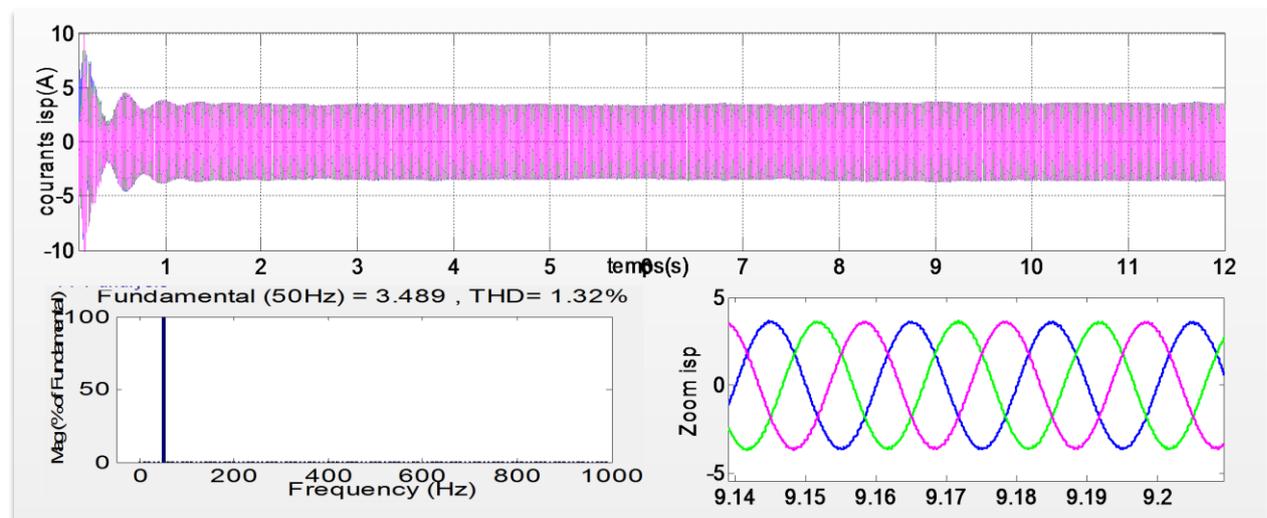


Figure IV.20 : Courant statorique du bobinage de puissance avec zoom et indication ou (THD)

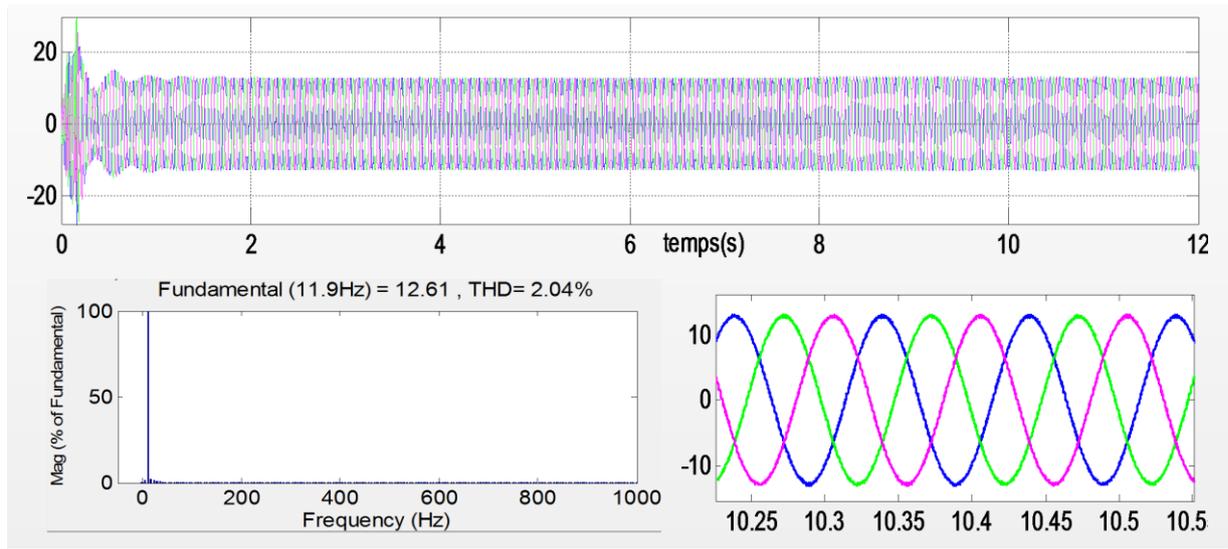


Figure IV.21: Courant statorique du bobinage de commande avec zoom et indication ou (THD)

Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique délivrée au réseau est adaptée à la variation de la vitesse de la MADASB, et ce dernier est adapté à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

On constate aussi que les résultats de simulation montrent une bonne poursuite de consigne pour les courants statorique (BP et BC) et montre que le spectre harmonique des courants sont acceptables. Les consignes de puissance sont bien suivies par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive qui est maintenue nulle. La fréquence statorique de la machine (bobinage de commande) dépend de la vitesse de rotation de l'éolienne.

Les résultats obtenus par la simulation de l'ensemble Turbine -MADASB-Convertisseurs confirment le bon fonctionnement de la chaîne et de son système de commande.

IV.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons examiné, dans une première partie, l'efficacité du contrôle de l'association de tous les composants de la chaîne éolienne étudiés séparément dans les chapitres précédents.

Ces différents résultats sont donnés pour un fonctionnement générateur hypo- synchrone et nous avons obtenu un bon suivi de toutes les grandeurs de références, et les spectres harmoniques des courants sont acceptables.

Ainsi, nous avons constaté que la MADASB est capable d'assurer, par son fonctionnement à vitesse variable, un rendement proche de celui du maximum théorique.

Ceci a été observé à travers l'évolution du coefficient de puissance en fonction du temps.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. L'objectif de notre travail était de faire l'exploration des possibilités d'introduction de la MADASB dans des applications éoliennes. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, la modélisation et la commande.

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de conversion d'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente 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. Tout cela a été conçu autour d'une MADASB.

Le premier chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite on a présenté les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien.

On a conclu que la machine asynchrone à double alimentation sans balais regroupe les avantages de la machine asynchrone à cage et de la machine asynchrone à double alimentation ; de même qu'elle présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'elle autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine.

Le deuxième chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne. La première, qui représente la partie mécanique contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre. Nous avons ensuite établi les modèles de ces derniers. Et après nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnant en génératrice. En le basant sur quelques hypothèses

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVE

simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de le simplifier. Et après nous avons exploité le modèle précédent de la MADA pour la modélisation de la cascade de deux MADA, Ainsi, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation sans balais. Les résultats de simulation de la MADA, la MADAC et la MADASB ont été présentés et discutés. Dans la dernière partie, nous avons présenté le modèle de l'onduleur et son principe de fonctionnement, de même que la technique de commande MLI.

Pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADASB. Pour cela, le troisième chapitre était réservé au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADASB à flux statorique orienté. Dans cette partie, nous avons présenté une étude théorique dans laquelle nous avons exprimé les puissances active et réactive statoriques (BP) en fonction des tensions du deuxième stator (BC) afin d'envisager un pilotage de la machine par le stator (bobinage de commande). Le bon suivi des consignes pour les deux puissances active et réactive statoriques par les puissances réelles débitées par le stator de la machine a montré l'efficacité de la commande appliquée a priori la stratégie de régulation en MLI par un onduleur à deux niveaux.

Le quatrième chapitre est une synthèse des trois premiers chapitres. Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié les performances de tout le système éolien en utilisant les techniques de contrôle retenues pour chaque partie du système. Pour faciliter l'intégration au réseau du système éolien, la possibilité de participation au service système a été ensuite détaillée. A la fin de ce chapitre on a présenté les résultats de simulation dans le cas de l'association de la *Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais* à un système de conversion d'énergie et d'un convertisseur statorique. Ce dernier a permis d'effectuer une simulation dans des conditions proches de celles d'un système éolien réel. La simulation a bien montré le soutien que peut donner l'éolienne pour la stabilité du réseau en tension et en fréquence.

Perspective

Le transfert direct entre les systèmes éoliens qui utilisent la machine asynchrone à rotor bobiné (MADA) vers la machine asynchrone à double alimentation sans balais MADASB, fait que la MADASB est un axe de recherche assez motivant pour les fabricants de systèmes éoliens qui actuellement utilisent la MADA

Les travaux futurs doivent se diriger vers :

- ✚ Le développement d'autres algorithmes permettant la maximisation de la puissance capter sans recours au coefficient de puissance, qui s'avère très difficile à obtenir, tel que la logique flux, les réseaux de neurones... etc.
- ✚ l'étude approfondie sur la modélisation de la MADAB en tenant compte des pertes de fer et des phénomènes de saturation magnétique.
- ✚ L'étude et l'application d'autres convertisseurs de niveaux supérieurs pour la minimisation des harmoniques renvoyés au réseau.
- ✚ L'intégration éventuelle d'un système de stockage d'énergie pour le lissage de la puissance fournie au réseau.
- ✚ L'étude du comportement de l'éolienne face aux éventuels défauts sur le réseau électrique pour assurer la continuité du service.
- ✚ l'étude des commandes robustes, telles que : la logique floue, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, la commande adaptative, commande par la méthode du buckettepping, le feedback linearization... etc.

Tout ceci montre que la thématique de la génération d'énergie électrique de l'éolienne est ouverte et offre de nombreux sujets de recherche pour l'avenir, aussi bien pour la conception de machine, que pour leur modélisation ou leur commande.

Bibliographie

- [ABD 97] *R. Abdessemed, M. Kadjoudj, 'Modélisation des machines électriques, Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997*
- [ABD 08] *L. Abdelhamid « Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens » mémoire de magister, Université de Batna, 2008.*
- [ADA 07] *M. Adamowicz, R.Strzelecki and D. Wojciechowski “ Steady State Analysis of Twin Stator Cascaded Doubly Fed Induction Generator” CPE 2007. P 5.*
- [ADA 08] *M. Adamowicz and R. Strzelecki “Cascaded Doubly Fed Induction Generator for Mini and Micro Power Plants Connected to Grid” EPE-PEMC, 2008, p 1729-1733.*
- [ADA 09] *M. Adamowicz and R. Strzelecki “Cascaded Doubly Fed Induction Generator with a Back-to-Back Converter Connected to a Small Distributed Generation System”EVER MONACO, MAR 2009*
- [BEL 07] *CH. BELFEDAL « Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne étude et expérimentation » Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2007*
- [BIA 07] *F.D. BIANCHI, H. De BATTISTA, R.J. MANTZ « Wind turbine control systemsprinciples, Modeling and Gain Scheduling Design », Springer 2007*
- [BOL 06] *I. BOLDEA. « Variable speed generators ».Taylor & Francis 2006.*
- [BON.09] *J.bonal .G seguier "entraînement électrique a vitesse variable, rappels D'électrotechniques de puissance et D'automatisme les variateurs électronique devitesse", volume 2, édition technique et documentation Paris 1998.*
- [BOY 06] *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.*
- [CAM 03] *H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat, ÉNSAM France, 2003*
- [DEM 12] *DEMBRI Rafik «Modélisation et Commande d'un SystèmeEolien Connecté au Réseau ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2012.*

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [DOU 10] T.DOUADI « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone » mémoire de Magister, Université de BATNA, 2010.
- [ELA 04] S. EL AIMANI « Modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension » Thèse de doctorat, Université De Lille, 2004.
- [FOR D3] H.FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "Onduleurs de tension : Structures, Principes et Applications", Techniques de l'ingénieur, D 3 176
- [GAI 10] A.GAILLARD. «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service ». Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2010
- [GAS 11] GASSAB Samir «Modélisation d'une centrale a énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2011.
- [GRE 97] G. Grellet et Gclerc "actionneurs électriques : principes, modèles, commande deuxième tirage édition eyrolles, paris, France ,1997.
- [HAM 03] L. HAMANE »les ressources éoliennes de l'Algérie » Bul. Ene. Ren, CDER, N°3, juin 2003. P 10-11.
- [HEI 98] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998
- [HOP 00] 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.
- [HOP 01] B.Hopfensperger, D.J.Atkinson and R.A.Lakin "Combined magnetising flux oriented control of the cascaded doubly-fed induction machine" IEE Proc, ElecAppl, Vol. 148, No, 4 July 2001, p 354-362.
- [HOP-01] B. Hopfensperger, D.J. Atkinson, "Doubly-fed a.c. machines : classifications and comparaison", EPE conference 2001-Gratz, DS 3.4-2.
- [JOU 07] M. JOURIEH »Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien » Thèse de doctorat, ENSAM de France, 2007.
- [JAL 09] F. Jallali and A. Masmoudi "Investigation of the Transient Behavior of Brushless Cascaded Doubly Fed Machines" EVER MONACO, Mar 2009, p 6.

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [KAS 08] N. KasbadjiMerzouk « *Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?*, » *Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7*
- [KHO 06] S. KHOJET EL KHIL « *Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)* » *Thèse de Doctorat, INPT de France et ENI de Tunis, 2006.*
- [LAV 05] N. LAVERDURE « *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires* » *Thèses de Doctorat, ENS de Cachan, 2005.*
- [LI 01] Q. Li and Z. P. Pan "the modeling and simulation of brushless doubly fed generator of wind power generation system" *IEEE. Pow. Elec. Driv. Sys. Vol.2, 2001. P 811-814*
- [LOP 06] 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.*
- [MET 09] S. METATLA. « *Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA* ». *Mémoire de magister en électrotechnique, ENSP, 2009.*
- [MIR 05] A. MIRECKI « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* » *Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.*
- [MON 05] Mons, L. *Les enjeux de l'énergie, Larousse, France. (2005).*
- [MUK 99] Mukund R. patel « *Wind and Solar power system* », *CRC Press LLC 1999.*
- [MUL.D3] B.MULTON, X.ROBOAM, B.DAKYO, C.NICHITA, O.GERGAUD et H.BEN BEN AHMED « *Aérogénérateurs électriques. Technique de l'ingénieur[D3 960]*.
- [MUN 08] I. MUNTEANU, A. I. BRATCU, N.A CUTULULIS, E. CEANGĂ. « *Optimal control of wind energy systems* ». *Springer 2008.*
- [MUY 09] S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA. « *Stability augmentation of a grid-connected wind farm* ». *Springer 2009.*
- [NIC 02] C. NICHITA, D. LUCA, B. DAKYO, E. CEANGA. « *Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators* ». *IEEE transactions on energy conversion, vol. 17, no. 4, pp 523- 529, December 2002.*
- [PAT 05] N. Patin, E. Monmasson and J.P. Louis « *Analysis and control of a cascaded doubly-fed induction generator* », *IECON, 2005, P 2487-2492.*
- [PAT 06] N. Patin « *analyse d'architecture, modélisation et commande de générateurs pour réseaux autonomes et puissants* » *These de doctorat, Uiv Cachan. 2006.*

BIBLIOGRAPHIE & WEBOGRAPHIE

- [PAT 09] *N. Patin, E. Monmasson and J.P. Louis "Modeling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids" IEEE TraIndEle, Vol. 56, No. 10, Oct 2009. P 4207-4219*
- [POI 03] *F. PITIERS »Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003.*
- [POZ 03] *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.*
- [POZ 06] *J. Poza, E. Oyarbide, D. Roye and M. Rodriguez "Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine" IEE Proc. Elec. Powe. Appl, Vol. 153, No. Sem 2006. P 726-734.*
- [PRO 09] *K. Protsenko and D. Xu "Modeling and Control of Brushless Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Applications" IEEE Tra, Pow, Ele, Vol, 23, No. 3, May 2008, p 1191-1197*
- [RAP 10] *M. Rapin, Énergie éolienne - Principes. Études de cas, Dunod, 2010 .*
- [RUN 06] *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.*
- [TIR 10] *TIR Zoheir «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2010.*
- [VID 04] *P.E. VIDAL « Commande non linéaire d'une machine asynchrone a double alimentation » Thèse de doctorat, INP de TOULOUSE, 2004.*
- [ZHO-97] *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.*

Webographie

- [WWW 01] : <http://www.energienouvelable.org>
- [WWW 02] : <http://www.windustry.fr/node/259>: « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2011 »,
- [WWW 03] : <http://www.gwec.net.01/2010/>

N.B : Les références ci-dessus, ont été consultées avant MARS 2012.

Annexe 'A'

Puissance captée du vent et limite de Betz

A.1)- Relation entre la puissance et la vitesse du vent

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent dans un rotor composé de deux ou plusieurs pales mécaniquement couplé à un générateur électrique. La turbine est montée sur une tour haute afin d'améliorer le captage de l'énergie. L'énergie cinétique de l'air de masse «*m*» en mouvement avec une vitesse «*V*» est donnée par la formule :

$$\text{Energie cinétique} = \frac{1}{2} m V^2 \text{ (J) } \dots \dots \dots \text{(A. 1)}$$

La puissance de l'air en mouvement est le débit d'énergie cinétique par seconde, par conséquent:

$$\text{Puissance} = \frac{1}{2} (\text{debit de masse par seconde}) V^2 \text{ (W) } \dots \dots \dots \text{(A. 2)}$$

Si nous posons

- ✚ *P* : puissance mécanique de l'air en mouvement
- ✚ *ρ* : Densité de l'air, « kg/m³ »
- ✚ *A* : Surface balayée par les pales du rotor, « m² »
- ✚ *V* : Vitesse de l'air, « m/s »

Le débit volumétrique est « *V · ρ* », le débit massique de l'air en kilogrammes par seconde est « *ρ · A · V* », la puissance est régit par la relation suivante:

$$P = \frac{1}{2} (\rho A V). V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \text{ (W) } \dots \dots \dots \text{(A. 3)}$$

L'équation (A. 3) calcule la puissance du vent en amont de la turbine éolienne, elle varie linéairement avec la densité de l'air de balayage des pales et avec le cube de la vitesse du vent.

Comme la vitesse du vent en aval de la voilure n'est pas nulle, nous déduisons que la puissance extraite est inférieure à celle emmagasinée en amont dans le vent (A. 3).

De ce fait, la puissance extraite est obtenue en multipliant la puissance « P » en amont de l'éolienne (la puissance stockée dans le vent avant l'interaction avec la voilure) par un coefficient inférieur à l'unité appelée : coefficient de puissance « C_p » du rotor :

$$P_{extraite} = C_p \cdot P \text{ (W) } \dots \dots \dots (A.4)$$

A.2)- Puissance maximale extraite du vent (limite de Betz)

Soit la figure (A.1) ci-dessous qui illustre une éolienne interagissant par le vent, en amont (avant l'interaction) avec une vitesse « V_1 » et en aval la vitesse est « V_2 » ($V_1 > V_2$).

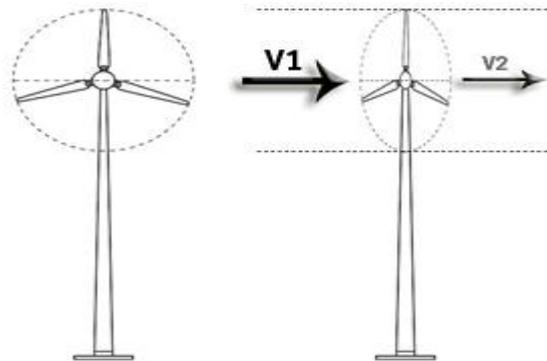


Figure A.1 : Puissance mécanique extraite du vent.

La puissance réelle extraite par les pales du rotor est la différence entre la puissance du vent en amont et en aval. Soit :

$$P_{ext} = \frac{1}{2} (\text{débit massique par seconde}) * (V_1^2 - V_2^2) \text{ Watts } \dots \dots \dots (A.5)$$

La vitesse de l'air est discontinue de « V_1 » à « V_2 » dans le plan des pales du rotor dans un sens macroscopique. Le débit massique d'air à travers les pales tournantes est donc obtenu en multipliant la densité par la vitesse moyenne. C'est-à-dire :

$$\begin{aligned} \text{Débit massique par seconde} &= \frac{1}{2} \left(\rho A \left(V_1 - \frac{V_1 - V_2}{2} \right) \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \text{ (Kg/sec) } \dots \dots \dots (A.6) \end{aligned}$$

La puissance mécanique extraite par le rotor couplé au générateur électrique est exprimée comme le présente l'équation (A.7) suivante.

$$P_{ext} = \frac{1}{2} \left(\rho A \frac{(V_1 + V_2)}{2} \right) (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} (\rho A V_1^3) \left\{ \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \right\} \dots \dots (A.7)$$

D'où le coefficient de puissance " Cp " sera :

$$Cp = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right]}{2} \text{ avec } P_{extraite} = Cp \cdot P \dots \dots \dots (A.8)$$

Pour une vitesse du vent en amont donnée, la valeur du « Cp » dépend du rapport de l'aval à l'amont des vitesses du vent qui est (V2/ V1).

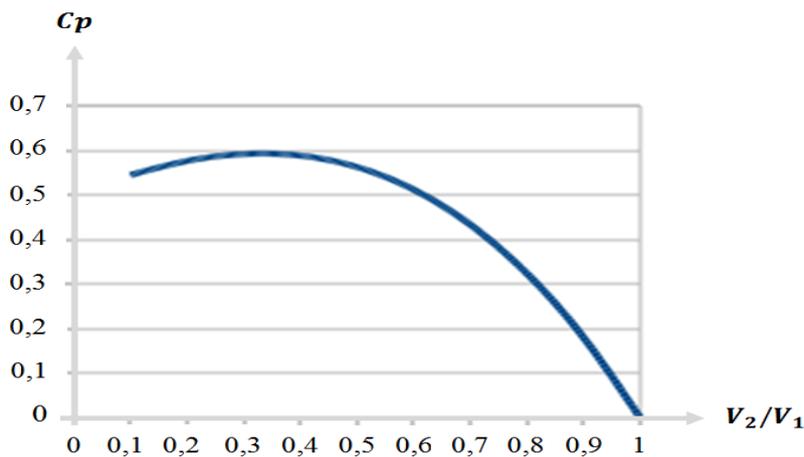


Figure A.2 : Coefficient de puissance en fonction du quotient (V2/V1).

Le tracé du coefficient de puissance en fonction de (V2/V1) montre que le « Cp » est d'une seule valeur maximale de « 0,59 » lorsque (V2/V1) est d'un tiers. La puissance maximale est extraite du vent lorsque la vitesse du vent en aval est égale à un tiers de la vitesse en amont. Sous cette condition:

$$P_{ext}^{max} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad (W) \dots \dots \dots (A.9)$$

Ce fameux coefficient « 16/27 = 0,592 » fut découvert par le physicien allemand «Albert Betz » en 1920, appelé par la suite : limite de Betz.

Annexe 'B'

Contraintes constructives

Et schéma équivalent de la MADASB

B.1)- Contraintes constructives de la MADASB

Dans la conception d'une MADASB il faut garantir un rapport précis entre le nombre de pôles des deux bobinages du stator et le nombre de spires du rotor. Il existe donc une contrainte physique que doivent respecter les machines type MADASB.

Le stator de la MADASB est formé par deux bobinages triphasés équilibrés, et le rotor a une structure à cage spéciale. Il faut remarquer que pour éviter le couplage magnétique direct non souhaité entre les deux bobinages du stator leur nombre de paires de pôles doit être différent ($P_p \neq P_c$). [POZ 03].

B.1.1)- les conditions à respecter pour garantir le couplage magnétique croisé.

Dans ce paragraphe on va définir les conditions à respecter pour garantir le couplage magnétique croisé entre les deux bobinages du stator à travers le rotor. Pour cela, on va analyser la forme de la densité de flux que crée chaque bobinage du stator dans l'entrefer.

En ignorant les harmoniques de la FMM, chaque bobinage triphasé du stator (BP, BC) créera une densité de flux dans l'entrefer avec la forme suivante [POZ 03]. :

$$b_p(\theta, t) = B_p \cos(w_p t - P_p \theta + \alpha_p) \quad (B.1)$$

$$b_c(\theta, t) = B_c \cos(w_c t - P_c \theta + \alpha_c) \quad (B.2)$$

w_p, w_c : sont les fréquences d'alimentation de chaque bobinage du stator.

α_p, α_c : sont les déphasages initiaux des valeurs maximales de densité de flux.

Si le rotor tourne à une vitesse angulaire w_r , on peut exprimer la densité de flux de l'entrefer par rapport à la référence du rotor, [POZ 03]. : $\theta = w_r t + \theta'$

$$b_p(\theta', t) = B_p \cos((w_p - P_p w_r)t - P_p \theta' + \alpha_p) \quad (B.3)$$

$$b_c(\theta', t) = B_c \cos((w_c - P_c w_r)t - P_c \theta' + \alpha_c) \quad (B.4)$$

Le couplage croisé entre les deux bobinages du stator se fonde sur l'impossibilité de dissocier les courants induits dans le rotor. De cette manière, les densités de flux (B.3) et (B.4) induisent un courant de rotor de la manière suivante, [POZ 03]. :

$$i_r^p(t) = R_e \left\{ \bar{I}_r e^{j\left(s_p w_p t - (n-1)\frac{2\pi P_p}{N_r}\right)} \right\} \quad (B.5)$$

$$i_r^c(t) = R_e \left\{ \bar{I}_r e^{j\left(s_c w_c t - (n-1)\frac{2\pi P_c}{N_r}\right)} \right\} \quad (B.6)$$

Pour que ces deux courants ne soient pas dissociés, ils doivent avoir une même distribution spatiale, ce qui conditionne la structure physique de la machine. Cette condition est remplie par (B.5) et (B.6) quand,

$$\frac{2\pi P_p}{N_r} = \frac{2\pi P_c}{N_r} + 2\pi q \quad \text{avec } q = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (B.7)$$

Calculant N_r de l'équation précédente [POZ 03]. :

$$N_r = \frac{P_p - P_c}{q} \quad (B.8)$$

Pour atteindre la valeur de N_r la plus grande possible, on choisit normalement $q=1$:

$$N_r = P_p - P_c \quad (B.9)$$

La relation (B.8) représente le rapport qui doit exister entre le nombre de pôles de chaque bobinage du stator et la quantité de spires du rotor pour garantir le couplage croisé. Cette relation assure le couplage entre les deux bobinages du stator, cependant il y a des contraintes additionnelles pour assurer le fonctionnement correct de la machine. Ainsi, pour pouvoir commander le courant du bobinage (BP) à partir du bobinage (BC), la tension induite dans (BP) (par le rotor) doit avoir la même fréquence que la tension d'alimentation de (BP). Comme la fréquence de la tension induite dans le bobinage 1 produite par le bobinage (BC) dépend de la vitesse de rotor et de la fréquence d'alimentation du bobinage (BC), on doit choisir la fréquence d'alimentation correcte du bobinage (BC) pour assurer le couplage fréquentiel adéquat entre les deux bobinages du stator. [POZ 03].

Une fréquence d'alimentation incorrecte produit deux flux de rotor tournants à fréquences de glissement différentes. Les deux flux tournants créent une force d'attraction qui fait accélérer où freiné le rotor. Si la différence entre les deux fréquences de glissement n'est pas très grande il est possible arriver à une situation d'équilibre dans laquelle on atteint une même fréquence de glissement pour les courants de rotor, en obtenant ainsi un couplage fréquentiel correcte. Dans cette situation on dit que la machine présente un mode de fonctionnement synchrone, [POZ 03].

Une représentation polaire de la machine asynchrone à double alimentation sans balais illustré dans la figure (B.1).

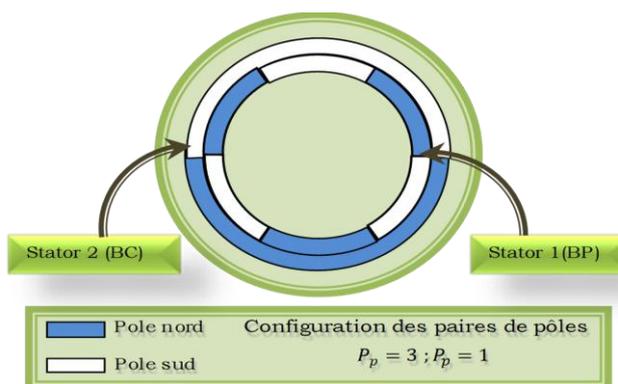


Figure B.1 représentation polaire de la MADASB [TIR 10].

B.2)- Schéma équivalent de la MADASB

Dans l'étude des machines électriques l'utilité du schéma équivalent ramené au stator est bien connue. Dans ce paragraphe on présente la forme finale des schémas équivalents de la MADASB ramenés au stator (BP).

La figure. (B.2) montre le schéma équivalent en régime permanent de la MADASB en alimentant les deux stators (BP et BC).

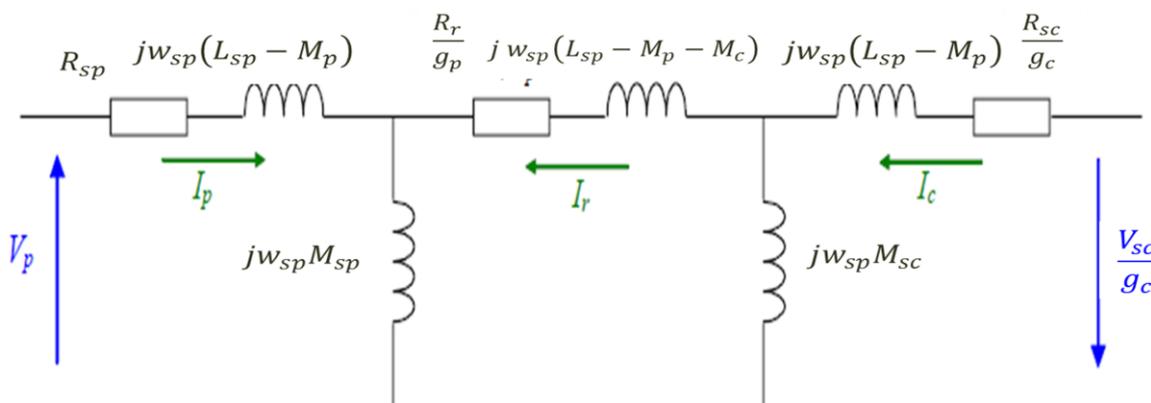


Figure B.2 Schéma équivalent de la MADASB référé au stator(BP)

D'après le schéma ci-dessus, on conclut que le schéma équivalent de la MADASB est très similaire à celui de la machine asynchrone à bagues. Dans ce dernier on a une maille additionnelle puisqu'on utilise un couplage magnétique de plus (stator BP-rotor-stator BC). Bien que le modèle de la MADASB soit plus compliqué, le mode de fonctionnement est identique à celui de la machine asynchrone à bagues. Au lieu d'alimenter les bobinages du rotor, dans le cas de la MADASB on alimentera un bobinage additionnel du stator (Bobinage de Commande).

Annexe 'C'

Calcul et synthèse des correcteurs

C.1)- Schéma bloc d'un système asservi

La stratégie de commande adoptée utilise un régulateurs proportionnel intégral « PI ». C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité-performance. La figure C.1 montre un système en boucle fermé corrigé par un régulateur PI.

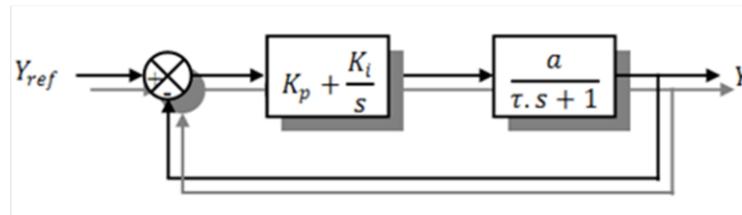


Figure C.1 : Système régulé par un correcteur proportionnel intégral.

- ✓ « $Kp + \frac{Ki}{S}$ » : la fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral.
- ✓ « $\frac{a}{\tau S + 1}$ » : la fonction de transfère du système à régulier.
- ✓ « τ » : la constante de temps du système avant la régulation.

• La fonction de transfert en boucle ouverte :

$$F_{BO}(S) = \left(\frac{Ki + Kp \cdot S}{S} \right) \left(\frac{1}{f + JS} \right) = \frac{Ki}{f} \left(\frac{1 + \left(\frac{Kp}{Ki} \right) \cdot S}{S} \right) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{J}{f} \right) \cdot S} \right) \dots \dots \dots (C.1)$$

• La fonction de transfert en boucle fermée :

$$F_{BF}(S) = \frac{F_{BO}(S)}{1 + F_{BO}(S)} \dots \dots \dots (C.2)$$

C.2)- Calcul des paramètres du régulateur « PI »

La régulation d'un système physique régit par une fonction de transfert, consiste à stabiliser et d'améliorer sa réaction par rapport à la commande utilisée, il suffit que la fonction de transfert du système asservis (système + régulateur) doit répondre à quelque performance :

- Constante de temps « τ » dans le cas d'un système régulé de premier ordre.
- Temps de réponse « tr » et dépassement « D » dans un système de deuxième ordre.

C.2.a)- Système régulé régité par une « FT » du premier ordre

La fonction de transfert en boucle ouverte du système régulé est donnée par l'équation (B. 1), en posant « $\frac{Kp}{Ki} = \frac{J}{f}$ », la fonction de transfert en boucle ouverte et fermer seront :

$$\begin{cases} F_{BO}(S) = \left(\frac{Ki + Kp.S}{S}\right) \left(\frac{1}{f + JS}\right) = \frac{Ki}{f.S} \\ F_{BF}(S) = \frac{\frac{Ki}{f.S}}{1 + \frac{Ki}{f.S}} = \frac{Ki}{f.S + Ki} = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{Ki}\right).S} \end{cases} \dots\dots\dots (C.3)$$

La constante de temps est : $\tau = \frac{f}{Ki}$, supposons que le temps de réponse « t_r » sera égale à « $t_r = 3 \cdot \frac{f}{Ki}$ », les gains du régulateur « PI » pour un temps de réponse donné seront calculés comme suit :

$$\begin{cases} t_r = 3 \cdot \frac{f}{Ki} \Rightarrow Ki = \frac{3 \cdot f}{t_r} \\ \frac{Kp}{Ki} = \frac{J}{f} \Rightarrow Kp = \frac{3 \cdot J}{t_r} \end{cases} \dots\dots\dots (C.4)$$

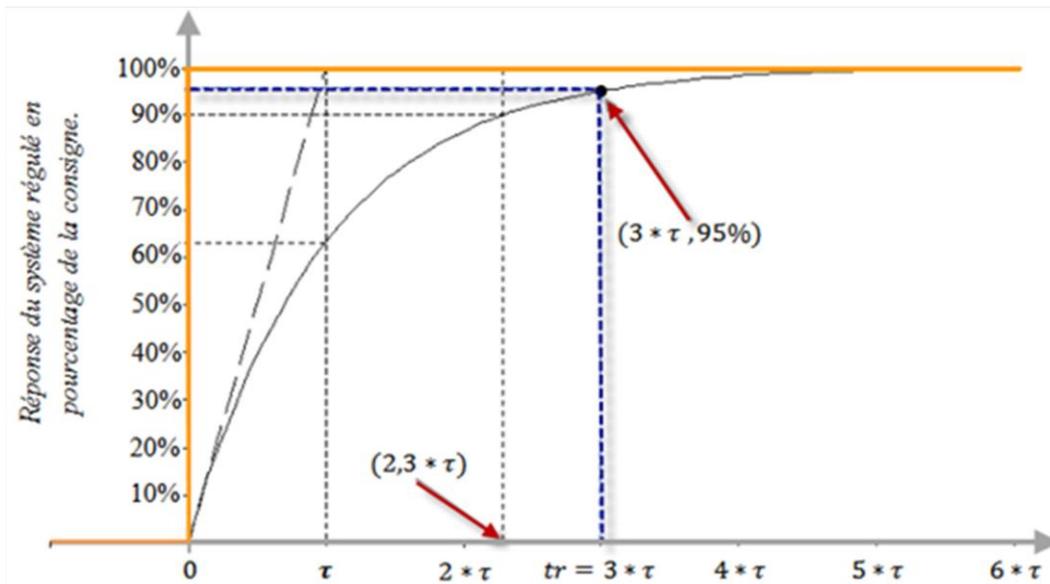


Figure C.2 : Réponse d'un système régulé de premier ordre.

« Cette méthode est dite : méthode de compensation de pôle (on compense le pôle du système avec le zéro du correcteur), facile à calculer sauf que le système final sera du premier ordre, moins de performance en le comparant avec un autre de deuxième ordre»

C.2.b)- Système régulé régité par une « FT » du deuxième ordre

Dans le cas d'un système régulé régité par une « FT » du deuxième ordre, d'autres performances sont ajoutées telles que : le temps de montée, dépassement, pulsation propre ou pseudo période, temps de réponse réduit etc.

Les paramètres du régulateur « Kp et Ki » seront en fonction de deux grandeurs :

- ✓ Coefficient d'amortissement : « ξ »
- ✓ Pulsation propre non amortie : « ω_n » ou bien « ω_0 »

Calculons la « FTBO » et la « FTBF » sans compensation :

$$\left\{ \begin{aligned} F_{BO}(S) &= \left(\frac{Ki + Kp.S}{S} \right) \left(\frac{1}{f + JS} \right) = \frac{Ki + Kp.S}{f.S + J.S^2} \\ F_{BF}(S) &= \frac{\frac{Ki+Kp.S}{f.S+J.S^2}}{1 + \frac{Ki+Kp.S}{f.S+J.S^2}} = \frac{Ki + Kp.S}{f.S + J.S^2 + Ki + Kp.S} = \frac{Ki + Kp.S}{J.S^2 + (f + Kp).S + Ki} \end{aligned} \right. \dots \dots (C.3)$$

$$F_{BF}(S) = \frac{Ki + Kp.S}{J.S^2 + (f + Kp).S + Ki} = \frac{\frac{Ki+Kp.S}{J}}{S^2 + \frac{(f+Kp)}{J}.S + \frac{Ki}{J}}$$

La fonction de transfert est alors identifiée à une fonction du second ordre sans zéro :

$$F_{BF}(S) = \frac{a}{S^2 + (2.\xi.\omega_n).S + \omega_n^2} \dots \dots (C.4)$$

L'identification des gains du régulateur est obtenue en comparant les deux dénominateurs, d'où les paramètres du correcteur « PI » seront :

$$\left\{ \begin{aligned} 2.\xi.\omega_n &= \frac{(f + Kp)}{J} \\ \omega_n^2 &= \frac{Ki}{J} \end{aligned} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} Kp &= 2.\xi.\omega_n.J - f \\ Ki &= J.\omega_n^2 \end{aligned} \right. \dots \dots (C.5)$$

En choisissant minutieusement la valeur du coefficient d'amortissement « ξ » et la pulsation propre « ω_n » (« ξ » et « ω_n » doivent être adaptés au système ; temps de réponse, dépassement, courant, inertie etc.), les paramètres du régulateurs seront définis immédiatement.

Annexe 'D'

Paramètre utilisés dans le système

D.1) Paramètres de la turbine[TIR10].

Paramètres	Valeur numérique
Densité d'air « ρ »	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$
Rayon des pâles « R »	$R = 2 \text{ m}$
Inertie « J »	$J = 315 \text{ kg/m}^2$
Coefficient du frottement visqueux « f »	$f = 0.01 \text{ kg.m/rd}$
Coefficient de puissance optimal	$C_{p-opt} = 0.49$
Vitesse réduite optimale	$\lambda_{opt} = 9.14$
Gain du multiplicateur de vitesse G	$G = 15$
Vitesse du vent nominale v_n	$v_n = 08$
Vitesse du vent de démarrage v_{nin}	$v_{nin} = 03$
Vitesse du vent de l'arrêt v_{max}	$v_{max} = 25$

D.2) Paramètres de Redresseur[DAM12].

Résistance R_f	0.1Ω
Inductance L_f	20 mH
Capacité C	2200 uF
Fréquence de coupure F_c	10 kHz

D.3) Paramètres Des Régulateurs (PI)

	Puissances P_{sp}, Q_{sp} de la MADASB	Courants i_{spd}, i_{spq} de la MADASB	Courants i_{scd}, i_{scq} de la MADASB	Puissances Convertisseur	Courants Convertisseur
k_p	0.0012	60	10.88	$8,1453 \cdot 10^{-4}$	125.6637
k_i	0.0162	900.9	4.195810^3	0.01	628.3185

D.4) Paramètres de la Cascade d deux MADA (MADAC) ,TIR10].

<i>Paramètres</i>	<i>MADA n°01</i>	<i>MADA n°02</i>
<i>Puissance nominale</i>	4.5 kW	
<i>Tension simple et complexe</i>	220/380V	
<i>Fréquence</i>	50 Hz	
<i>Nombre de paire de pole</i>	2	
<i>Vitesse nominale</i>	740 rpm	
<i>Résistance statorique</i>	1.583 Ω	
<i>Résistance rotorique</i>	0.1917 Ω	
<i>Inductance cyclique statorique</i>	0.3108mH	
<i>Inductance cyclique rotorique (mH)</i>	0.01823mH	
<i>Mutuelle de Park (mH)</i>	0.07198 mH	
<i>Moment d'inertie (Kg.m²)</i>	0.2 Kg.m ²	
<i>Coefficient du frottement</i>	0.001N.ms/rd	

D.5) Paramètres de la MADASB (BDFIG),[POZ 03].

<i>Paramètres</i>	<i>MADASB (BDFIG)</i>
<i>Puissance nominale</i>	2.5 kW
<i>Tension simple et complexe</i>	220/380V
<i>Vitesse synchronismenominale</i>	750 rpm
<i>Fréquence</i>	50 Hz
<i>Nombre de pair de pole p_p / p_c</i>	3 / 1
<i>Résistance statorique R_{sp} / R_{sc}</i>	1.732/ 1.079 Ω
<i>Résistance rotorique</i>	0.473 Ω
<i>Inductance cyclique statorique L_{sp} / L_{sc}</i>	714.8/ 121.7mH
<i>Inductance cyclique rotorique</i>	132.6mH
<i>Mutuelle de Park M_p / M_c</i>	242.1/ 59.8mH
<i>Moment d'inertie (Kg.m²)</i>	0.53 Kg.m ²
<i>Coefficient du frottement</i>	0.0036N.ms/rd

الهدف الأساسي من هذه المذكرة هو ترميط نظام جديد لتحويل الطاقة الهوائية إلى طاقة كهربائية وذلك بعد إدراجه في الشبكة الكهربائية، هذا النظام الجديد يعتمد على مولدة لا تزامنية ذات التغذية المزدوجة على مستوى الساكن وذلك بغية التخلص من التماس الإنزلاقي الكهربائي كالذي نجده في الآلات اللا تزامنية ذات التغذية المزدوجة التقليدية. وبذلك بغية التحصل على مولدة لا تزامنية ذات التغذية المزدوجة على مستوى الساكن بأقل صيانة من تلك الأخيرة، إذا قمنا باستعمال تقنية التحكم الشعاعي في الطاقة الكهربائية المنتجة من طرف المولدة، وهذه التقنية ستنجح لنا التحكم في الطاقتين الفعالة والردية كل على حدا بواسطة موج التوتتر وباستعمال المعدل التناسبي التكاملي. وهذا كله أعدناه بواسطة برنامج المحاكاة المتلاب.

كلمات مفتاحية:

الطاقات المتجددة، الطاقة الهوائية، مولدة لا تزامنية ذات التغذية المزدوجة على مستوى الساكن، تتبع نقطة الاستطاعة الأعظمية التحكم الشعاعي في الطاقة المنتجة

Abstract

The main goal of the research carried out in this thesis is the modelling of wind turbines integrated into Medium voltage electrical networks. The considered technology is based on brushless doubly fed induction generator (BDFIG). The system employs to eliminate the brushes and copper rings in the traditional DFIG. In this case, brushless doubly fed induction generators require lower maintenance. The control strategy for flexible power flow control is developed. The independent control of the active and reactive power flows is achieved by means of inverter, well attended a linear regulating by regulators PI. We are used the MATLAB software for a simulation of BDFIG investigation.

Keywords:

Wind energy conversion system, brushless doubly fed induction generator, Variable speed generator, MPPT, Vector control.

Résumé

Le but principal de ce mémoire est la modélisation d'un nouveau système de conversion d'énergie éolienne connecté à un réseau électrique de puissance infinie. Ce nouveau système est basé sur la machine asynchrone à double alimentation sans balais, son avantage est éliminé la partie électrique glissant (les bagues balais) de la machine asynchrone à double alimentation. Ainsi, la MADASB (brushless) exige un entretien moins que la machine asynchrone à double alimentation. Nous avons développé une stratégie de commande de la puissance. Qui permet de commander indépendamment la puissance active et réactive à l'aide d'un onduleur de tension, avec un régulateur PI. Nous avons simulé le système en cascade avec leur commande dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Mots clés :

Énergie renouvelable, Énergie éolienne, Machine asynchrone à double alimentation sans balais, MPPT, commande vectorielle.