

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Généralités sur l'éolienne	5
1.2.1 Quelques chiffres	5
1.3 Enjeux de l'éolienne	7
1.3.1 Sur le plan environnemental.....	7
1.3.2 Sur le plan économique.....	7
1.4 Éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal.....	8
1.4.1 Les éoliennes à axe vertical.....	8
1.4.2 Les éoliennes à axe horizontal	9
1.5 Éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable	9
1.5.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	10
1.5.2 Les éoliennes à vitesse variable (type MADA ou PMSG).....	10
1.6 Fonctionnement de l'éolienne.....	11
1.6.1 L'énergie cinétique en énergie mécanique.....	12
1.6.2 L'accélération de la vitesse de l'arbre mécanique	12
1.6.3 L'énergie mécanique en énergie électrique.....	12
1.7 La MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation)	12
1.7.1 Composition de la MADA	12
1.7.2 Machine asynchrone.....	14
1.7.2.1 La machine asynchrone à cage d'écureuil.....	15
1.7.2.2 La machine asynchrone à rotor bobiné.....	17
1.7.3 Mode de fonctionnement.....	18
1.7.4 Convertisseurs de puissances	21
1.7.5 Méthode de contrôle des convertisseurs	23
1.7.5.1 Commande scalaire.....	23
1.7.5.2 Commande vectorielle.....	23
1.7.5.3 Commande directe	24
1.7.6 Pollution du réseau et conséquences	24
1.8 Conclusion	25
CHAPITRE 2 ÉTUDE ET MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE	27
2.1 Introduction.....	27
2.2 Orientation des pales.....	27
2.3 Modèle de la turbine éolienne.....	29
2.4 Modèle du multiplicateur	32
2.5 Modèle de l'arbre	33
2.6 MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	34

2.6.1	Méthode de perturbation et observation.....	34
2.6.2	Méthode de la puissance maximale.....	36
2.6.3	Méthode du lambda nominal.....	38
2.7	Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné.....	39
2.7.1	Mise en équation de la machine asynchrone.....	39
2.7.1.1	Équation des tensions de la machine asynchrone dans le plan 'abc'	40
2.7.1.2	Équation des flux de la machine asynchrone dans le plan 'abc'	41
2.7.1.3	Équation du couple électromagnétique de la machine asynchrone dans le plan 'abc'	42
2.7.2	La transformation de PARK.....	42
2.7.2.1	Calcul des tensions de la machine asynchrone dans le plan 'dq0'	44
2.7.2.2	Calcul des flux de la machine asynchrone dans le plan 'dq0'	46
2.7.2.3	Schéma équivalent de la machine asynchrone.....	47
2.7.3	Équations du couple électromagnétique.....	49
2.8	Conclusion	49
CHAPITRE 3 COMMANDÉ VECTORIELLE DU REDRESSEUR		51
3.1	La commande vectorielle	Erreur ! Signet non défini.
3.1.1	Les différents référentiels.....	51
3.1.2	Orientation du flux statorique suivant l'axe q.....	52
3.1.2.1	Calcul des flux	52
3.1.2.2	Calcul des tensions rotoriques	54
3.1.2.3	Loi de commande	55
3.1.2.4	Calcul du couple électromagnétique.....	55
3.1.2.5	Définition des valeurs références.....	56
3.1.2.6	Schéma de la commande	56
3.1.3	Orientation du flux statorique suivant l'axe d.....	57
3.1.3.1	Calcul des flux	57
3.1.3.2	Calcul des tensions rotoriques	58
3.1.3.3	Loi de commande	59
3.1.3.4	Calcul du couple électromagnétique.....	60
3.1.3.5	Définition des valeurs références.....	60
3.1.3.6	Schéma de la commande	61
3.1.4	Orientation du flux rotorique suivant l'axe d.....	62
3.1.4.1	Calcul des flux	62
3.1.4.2	Calcul des tensions rotoriques en fonction des tensions statoriques	64
3.1.4.3	Loi de commande	67
3.1.4.4	Calculs de puissances actives et réactives rotoriques	68
3.1.4.5	Définition des valeurs références.....	69
3.1.4.6	Schéma de la commande	69
3.1.		

CHAPITRE 4	COMMANDES DE L'ONDULEUR ET RÉSULTATS DE SIMULATION	71
4.1	Commande non linéaire	71
4.1.1	Modélisation dans le plan 'abc'	72
4.1.2	Modélisation dans le plan 'dq0'	76
4.1.2.1	Loi de commande	81
4.1.2.2	Définition des valeurs références	81
4.1.2.3	Schéma de la commande	82
4.2	Commande indirecte dans le plan 'abc'	83
4.2.1	Calcul des courants références	83
4.2.2	Définition des valeurs des références	84
4.2.3	Schéma de commande	84
4.3	Commande indirecte dans le plan 'dq0'	84
4.3.1	Loi de commande	88
4.3.2	Définition des valeurs références	89
4.3.3	Schéma de la commande	89
4.4	Résultats de simulation	90
4.4.1	Introduction	90
4.4.2	Résultat de simulation avec la commande indirecte dans le plan 'abc'	91
4.4.2.1	Régime permanent	91
4.4.2.2	Régime dynamique	92
4.4.3	Résultats de simulation avec la commande indirecte dans le plan 'dq0'	97
4.4.3.1	Régime permanent	97
4.4.3.2	Régime dynamique	98
4.4.4	Résultats de simulation avec la commande non-linéaire	100
4.4.4.1	Régime permanent	100
4.4.4.2	Régime dynamique	101
4.5	Résultats de simulation avec détérioration de tension sur le réseau	105
4.5.1	Détérioration de la tension sur le réseau	105
4.5.2	Conséquence sur la MADA de la détérioration de tension sur le réseau	108
4.5.3	Résultats de simulation pendant une détérioration de tension avec la commande indirecte dans le plan 'abc'	109
4.5.4	Résultats de simulation pendant une détérioration de tension avec la commande non linéaire	111
4.5.4.1	Détérioration de la tension sur le réseau, impact sur les courants	111
4.5.4.2	Détérioration de la tension du réseau, impact sur les puissances	112
	CONCLUSION	113
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Puissance des éoliennes
Tableau 4.1	Tableau des différentes valeurs de dnk en fonction de n et k.

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Graphique de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes dans le monde (MW)	6
Figure 1.2	Éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal	8
Figure 1.3	Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur et de la vitesse du vent.	10
Figure 1.4	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique	11
Figure 1.5	Schéma de la MADA	13
Figure 1.6	Schéma de la machine asynchrone	15
Figure 1.7	Connexion de machine asynchrone à cage d'écureuil reliée au réseau avec condensateur	16
Figure 1.8	Connexion de machine asynchrone à cage d'écureuil au réseau avec convertisseurs de puissance	17
Figure 1.9	Machine asynchrone à rotor bobiné, dispositif de la MADA	18
Figure 1.10	Mode hypo-synchrone de la MADA	20
Figure 1.11	Mode hyper-synchrone de la MADA	21
Figure 1.12	Convertisseurs orientés tête-bêche à IGBT de la MADA	23
Figure 2.1	Orientation des pales	28
Figure 2.2	Courbes $Cp(\lambda, \beta)$	30
Figure 2.3	Modèle de la turbine éolienne	31
Figure 2.4	Modèle du multiplicateur	32
Figure 2.5	Modèle de l'arbre de l'éolienne	33
Figure 2.6	Méthode de perturbation et observation du MPPT	35
Figure 2.7	Algorithme de la méthode de perturbation et observation	36

Figure 2.8	Courbe passant par les points de puissance maximum pour chaque vitesse de vent (courbe rouge)	36
Figure 2.9	Méthode de la puissance maximale	38
Figure 2.10	Méthode du <i>λnominal</i>	39
Figure 2.11	Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé	40
Figure 2.12	Schéma de la transformation de PARK	43
Figure 2.13	Schémas équivalents de la machine asynchrone dans le plan ‘dq’ dans un référentiel lié au champ tournant	48
Figure 3.1	Schéma de commande vectorielle orientée au stator suivant l’axe q.....	57
Figure 3.2	Schéma de commande vectorielle orientée au stator suivant l’axe d.....	62
Figure 3.3	Schéma de commande vectorielle orientée au rotor suivant l’axe d.....	70
Figure 4.1	Schéma de la MADA avec les paramètres de l’onduleur	71
Figure 4.2	Schéma de commande non linéaire de l’onduleur	82
Figure 4.3	Schéma de la commande indirecte de l’onduleur	84
Figure 4.4	Schéma de commande indirecte dans le plan ‘dq’ de l’onduleur	89
Figure 4.5	Réponse en régime permanent avec commande indirecte dans le plan ‘abc’	91
Figure 4.6	Réponse en régime dynamique avec variation de la charge avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’	92
Figure 4.7	Réponse en régime dynamique avec commande indirecte dans le plan ‘abc’	93
Figure 4.8	Écoulement des puissances lors de la variation de la charge avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’	95
Figure 4.9	Écoulement des puissances en régime dynamique avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’	96
Figure 4.10	Réponse en régime permanent avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’	97

Figure 4.11	Réponse en régime dynamique avec la commande indirecte dans le plan 'dq0'	98
Figure 4.12	Écoulement des puissances en régime dynamique avec la commande indirecte dans le plan 'dq0'	99
Figure 4.13	Réponse en régime permanent avec commande non linéaire	100
Figure 4.14	Réponse en régime dynamique avec variation de charge et avec la commande non linéaire	101
Figure 4.15	Réponse en régime dynamique avec commande non linéaire.	102
Figure 4.16	Écoulement des puissances avec variation de charge avec la commande non linéaire	103
Figure 4.17	Écoulement des puissances en régime dynamique avec commande non linéaire.....	104
Figure 4.18	Profil des creux de tension dans différents pays.....	105
Figure 4.19	Réponse en régime permanent pendant une détérioration de tension avec la commande indirecte.....	109
Figure 4.20	Réponse en régime permanent pendant une détérioration de tension avec la commande indirecte dans le plan 'abc' avec un PLL modifié.....	110
Figure 4.21	Réponse pendant une détérioration de tension en régime permanent avec la commande non linéaire	111
Figure 4.22	Écoulement de puissance pendant une détérioration de tension en régime permanent avec la commande non linéaire.....	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MPPT	Maximum power point tracking
PI	Régulateur de type proportionnel intégral
MPP	Maximum power point
MLI	Modulation largeur d'impulsion
PWM	Pulse with modulation
PMSC	Permanent magnet synchronous generator
DFIG	Doubly fed induction generator
IGBT	Integrated gate bipolar transistor
GTO	Gate turns off
MAS	Machine asynchrone
PO	Perturbation observation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

Temps

Min	Minute
ms	Milliseconde
s	Seconde
<i>kg</i>	Kilogramme

Longueur

<i>m</i>	Mètre
<i>R</i>	Longueur de la pale, m

Densité

ρ	Densité de l'air, kg/m^3
--------	--

Aire

m^2	Mètre carré
<i>S</i>	Surface balayée par les pales de l'éolienne, m^2

UNITÉS MÉCANIQUES

Angle

<i>rad</i>	Radian
<i>deg</i>	Degrés
β	Angle de calage des pales, deg
θ	Angle de position entre le stator et le rotor, rad
θ	Angle de transformation de PARK, rad

Inertie

<i>J</i>	Inertie totale des parties tournantes, kg/m^3
----------	---

Force

<i>N</i>	Newton
<i>E_s</i>	Force électromotrice dans le stator, N
<i>E_r</i>	Force électromotrice dans le rotor, N

Vitesse

rad/s	Radian par seconde
m/s	Mètre par seconde

ω_{PK}	Vitesse de rotation du champ de PARK, rad/s
ω_s	Vitesse de rotation du champ du stator, rad/s
ω_r	Vitesse de rotation du rotor, rad/s
ω_{PK}	Vitesse de rotation du champ de PARK, rad/s
v	Vitesse du vent, m/s
Ω	Vitesse du générateur, rad/s
Ω_t	Vitesse de rotation des pales, rad/s
Ω_s	Vitesse de synchronisme, rad/s
λ	Rapport d'avance (ratio de la vitesse angulaire de l'éolienne et du vent)

Couple

<i>N.m</i>	Newton.m
<i>C_{mec}</i>	Couple mécanique du générateur, N.m
<i>C_t</i>	Couple mécanique de la turbine, N.m
<i>C_{em}</i>	Couple électromagnétique du générateur, N.m
<i>C_T</i>	Couple total de l'éolienne, M.m

UNITÉS ÉLECTRIQUES

Puissance

<i>W</i>	Watt
<i>KW</i>	Kilowatt
<i>MW</i>	Mégawatt
<i>GW</i>	Gigawatt
Var	Voltampère
<i>P_{mec}</i>	Puissance mécanique extraite du vent, W
<i>P_{tot}</i>	Puissance totale disponible, W
<i>P_r</i>	Puissance active au rotor, W
<i>Q_r</i>	Puissance réactive au rotor, Var
<i>P_s</i>	Puissance active au stator, W
<i>P_n</i>	Puissance nominale de l'éolienne, W
<i>Q_s</i>	Puissance réactive au stator, Var
<i>P_{jr}</i>	Pertes joules au rotor, W

Tension

<i>V</i>	Volt
<i>V</i>	Tension totalisées au réseau V

V_{dc}	Tension dans le bus continu DC, V
V_s	Tensions statoriques totalisées, V
V_r	Tensions rotoriques totalisées, V

Courant

A	Ampère
I_s	Courant statorique totalisés, A
I_s	Courant rotorique totalisés, A
I	Courant totalisés au réseau, A
I_{sm}	Courant maximum de source, A
I_{dc}	Courant dans le bus DC, A
I_m	Courant mutuel de la machine asynchrone, A

Flux

wb	Weber
Ψ_s	Flux statoriques totalisés, Wb
Ψ_r	Flux rotoriques totalisés, Wb

Résistance

Ω	Ohm
R_s	Résistance statorique, Ω
R_r	Résistance rotorique, Ω

Inductance

H	Henry
L_s	Inductance de fuite au stator, H
L_r	Inductance de fuite au rotor, H
L_{ls}	Inductance d'une phase au stator, H
L_{lr}	Inductance d'une phase au rotor, H
L_{ls}	Inductance d'une phase au stator, H
L_{lr}	Inductance d'une phase au rotor, H
M_{ss}	Inductance mutuelle entre deux phases du stator, H
M_{rr}	Inductance mutuelle entre deux phases du rotor, H
L_m	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor, H

Capacité

C	Condensateur du bus continu, farad
-----	------------------------------------

RATIO

C_p	Coefficient de puissance, sans unité
N_s	Nombre de spires dans le stator
N_r	Nombre de spires dans le rotor
σ	Flux de dispersion de Blondel

d_{nk}	Fonction séquentielle dépendante de n et de k
g	Glissement
P	Matrice de PARK
G	Multiplicateur, sans unité

AUTRE

f	Coefficient de frottement visqueux, sans unité
a, b, c	Vecteurs orientés dans le repère triphasé
d, q	Vecteurs orientés dans le repère biphasé
p	Nombre de pair de pole de la machine asynchrone, sans unité
c_k	Etat de l'interrupteur k
k	Interrupteur
n	Phase de fonctionnement

INTRODUCTION

La MADA est un type d'aérogénérateur qui a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Elle fonctionne à vitesse variable de vent. Sa particularité principale est qu'elle est constituée d'une machine asynchrone à rotor bobiné et elle peut ainsi fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Elle permet grâce à cette structure d'obtenir un bon rendement sur une large plage de vitesse de vent. Elle est beaucoup comparée à l'éolienne PMSG qui fonctionne aussi à vitesse variable. La PMSG est constituée d'une machine synchrone à aimants permanents et elle fournit de la puissance active au réseau seulement par le stator. Sa structure est plus simple mais son rendement est moins bon que celui de la MADA. Les convertisseurs de puissance utilisés par la PMSG sont traversés par la puissance nominale que peut fournir la machine, ils sont donc fortement dimensionnés et donc chers. La MADA est dimensionnée de manière à ce que les convertisseurs de puissance au rotor ne soient traversés que par 30% de la puissance nominale. Elle utilise donc des convertisseurs sous dimensionnés et donc moins chers.

Malgré ces avantages, il demeure un problème : sa connexion au réseau. Le réseau électrique n'est pas toujours stable, il subit régulièrement des détériorations de tension (type creux de tension ou surtension). Ces détériorations peuvent engendrer des courants de défaut dans la machine et ainsi abîmer voire détruire les convertisseurs de puissance. Pour éviter ce genre de problème, les éoliennes se déconnectent du réseau lorsque celui-ci subit une détérioration. Le but de ce travail de recherche est de trouver une stratégie qui permettra à l'éolienne de fonctionner même lorsque le réseau subit une détérioration de tension pour ainsi éviter la déconnection et donc la perte de puissance électrique.

Dans un premier temps, nous rédigerons une revue de la littérature : Nous exposerons quelques statistiques sur le développement de l'énergie éolienne au cours des dix dernières années. Nous décrirons les différents types d'éoliennes existantes en détaillant leurs avantages et leurs inconvénients. Nous expliquerons la manière dont l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie électrique. Nous schématiserons finalement la MADA en

expliquant son fonctionnement et en décrivant les différents composants qui la constituent. Durant toute cette étude, nous nous appuierons sur différentes références de la littérature.

Dans un deuxième temps, nous étudierons le fonctionnement de l'éolienne : Nous décrirons et modéliserons la machine MADA; nous étudierons d'abord les paramètres de l'éolienne. Nous modéliserons l'orientation des pales, la turbine éolienne ainsi que l'arbre mécanique en décrivant l'utilité du multiplicateur. Ensuite nous expliquerons la notion de MPPT en précisant pourquoi il devient nécessaire de l'introduire dans toutes les éoliennes à vitesse variable. Nous procèderons à la mise en équation de la machine asynchrone. Afin de simplifier les équations de cette machine, nous utiliserons la transformation de PARK. Elle permet le passage du repère abc au repère dq0 et permet ainsi l'élimination des inductances variables dans le temps dans les équations dynamiques. Elle simplifie donc les équations de la machine asynchrone. L'intérêt est d'obtenir des équations plus simples qui nous permettront d'effectuer les commandes de contrôle des convertisseurs de puissance.

Dans un troisième temps, nous étudierons et mettrons en place les lois de commande des convertisseurs. Nous commencerons par la commande vectorielle à flux orienté pour le redresseur. Elle dépend du choix du référentiel et des variables que nous souhaitons contrôler. Les variables contrôlables sont les courants statoriques et rotoriques, les tensions statoriques et rotoriques, le couple, le flux, la vitesse du rotor ω_r , la puissance réactive du stator Q_s ou encore la puissance active P_s . La régulation de ces variables permet la génération des impulsions du redresseur. Nous l'étudierons avec trois orientations différentes: l'orientation statorique suivant l'axe q, l'orientation statorique suivant l'axe d et l'orientation rotorique suivant l'axe d.

Enfin dans la quatrième partie, nous étudierons les commandes de l'onduleur. La commande non linéaire, la commande indirecte dans le plan 'abc' et la commande indirecte dans le plan 'dq0'. Nous présenterons les résultats de simulation avec la commande vectorielle orientée au stator suivant l'axe q pour le redresseur et les commandes non linéaire, indirecte dans le plan 'abc' et indirecte dans le plan 'abc'. Nous nous intéresserons ensuite au fonctionnement

de la MADA pendant une détérioration de la tension du réseau. Nous expliquerons dans un premier temps les différentes détériorations que le réseau peut subir. Nous expliquerons les types de variations de tension tels que les creux de tension ou les surtensions. Nous chiffrerons la quantité de ces détériorations dans des pays développés en expliquant quelles répercussions elles peuvent avoir sur l'industrie et sur l'économie. Nous simulerons finalement les MADA étudiées au préalable pendant une détérioration de tension sur le réseau. Nous commenterons les résultats.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons tenter d'introduire la notion d'éolienne et plus particulièrement la notion de la machine MADA. Dans un premier temps nous énoncerons quelques chiffres de la production d'électricité fournie par les éoliennes dans le monde. Nous rappellerons les enjeux économiques et environnementaux des énergies renouvelables, en particulier ceux des éoliennes. Nous expliquerons ensuite le fonctionnement de l'éolienne; sa chaîne de conversion. Comment à partir de l'énergie cinétique du vent on obtient de l'énergie électrique, celle-ci servant soit pour une consommation individuelle soit pour une consommation collective (réseau électrique). Pour finir, nous développerons le fonctionnement de la machine MADA en abordant les différentes étapes nécessaires à sa compréhension, de sa composition à l'utilité de chacun de ses composants.

1.2 Généralités sur l'éolienne

1.2.1 Quelques chiffres

L'éolienne ou aérogénérateur produit une énergie électrique directement tirée du vent. Cette énergie est considérée comme une énergie renouvelable. L'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde. On distingue les éoliennes offshore « au large » qui sont implantées en mer et les éoliennes terrestres. Ces deux types d'éoliennes fonctionnent de la même manière.

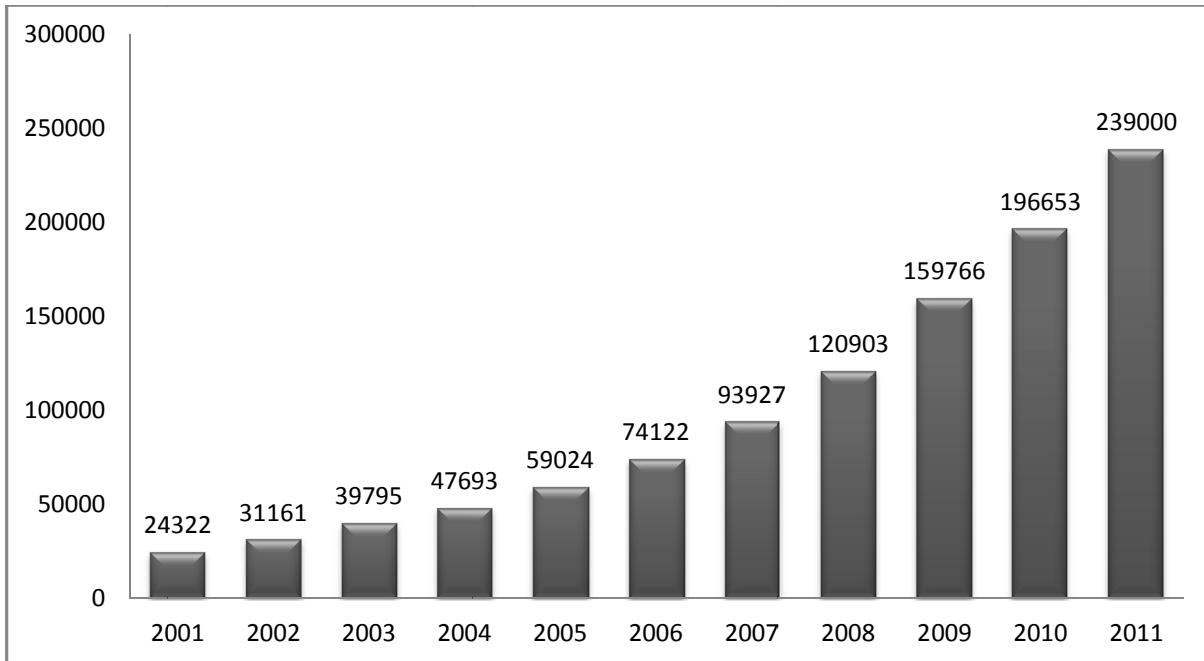


Figure 1.1 Graphique de la capacité totale de puissance fournie par les éoliennes dans le monde (MW)
 Tirée de WVEA (2012)

On constate sur ce schéma la forte augmentation (facteur 8) de l'énergie électrique produite par les éoliennes dans le monde durant les 10 dernières années. Les éoliennes ont la même utilité qu'un réacteur nucléaire ou qu'un barrage hydro-électrique: elles produisent une puissance électrique pour les réseaux électriques. Leur production totale dans le monde correspond à 1.1% de la production totale d'électricité (Cerig, 2009).

En France, de 2008 à 2010 la puissance installée est passée de 3.4GW à 5.6GW soit une augmentation de 64% en 2 ans. On estime pouvoir intégrer 15GW d'électricité éolienne dans le réseau actuel sans difficultés majeures (RTE, 2012) ce qui signifie que l'on peut encore tripler la production d'électricité éolienne. Une éolienne peut fournir une puissance de quelques kilowatts (KW) à plusieurs mégawatts (MW). La plupart des éoliennes utilisées à des fins industrielles ont une puissance comprise entre 600KW et 3MW. Ces éoliennes sont rassemblées en ferme de 6 à 20MW en France.

D'après Salma (2003), les éoliennes sont divisées en trois ensembles:

Tableau 1.1 Puissance des éoliennes

Échelle	Longueur de la pale	Puissance fournie
Petite	Moins de 6m	Moins de 40KW
Moyenne	Entre 6 et 22m	Entre 40KW et 1 MW
Grande	Plus de 22m	Plus de 1MW

1.3 Enjeux de l'éolienne

Cette énergie, exploitée depuis l'antiquité pour l'utilisation des moulins à vent, avait été délaissée pour les énergies telles que le nucléaire. C'est depuis une trentaine d'années qu'elle a refait surface sous forme d'éolienne et son développement est considérable. La prise de conscience collective des méfaits des énergies fossiles ou nucléaires a permis aux énergies renouvelables de présenter ses avantages :

1.3.1 Sur le plan environnemental

Les énergies renouvelables sont des énergies propres, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et elles ne produisent aucun déchet radioactif. Le recours aux énergies renouvelables permet de conserver certaines ressources naturelles telles que le pétrole qui sert notamment à la fabrication de certains médicaments (Apere, 2011);

1.3.2 Sur le plan économique

Les différents accidents (de cause naturelle ou humaine) comme ceux survenus à Tchernobyl ou plus récemment à Fukushima se traduisent par des coûts importants et des problèmes écologiques souvent dramatiques pour les populations locales.

Les déchets radioactifs créés par le nucléaire sont dangereux et le coût pour les contenir est très élevé. De plus, différentes études montrent que les énergies renouvelables sont plus économiques à long terme (Ho, 2011).

1.4 Éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal

Il existe différents types d'éoliennes. Les éoliennes peuvent avoir un axe vertical ou un axe horizontal comme présenté sur la Figure 1.2.

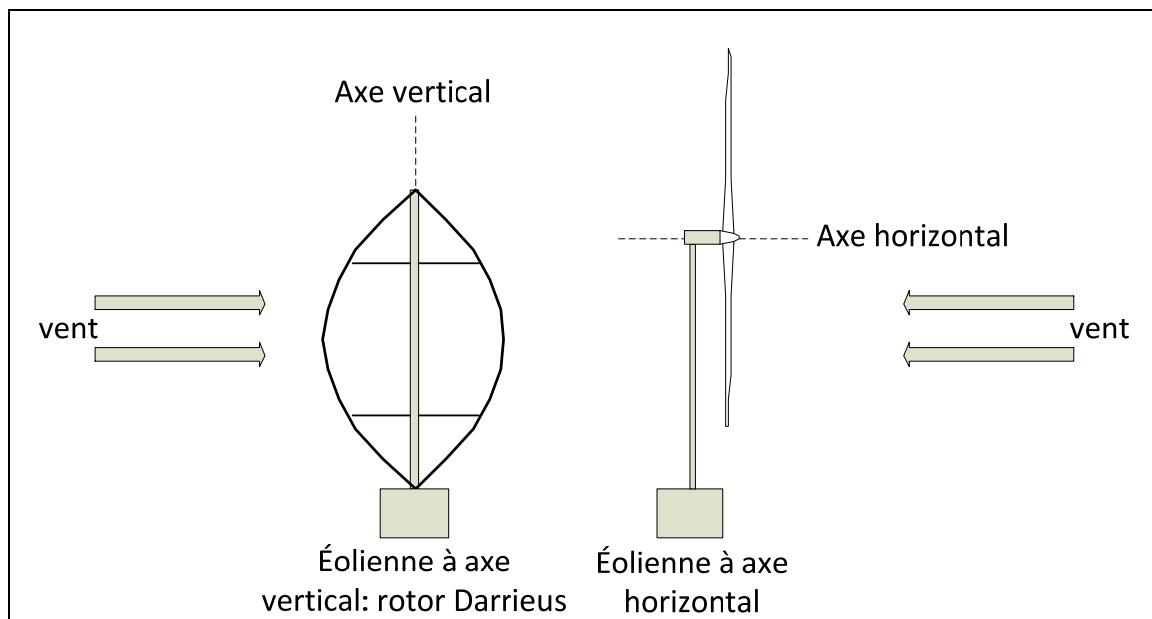


Figure 1.2 Éolienne à axe vertical et éolienne à axe horizontal

1.4.1 Les éoliennes à axe vertical

Elles sont plus faciles à entretenir car leur génératrice est installée au niveau du sol et elles n'ont pas besoin d'une orientation de pale. Cependant elles nécessitent un entraînement au démarrage et leur mat très lourd subit de fortes contraintes mécaniques. Les constructeurs ont pratiquement abandonné ces éoliennes (Hamdi, 2008).

1.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Elles sont largement plus utilisées. On distingue les éoliennes monopales (une seule pale), les éoliennes bipales (deux pales) et les éoliennes tripales (trois pales). Pour des raisons de stabilité, de poids et de fluctuations mécaniques, 80% des éoliennes construites sont des éoliennes tripales. Les éoliennes à axe horizontal sont autonomes, elles n'ont pas de besoin d'entraînement au démarrage et possèdent un meilleur rendement. Celles-ci peuvent fonctionner à vitesse fixe ou à vitesse variable. Depuis la fin des années 1980, les progrès technologiques ont permis de fabriquer des éoliennes de 7.5MW qui sont actuellement les installations les plus puissantes du marché (Eoljorat, 2011). Le meilleur rendement théorique que peut obtenir une éolienne est de 59% (Limite de Betz). En pratique on considère un rendement de 50% pour les éoliennes industrielles (Ledru, 2006). Concrètement, l'éolienne capte 100% de l'énergie cinétique du vent sur ses pales et réussit à fournir 50% de cette énergie en énergie électrique sur le réseau lorsque l'éolienne fonctionne à vitesse nominale. Il existe donc différentes manières d'améliorer la production de l'éolienne. On peut envisager d'augmenter les 50% et avoisiner les 59% exposés précédemment. On peut aussi contrôler l'éolienne afin de la faire fonctionner à sa vitesse nominale dès que possible (vitesse pendant laquelle elle produit le maximum de puissance électrique). Pour cela on utilise un algorithme nommé MPPT (Maximum Power Point Tracking); celui-ci capte la vitesse du vent et donne une consigne à l'éolienne pour que celle-ci tourne à la vitesse désirée. Si la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale de l'éolienne, la consigne sera de réduire la vitesse de rotation des pales de l'éolienne. Si le vent est trop fort et risque de détériorer l'éolienne, la consigne sera de mettre l'éolienne en « drapeau » et ainsi interrompre toute activité de l'éolienne.

1.5 Éoliennes à vitesse fixe et éoliennes à vitesse variable

Il existe deux types de fonctionnement d'éolienne.

1.5.1 Les éoliennes à vitesse fixe.

Elles sont des éoliennes simples, elles ne nécessitent pas de dispositif électronique de puissance. Généralement ce sont des machines asynchrones à cage d'écureuil car la connexion au réseau est plus facile grâce à la variation du glissement entre la vitesse de rotation du rotor et le flux du stator (Hamdi, 2008). Afin de faire fonctionner la machine asynchrone à la vitesse de synchronisme, on utilise un système d'orientation des pales (angle de calage β par exemple). Ces éoliennes sont de ce fait moins chères mais leur rendement est moins bon (Poitiers, 2003).

1.5.2 Les éoliennes à vitesse variable (type MADA ou PMSG).

Elles peuvent fonctionner sur une plus large plage de vitesse de vent. On peut ainsi tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent (voir Figure 1.3).

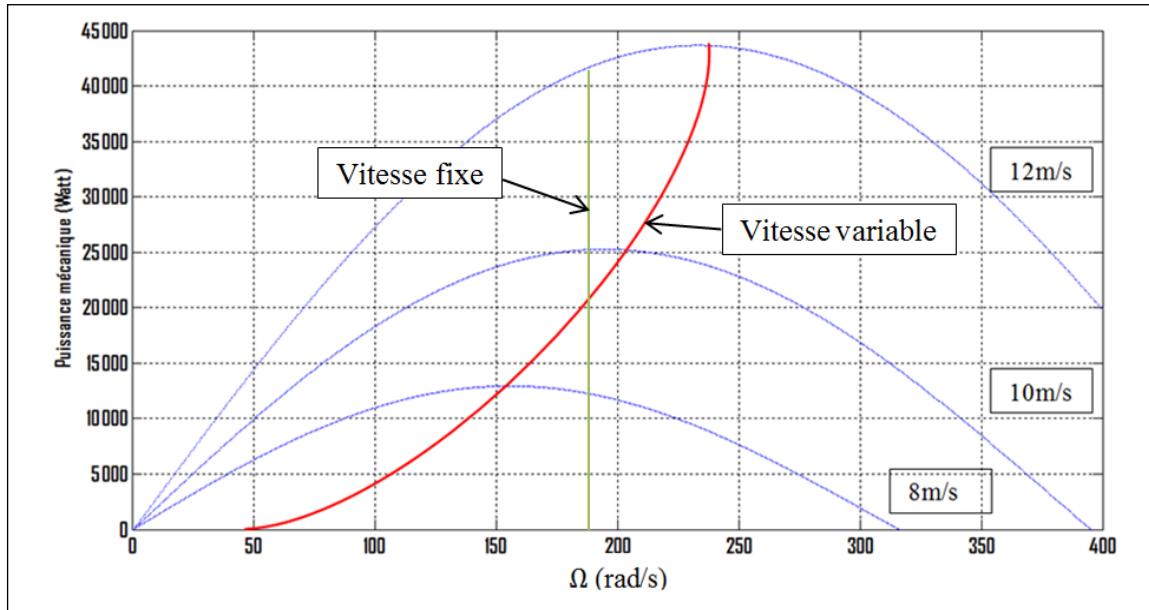


Figure 1.3 Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur et de la vitesse du vent

Sur ce schéma, on a tracé deux traits. Le premier trait est le trait vertical vert. Ce trait correspond à la puissance que peut fournir une éolienne à vitesse fixe. Pour une vitesse de vent de 12m/s elle fournira 42MW au réseau. Pour une vitesse de vent de 8m/s elle fournira une puissance de 12MW au réseau. Le deuxième trait est le trait rouge passant par tous les sommets des courbes de puissance. Ce trait correspond à la puissance que peut fournir la même éolienne mais fonctionnant à vitesse variable. Pour une vitesse de vent de 14m/s elle fournira 44MW au réseau. Pour une vitesse de vent de 8m/s elle fournira une puissance de 13MW au réseau. On constate donc qu'une éolienne fonctionnant à vitesse variable fournit une plus grande puissance au réseau. Ce type d'éolienne nous permet un contrôle du transfert de puissance envoyé sur le réseau. L'inconvénient est que l'on utilise un système MPPT et des commandes complexes à base d'électronique de puissance pour réguler les variations de vitesse de vent et ce type de méthode a un coût. Ces éoliennes sont donc plus chères mais présentent un rendement nettement meilleur.

1.6 Fonctionnement de l'éolienne

Une éolienne est une génératrice électrique qui utilise la force motrice du vent.

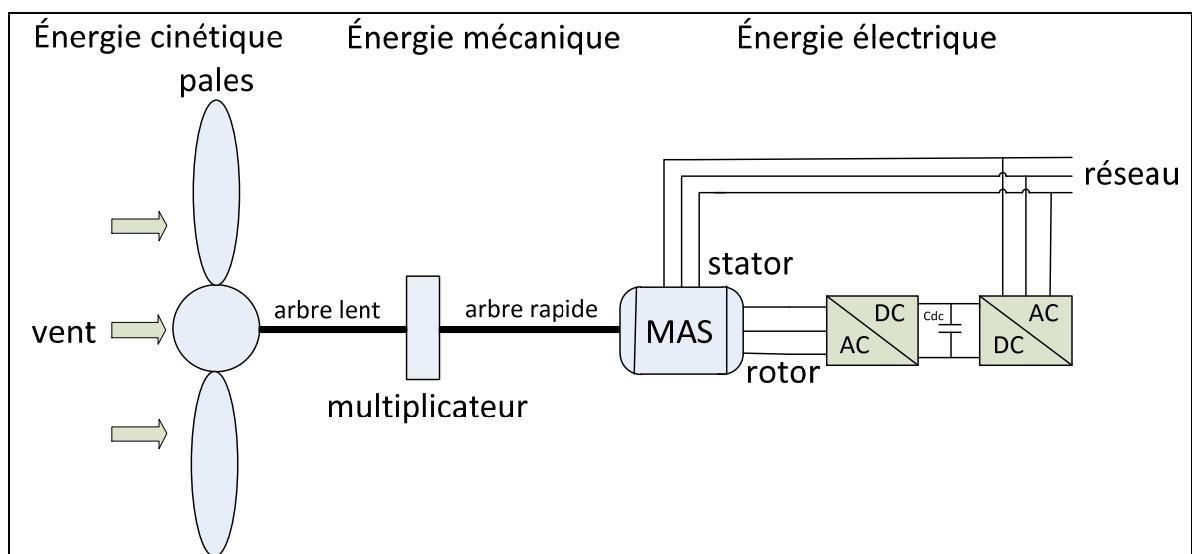


Figure 1.4 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

Pour récupérer l'énergie électrique à la sortie des pales, on passe par trois étapes.

1.6.1 L'énergie cinétique en énergie mécanique

La transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de l'arbre lent par les pales : les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique mettant en mouvement l'arbre mécanique lent par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les pales sont orientables.

1.6.2 L'accélération de la vitesse de l'arbre mécanique

L'accélération de la rotation de l'arbre mécanique par un multiplicateur : les pales de l'éolienne tournent lentement, à une vitesse comprise entre 5 et 15 tours par minute en moyenne. Les générateurs (dans notre cas la machine asynchrone) doivent tourner à une très grande vitesse, de l'ordre de 1000 à 2000 tours par minute pour produire de l'électricité. On intègre donc un multiplicateur pour accélérer la vitesse de l'arbre lent et ainsi obtenir l'arbre rapide (Figure 1.4).

1.6.3 L'énergie mécanique en énergie électrique

La création d'électricité par la machine asynchrone : l'énergie mécanique transmise par l'arbre rapide fait tourner le rotor de la machine asynchrone à grande vitesse. La rotation du rotor crée un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ magnétique tournant va permettre la création d'électricité. Cette électricité est fournie au réseau.

1.7 La MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation)

1.7.1 Composition de la MADA

La MADA est une génératrice permettant le fonctionnement à vitesse variable d'une éolienne en ajustant la vitesse du rotor en fonction de la vitesse du vent. La MADA est composée d'une machine asynchrone, de deux convertisseurs de puissance et en général d'un

transformateur pour adapter la tension au réseau. On observe sur la Figure 1.5 que le rotor est branché au redresseur alors que le stator est directement branché au réseau. Les grandeurs alternatives au stator (courants et tensions) ont la même fréquence que celle du réseau. C'est pourquoi elles n'ont pas besoin de passer par des convertisseurs de puissance pour transférer la puissance électrique statorique au réseau. En revanche, les grandeurs alternatives à la sortie du rotor n'ont pas la même fréquence que les grandeurs alternatives du réseau. Elles dépendent de la vitesse du rotor et donc de la vitesse du vent. On utilise alors des convertisseurs de puissance pour adapter leur fréquence à celle du réseau (Tremblay, 2009). On utilise un convertisseur statique back-to-back. Il est composé d'un redresseur, d'un bus continu et d'un onduleur. La MADA pouvant fonctionner en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone, la chaîne de conversion électrique doit être bidirectionnelle (Peng, 2010).

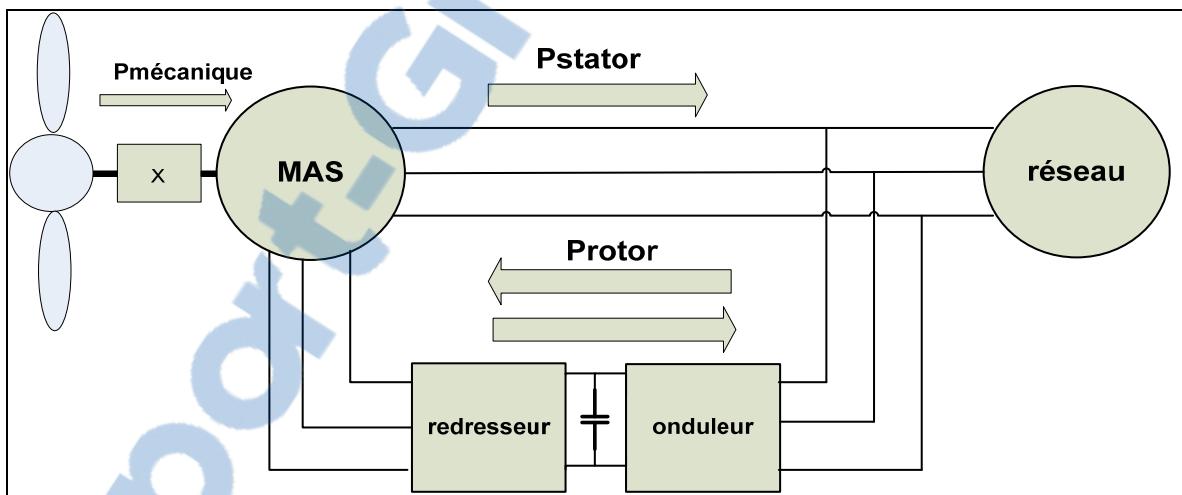


Figure 1.5 Schéma de la MADA

La majeure partie de la puissance transmise de l'éolienne au réseau passe par le stator. La MADA fonctionne à vitesse variable, si la variation de la vitesse ne dépasse pas 30% au-dessus ou en dessous de la vitesse de synchronisme, la machine est capable de fournir une puissance allant de 0.7 à 1.3 fois la puissance nominale de cette machine. La quantité de puissance électrique fournie ou consommée par le rotor correspond à $\pm 30\%$ de la puissance nominale de la machine. Les convertisseurs de puissances (redresseur et onduleur) ne sont donc traversés que par 30% de la puissance nominale de la machine (e-LEE, 2011). La

MADA utilise donc des convertisseurs sous dimensionnés et donc moins couteux. Cette technologie est mûre, solide et très fiable. On peut l'utiliser pour des applications à grande puissance et à vitesse variable. Elle possède actuellement un meilleur rendement que les nouvelles machines synchrones à aimants permanents.

1.7.2 Machine asynchrone

Initialement on utilisait principalement la machine à courant continu car elle proposait des asservissements de position précis. Actuellement, grâce à l'évolution des technologies d'électronique de puissance, la machine à courant continu est devenue moins avantageuse, car limitée en puissance, en vitesse de rotation et cher. On utilise de plus en plus la machine asynchrone. Celle-ci est robuste, elle est moins lourde (masse légère) et est plus simple à fabriquer et à entretenir (Salloum, 2007). La machine asynchrone est composée d'un rotor et d'un stator. Ils sont constitués de tôles magnétiques empilées munis d'encoches pour y insérer les différents enroulements. Le stator est similaire dans les différentes machines asynchrones. Il ne tourne pas, il est fixe et est directement relié au réseau. Le rotor tourne, il est entraîné par l'arbre mécanique de l'éolienne, lui-même entraîné par les pales de l'éolienne. Il n'y a pas de connexion entre le stator et le rotor. Le rotor entraîné tourne et crée ainsi un champ magnétique tournant dans le stator. Le stator absorbe de la puissance réactive du réseau et impose ainsi la fréquence de rotation de son champ magnétique tournant. La vitesse de ce champ magnétique est appelée vitesse de synchronisme de la machine asynchrone et est notée Ω_s . L'objectif de la machine asynchrone est d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer (Salloum, 2007). Voici une modélisation de la machine asynchrone (Électronique, 2009):

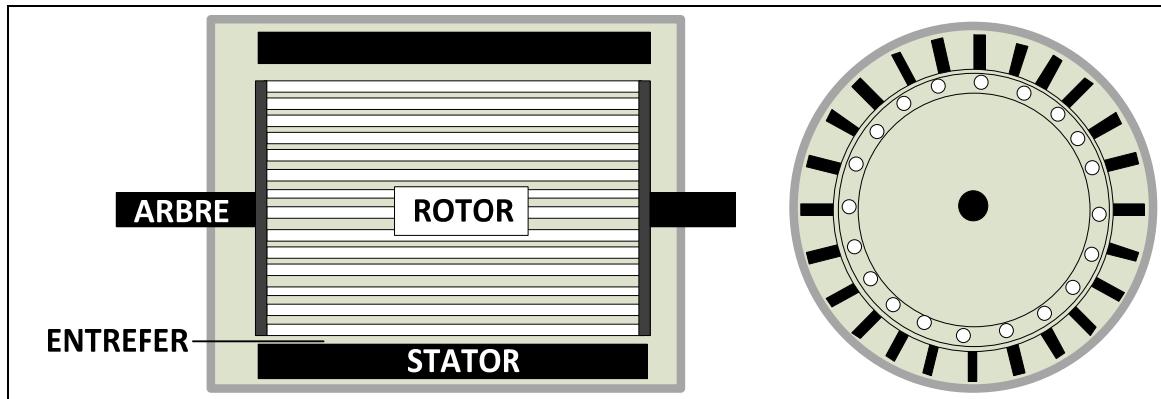


Figure 1.6 Schéma de la machine asynchrone

On utilise principalement deux types de machines asynchrones :

1.7.2.1 La machine asynchrone à cage d'écureuil

Son rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements du rotor ne sont donc pas accessibles. Elle était conçue pour les applications à vitesse fixe, elle est devenue la machine la plus utilisée pour les entraînements à vitesse variable grâce à l'apparition des thyristors GTO et des transistors IGBT. Ensuite ont été créés des onduleurs à MLI performants. Les stratégies de commandes vectorielle et directe ont été développées par la suite. Cette machine est simple et utilisée depuis longtemps. Elle est économiquement plus intéressante.

Pour une éolienne à vitesse fixe :

Cette machine présente l'avantage d'être plus robuste et moins coûteuse que les autres machines. Pour assurer le bon fonctionnement de cette machine, la génératrice doit fonctionner à une vitesse proche de sa vitesse de synchronisme (glissement $g = 0$) car la fréquence du réseau est imposée et si le glissement devient trop grand ($g > 0.02$) les courants statoriques vont augmenter et peuvent détériorer le matériel. Le dispositif généralement utilisé consiste à coupler l'arbre lent de l'éolienne avec la génératrice par le biais d'un multiplicateur de vitesse, on connecte ensuite directement le stator de la machine asynchrone

au réseau. Ce dispositif n'utilise donc pas d'électronique de puissance, il est simple. Son coût est faible et demande une maintenance peu fréquente. La machine consomme de la puissance réactive pour magnétiser son rotor et détériore ainsi son facteur de puissance. Pour contrer cette imperfection, on utilise des condensateurs que l'on introduit en parallèle au dispositif comme sur la Figure 1.7. Ils deviennent alors la seule source de puissance réactive.

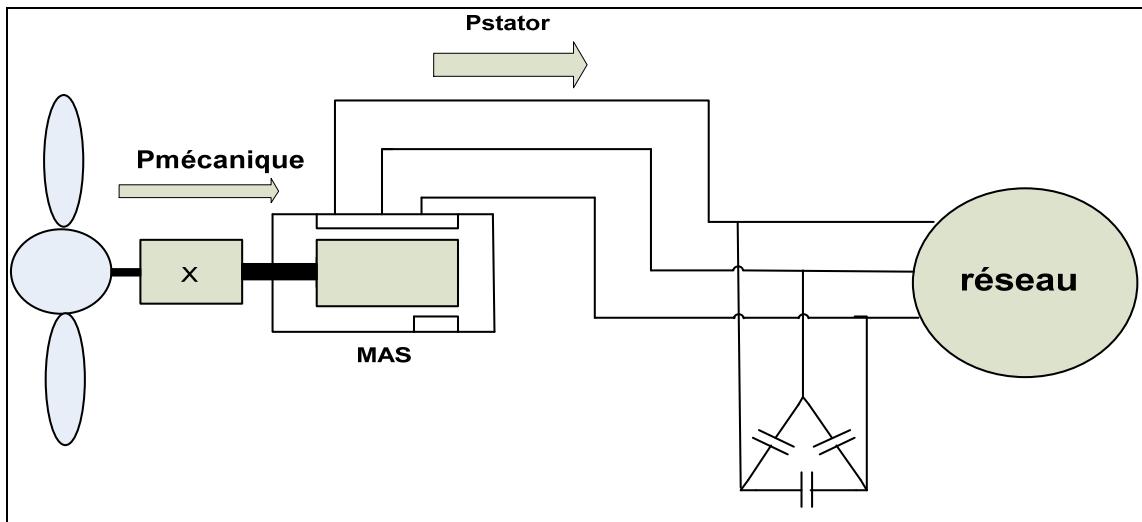


Figure 1.7 Connexion de machine asynchrone à cage d'écureuil reliée au réseau avec condensateur

Pour une éolienne à vitesse variable :

On utilise un dispositif d'électronique de puissance pour adapter la fréquence (variable) de la machine asynchrone à la fréquence du réseau. Les enroulements du stator sont connectés aux convertisseurs de puissance. Les deux convertisseurs, par le biais du bus continu permettent de découpler la fréquence du réseau de la fréquence du stator de la machine asynchrone. Ce dispositif est composé d'un redresseur, d'un bus DC continu et d'un onduleur comme sur la Figure 1.8. Les variations de puissance produites par l'éolienne sont filtrées par le condensateur du bus DC (El Aimani, 2004). Ce dispositif coûte cher (convertisseurs de puissance performants) et les pertes dans les convertisseurs de puissance sont grandes.

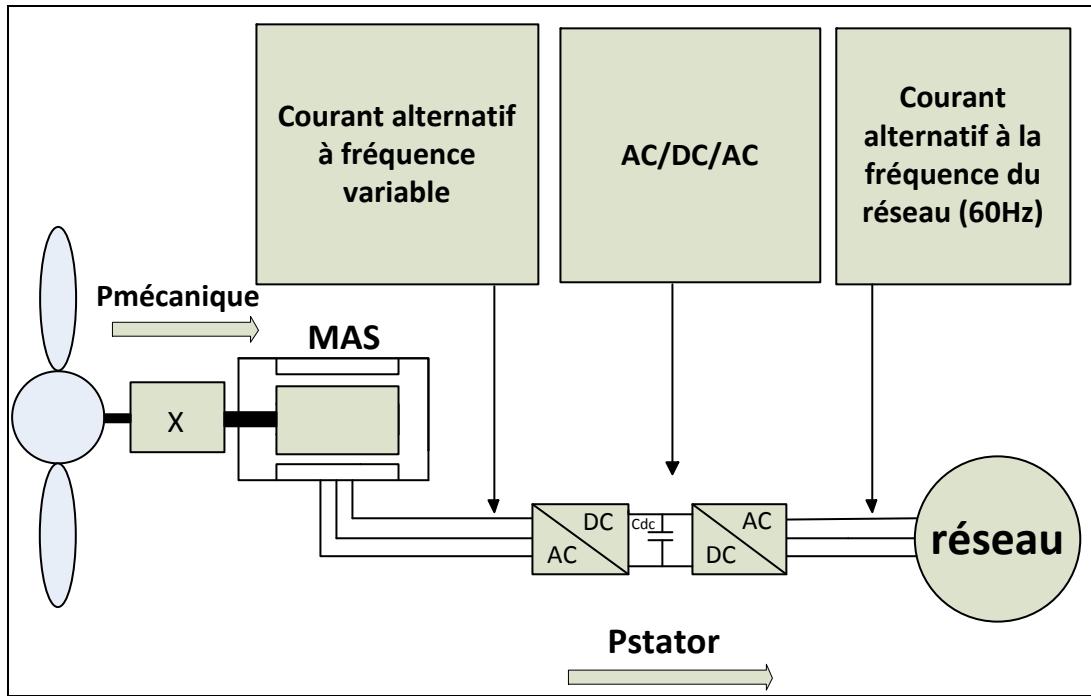


Figure 1.8 Connexion de machine asynchrone à cage d'écureuil au réseau avec convertisseurs de puissance

1.7.2.2 La machine asynchrone à rotor bobiné

On utilise cette machine asynchrone pour la MADA. Le rotor est différent des autres machines, les enroulements du rotor sont couplés en étoile et les extrémités sont connectées à des bagues conductrices. Des balais viennent frotter les bagues lorsque la machine fonctionne. Les enroulements du stator sont directement connectés au réseau alors que les enroulements du rotor passent par les convertisseurs de puissance bidirectionnels pour assurer la variation du glissement. Les grandeurs électriques sortant des convertisseurs sont connectées au réseau comme sur la Figure 1.9 (Mirecky, 2005). La majeure partie de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du stator. Une faible partie (environ 30% de la puissance nominale) de la puissance électrique est diffusée dans le réseau par le biais du rotor. La puissance active passant par les convertisseurs de puissance est donc faible et on peut donc utiliser des convertisseurs de puissance ayant un faible coût. Le

rendement de cette machine est élevé. Cette machine présente donc l'avantage d'être mieux adaptée à la variation de vitesse.

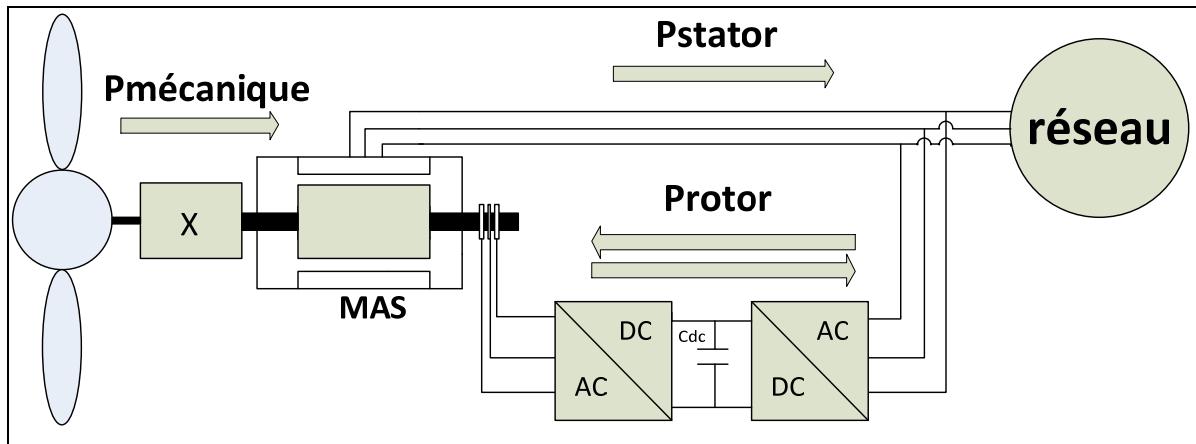


Figure 1.9 Machine asynchrone à rotor bobiné, dispositif de la MADA

1.7.3 Mode de fonctionnement

La MADA fonctionne à vitesse variable du vent. La vitesse du champ magnétique au stator est appelée vitesse de synchronisme de la machine asynchrone et est notée Ω_s . Le rotor tourne à une vitesse angulaire notée Ω . Elle est proportionnelle à la vitesse du vent, elle peut être soit inférieure ou soit supérieure à la vitesse de synchronisme. On distingue deux modes de fonctionnement : le mode hypo-synchrone lorsque la vitesse de rotation du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme de la machine. Le mode hyper-synchrone lorsque la vitesse de rotation du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme de la machine.

Pendant la rotation du rotor, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromagnétiques dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les forces électromagnétiques créées au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.1)$$

Avec :

ω_r : la vitesse de rotation du rotor,

ω_s : la vitesse de rotation du champ du stator,

E_r : la force électromagnétique dans le rotor,

E_s : la force électromagnétique dans le stator,

N_r : le nombre de spires des bobinages au rotor,

N_s : le nombre de spires des bobinages au stator.

On note g le glissement tel que :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (1.2)$$

Le glissement est la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse du rotor. Le glissement peut être négatif, nul ou positif. S'il est positif, la machine fonctionne en mode hypo-synchrone : la vitesse angulaire du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme de la machine asynchrone (vent faible). Si le glissement est négatif, alors la machine fonctionne en mode hyper-synchrone : la vitesse angulaire du rotor est supérieure à la vitesse de synchronisme de la machine (vent fort).

La puissance électrique produite par la machine asynchrone est :

$$(1 - g) \cdot P_{stator} = P_{stator} - g \cdot P_{stator} \quad (1.3)$$

La puissance P_{stator} est directement fournie au réseau par le biais du stator. Le reste de la puissance produite $-g \cdot P_{stator}$ est retrouvée sous forme de puissance mécanique dans la machine. Cette puissance, de fréquence variable (le glissement varie selon la vitesse

rotorique donc selon la vitesse du vent) sort par les balais du rotor sous forme de grandeur alternative de fréquence $g.f$. Ces grandeurs de fréquences variables (courants et tensions au rotor) passent par les convertisseurs de puissance et adaptent leur fréquence à celle du réseau. La machine asynchrone, en mode générateur fournit donc la puissance P par le stator et la puissance $g.P$ par le rotor au réseau. (El Aimani, 2004)

La MADA possède donc deux modes de fonctionnement qui dépendent de la vitesse du vent :

- mode hypo-synchrone;

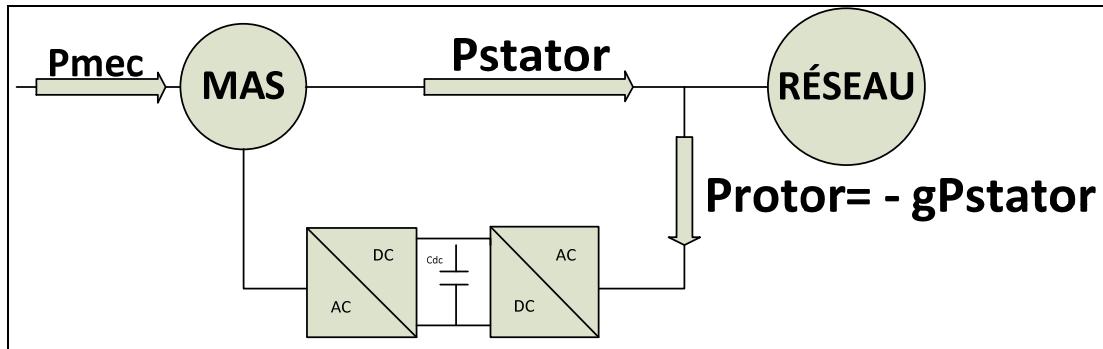


Figure 1.10 Mode hypo-synchrone de la MADA

On a :

$$P_{rotor} = -g \cdot P_{stator} \quad (1.4)$$

La valeur absolue de g est inférieure à 1. Si le glissement $g > 0$, la machine fonctionne en mode hypo-synchrone. La puissance rotorique P_{rotor} sera alors absorbée par l'éolienne. L'éolienne produit peu de puissance active.

- mode hyper-synchrone.

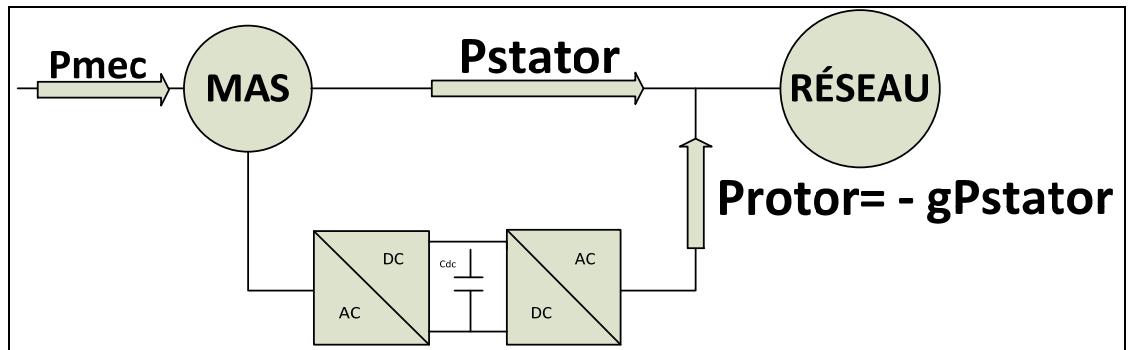


Figure 1.11 Mode hyper-synchrone de la MADA

On a :

$$P_{rotor} = -g \cdot P_{stator}$$

Si le glissement $g < 0$, la machine fonctionne en mode hyper-synchrone. La puissance rotorique P_{rotor} sera alors générée par l'éolienne et sera envoyée au réseau à travers les convertisseurs. C'est dans ce mode de fonctionnement que l'éolienne produit le maximum de puissance active.

Ces schémas montrent que pour une puissance P_{stator} constante, plus on transmet de la puissance au rotor, plus on augmente le glissement. La fréquence au stator imposée par le réseau est supposée constante. De ce fait on peut contrôler la vitesse de la génératrice en agissant sur la puissance transmise au rotor grâce au glissement g (Électronique, 2009).

1.7.4 Convertisseurs de puissances

L'électronique de puissance donne la possibilité de générer des fréquences, des tensions ou des courants variables tout en assurant un rendement élevé. Ces convertisseurs de puissance sont commandés par des algorithmes numériques qui permettent un contrôle précis en temps réel (Benalia, 2010). Dans la MADA, les courants sortant du rotor ont une fréquence variable. En effet en fonction de la vitesse du vent, le rotor tourne à différentes vitesses et crée

donc un courant au rotor dont la fréquence varie. L'intérêt de la MADA est qu'elle peut fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Le courant passant au stator à la même fréquence que le courant au réseau. Il nous faut donc adapter la fréquence du courant du rotor à celle du réseau pour que le rotor fournit de la puissance active au réseau. La stratégie utilisée pour cela est l'introduction de deux convertisseurs de puissance entre le rotor et le réseau selon la structure de Scherbius, voir Figure 1.12. On choisit d'abord un convertisseur alternatif/continu : le redresseur. Le redresseur transforme les courants et les tensions alternatifs délivrés par la MADA (de fréquence variable) en courant et tension quasi continus. Le redresseur est commandé par la technique MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion ou PWM en anglais. On introduit un condensateur entre le redresseur et l'onduleur. Ce condensateur est le bus continu DC. Ce bus a une tension référence imposée. On introduit ensuite un convertisseur continu/alternatif : l'onduleur. L'onduleur récupère le courant et la tension continu et il permet de créer un système triphasé de courant et tension alternatifs ayant la même fréquence que ceux du réseau. Le passage par le bus continu est nécessaire pour adapter la fréquence de la MADA à celle du réseau. On introduit ensuite un transformateur pour augmenter la tension et l'adapter à celle du réseau. On utilise les transistors IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) comme interrupteurs. Ils peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des thyristors (GTO : Gate Turn Off). La machine asynchrone peut fonctionner en mode hypo-synchrone et en mode hyper-synchrone. Ce qui signifie que la puissance passant par le rotor peut être fournie ou consommée par le réseau, P_{rotor} change de signe. Il faut donc avoir des convertisseurs de puissance bidirectionnels. Le facteur de puissance coté réseau est contrôlé. Le fonctionnement de ce dispositif est réversible en courant. Le redresseur devient onduleur et l'onduleur redresseur.

On désire fournir une puissance réactive nulle au réseau. Les deux convertisseurs ont la possibilité de contrôler cette puissance réactive grâce à la production ou l'absorption de la puissance réactive du rotor. Le rotor absorbe par exemple de la puissance réactive pour compenser les inductances de fuites et les inductances mutuelles de la machine asynchrone.

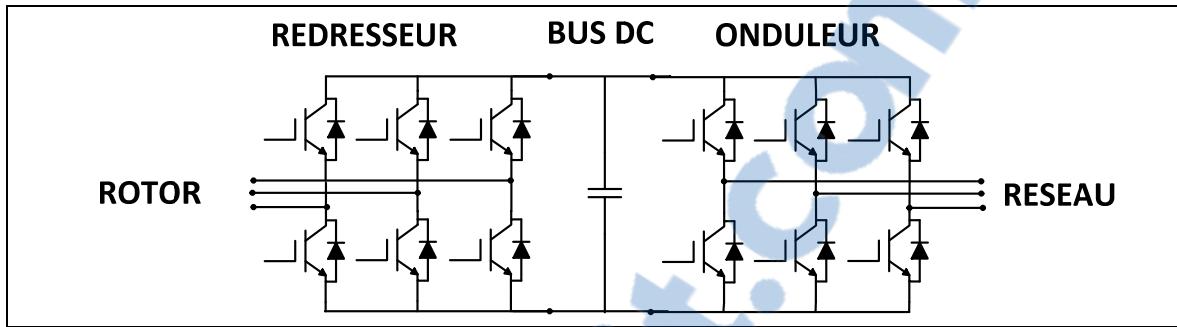


Figure 1.12 Convertisseurs orientés tête-bêche à IGBT de la MADA

1.7.5 Méthode de contrôle des convertisseurs

Il existe principalement trois types de commande pour la machine asynchrone :

1.7.5.1 Commande scalaire

La commande scalaire contrôle le couple en régime permanent avec le maintien du flux dans la machine à une valeur fixe. Elle fonctionne pour des éoliennes à vitesse variable (Salah Eddine, 2009). Cette commande est basée sur le régime permanent de la machine pour calculer le couple et prévoir les points de fonctionnement. Les relations obtenues sont plus simples que pour les commandes vectorielles donc son coût est moindre mais les performances en régime dynamique sont nettement moins bonnes.

1.7.5.2 Commande vectorielle

La commande vectorielle est basée sur le régime dynamique de la machine. Elle a été introduite par Blaschke (1972). Depuis son invention, elle a beaucoup évolué et présente actuellement des résultats très intéressants. L'avantage de cette commande est que le couple et le flux sont contrôlés indépendamment, comme dans une machine à courant continu (Salloum, 2007). Elle permet d'avoir une réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle du couple. Elle peut s'appliquer dans plusieurs référentiels (référentiel du flux, référentiel du réseau etc.) et peut dépendre de différentes variables (courant, tension, flux,

vitesse etc.). Il existe donc une multitude de commandes vectorielles. Cependant cette commande présente plusieurs inconvénients : elle est plus difficile à implémenter puisqu'elle requiert plus de puissance de calcul en temps réel. Elle est très sensible aux variations des paramètres de la machine. De plus, elle utilise beaucoup de capteurs, ce qui augmente le coût et complique la réalisation de la MADA. La littérature propose, afin de contrer l'augmentation du nombre de capteurs, d'utiliser des estimateurs de paramètres ou d'utiliser des observateurs à ordres multiples.

1.7.5.3 Commande directe

La commande directe du couple (DTC) est relativement récente (fin des années 1980), elle peut contrôler directement le flux et le couple de la machine asynchrone à condition qu'elle ait ses estimations. Elle a été inventée pour simplifier la commande vectorielle, l'algorithme qu'elle utilise dépend de moins de paramètres. Elle est créée à partir de comparateurs hystérésis qui comparent les valeurs de références aux valeurs estimées. Cette commande n'effectue pas de calcul de changement de repère, elle possède moins de correcteurs PI. La réponse est donc plus rapide que celle de la commande vectorielle à flux orienté (Salloum, 2007). Afin d'utiliser cette commande pour la MADA, il faut changer de référentiel pour calculer et/ou estimer les variables à contrôler (Riad, 2008).

1.7.6 Pollution du réseau et conséquences

De nombreuses technologies d'éoliennes telles que la MADA ou la PMSG ont été conçues pour fonctionner à vitesse variable. Leur rendement est meilleur mais il subsiste un problème : leur branchement au réseau. La MADA rencontre des problèmes lorsqu'elle fonctionne en présence de pollution électrique. En effet pour éviter d'abîmer ses convertisseurs de puissance, l'éolienne se déconnecte du réseau lors d'une détérioration de tension sur ce réseau. La connexion/déconnexion régulière engendre de nombreuses pertes économiques, notamment parce que l'éolienne ne fournit pas d'électricité lorsqu'elle est

déconnectée du réseau. La préoccupation des opérateurs de réseaux électriques est de toujours augmenter la stabilité et la fiabilité de leur réseau. Cependant, à cause des nouvelles technologies, de plus en plus de charges non linéaires telles que des alimentations à découpage ou encore des entraînements à vitesse variable de très grande puissance sont intégrées sur le réseau et le polluent fortement. Cette pollution omniprésente empêche le bon fonctionnement des éoliennes. Afin d'éviter l'augmentation de la pollution électrique, des organismes de normalisation ont été créés (Mendalek, 2003): la norme IEEE-519 aux États-Unis, la norme IEC en Europe. Ces normes contraignent les particuliers/professionnels à limiter leurs émissions harmoniques à un certain niveau. Ces limites servent de référence à tous ces particuliers et professionnels. Les problèmes liés à la pollution de réseau sur la MADA sont d'après Tremblay (2009) :

- tensions et courants de lignes non balancés et harmoniques;
- transport inutile de puissance réactive et harmonique impliquant des pertes supplémentaires dans les transformateurs et lignes de transport;
- un surdimensionnement des installations et une réduction de la marge de stabilité;
- résonnance et papillonnage;
- oscillations harmoniques entre les charges, les clients et le réseau;
- génération de courant non balancé par l'éolienne due à la distorsion de tension ce qui implique des oscillations de couple ainsi que du stress mécanique pouvant endommager la machine et les installations;
- déconnexion de l'éolienne et des charges;
- risques d'ilotage.

1.8 Conclusion

Nous avons tout d'abord énoncé quelques chiffres concernant la production d'électricité dans le monde en démontrant de quelle manière l'énergie éolienne était devenue incontournable. Nous avons expliqué les enjeux de cette énergie. Nous avons parlé des différents types

d'éolienne, les éoliennes à vitesse fixe, à vitesse variable, les éoliennes à axe vertical, à axe horizontal.

Dans un deuxième temps nous avons décrit la constitution de l'éolienne ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons évoqué la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Enfin nous avons présenté les différentes spécificités de la machine MADA : quels types de machine utilisée, pourquoi la machine asynchrone à rotor bobiné, quels éléments composent la MADA, pourquoi utiliser des convertisseurs de puissance, quels types de commande faut-il utiliser pour ces convertisseurs de puissance.

Ce chapitre nous a donc permis d'une part de synthétiser les différents intérêts de l'éolienne dans la société actuelle et d'autre part de mettre en valeur les attraits de la MADA.

CHAPITRE 2

ÉTUDE ET MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous étudierons et modéliserons les différents composants constituant la turbine éolienne. Dans un premier temps la stratégie d'orientation des pales qui permet à l'éolienne de fonctionner de manière autonome pour toute vitesse de vent. Nous modéliserons la turbine éolienne en évoquant le coefficient de puissance C_p . De plus nous expliquerons l'intérêt multiplicateur (ou boîte de vitesse) ainsi que l'arbre de l'éolienne. Nous introduirons ensuite la notion de MPPT (Maximum Power Point Tracking), technique permettant à l'éolienne de toujours fonctionner à une vitesse tendant à sa vitesse nominale en fonction de la vitesse du vent. Enfin nous modéliserons la machine asynchrone en expliquant pourquoi il est nécessaire de changer de repère pour pouvoir simplifier les équations et ainsi permettre la réalisation des commandes.

2.2 Orientation des pales

L'intérêt de l'orientation des pâles est de toujours capter la vitesse du vent permettant la production du maximum d'énergie électrique sans détériorer l'éolienne.

On note l'angle β angle de calage des pales (voir Figure 2.1). En réglant β , on modifie les performances de la turbine et plus précisément celles du coefficient de puissance. L'angle β est commandé pour se fixer à une valeur qui permet d'extraire le maximum de puissance électrique. C'est à la vitesse spécifique de l'éolienne que celle-ci produit le maximum d'énergie électrique. On se sert de l'orientation des pâles dans trois situations :

- $\beta = 0$ (pales verticale): Lorsque la vitesse du vent est inférieur à la vitesse nominale de l'éolienne (vent faible), on positionne les pales à la verticale pour capter le maximum de

vent possible et ainsi avoir une vitesse de rotation des pales la plus grande possible pour produire le maximum d'énergie électrique;

- $0 < \beta < 90$: Lorsque la vitesse du vent devient supérieure à la vitesse nominale de l'éolienne (vent fort), on augmente l'angle de calage des pales (initialement égal à 0) pour réduire la prise au vent des pâles et ainsi réduire leur vitesse de rotation. On fait varier l'angle de calage pour ralentir la machine et limiter la puissance pour ne pas dépasser la vitesse nominale. Ce cas intervient pour dégrader le coefficient de puissance;
- $\beta = 90$ (pales horizontales): Lorsque la vitesse du vent est supérieure à la vitesse maximum de l'éolienne (vent très fort 25m/s), pour éviter de détériorer l'éolienne on positionne les pales de l'éolienne à l'horizontale pour qu'elles ne tournent plus. L'éolienne est donc arrêtée, c'est la mise en drapeau.

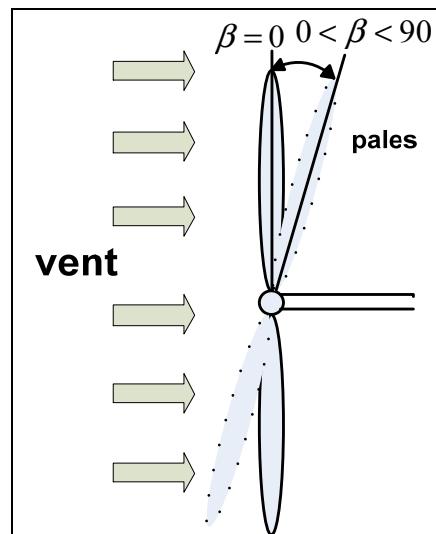


Figure 2.1 Orientation des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la vitesse de rotation des pâles. Le dispositif de commande est appelé : Pitch control.

2.3 Modèle de la turbine éolienne

La turbine est caractérisée par les courbes du coefficient de puissance C_p . Le coefficient de puissance C_p correspond à la relation entre la puissance mécanique extraite du vent et la puissance disponible. Il peut être assimilé au rendement aérodynamique de la turbine éolienne. On a :

$$\frac{P_{mec}}{P_{tot}} = C_p \quad (2.1)$$

Avec :

Pmec : puissance mécanique extraite du vent,

Ptot : puissance totale disponible.

Le coefficient C_p a une limite appelée limite de Betz, elle est égale à $C_p = \frac{16}{27} = 0.59$. Cette limite correspond la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Pour la MADA, le coefficient de puissance C_p est donné par l'expression empirique suivante (e-LEE, 2003):

$$C_p(\lambda, \beta) = \left[0.5 - 0.00167 * (\beta - 2) \right] * \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 * (\beta - 2)} \right] - 0.00184 * (\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (2.2)$$

Avec :

β : angle de calage des pales en degrés,

λ : rapport d'avance (vitesse de l'extrémité des pales sur la vitesse du vent),

Le coefficient C_p n'a pas d'unité.

Les courbes C_p sont des fonctions de la vitesse $\lambda = \frac{R\Omega}{V}$ et de l'angle de calage des pales $\beta(\text{deg})$ tel que :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (2.3)$$

Avec :

$R=2.5m$: longueur de la pale ou rayon de la turbine en mètre,

V : vitesse du vent en m/s,

Ω : vitesse de rotation mécanique de la turbine en rad/s.

On affiche les courbes du coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β dans le cas idéal où on suppose qu'il n'y a pas de perte.

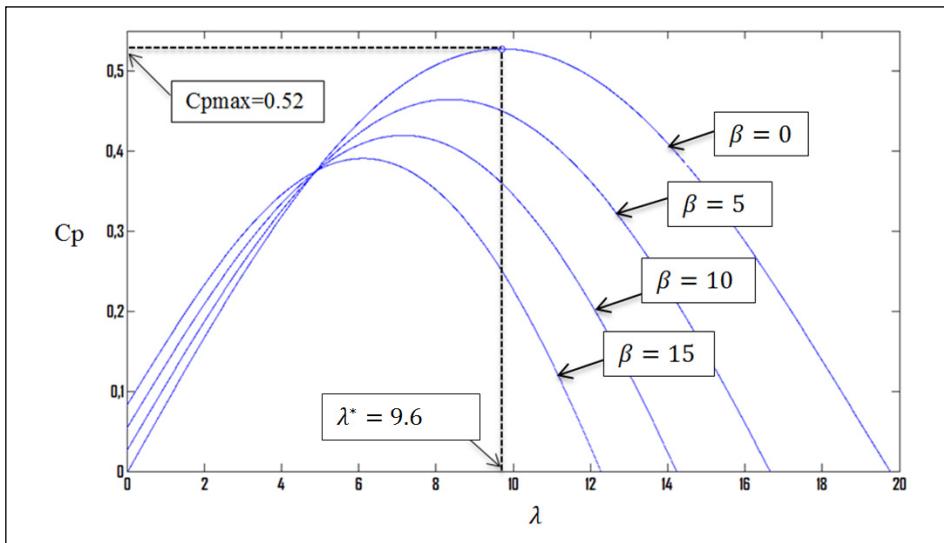


Figure 2.2 Courbes $C_p(\lambda, \beta)$

Le schéma est composé de 4 courbes. Ces courbes sont obtenues avec 4 valeurs de β différentes pour une vitesse vent donnée. La turbine produit le maximum de puissance mécanique lorsque C_p est maximum. On cherche donc à obtenir C_{pmax} . On observe les différentes courbes et on trouve C_{pmax} pour la courbe où $\beta = 0^\circ$. On en déduit les coordonnées du point dont l'ordonnée est C_{pmax} et on obtient le point où l'éolienne fournit la puissance mécanique maximum : $\lambda^* = 9.6$, $C_{pmax} = 0.525$, $\beta = 0^\circ$. Nous observons que plus

l'angle de calage β augmente, plus la valeur de C_p diminue donc lorsque les pâles de l'éolienne ont un angle de calage grand (par exemple $\beta = 15^\circ$), C_p est petit et la turbine produit moins de puissance mécanique.

On note la puissance mécanique de l'éolienne :

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p(\beta, \lambda) S \cdot V^3 \quad (2.4)$$

Avec :

$\rho = 1.224 \text{ kg/m}^3$: densité de l'air à 15°C

S : surface balayée par les pales de l'éolienne

On note le couple mécanique :

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega} \quad (2.5)$$

On modélise la turbine de la manière suivante :

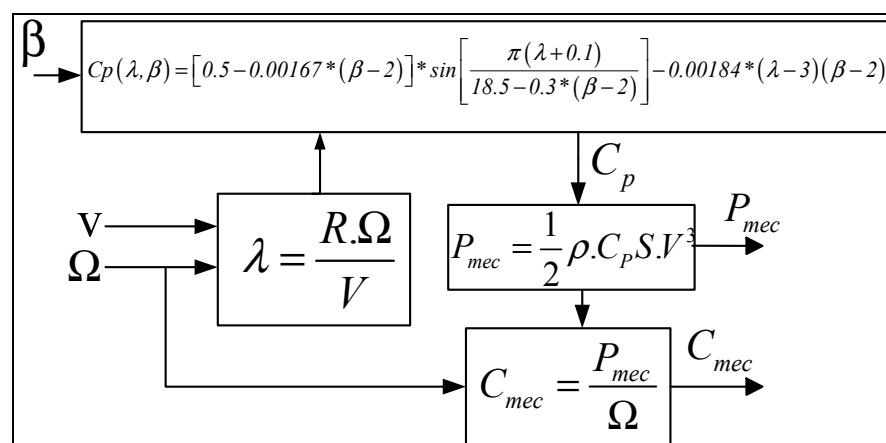


Figure 2.3 Modèle de la turbine éolienne

2.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega = G\Omega_t \quad (2.6)$$

Avec :

Ω : vitesse du générateur (arbre rapide en rad/s),

G : rapport de multiplication,

Ω_t : vitesse rotation des pales (arbre lent en rad/s).

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplication pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (2.7)$$

Avec :

C_{mec} : couple mécanique sur l'axe du générateur (N.m),

C_t : couple mécanique de la turbine (N.m).

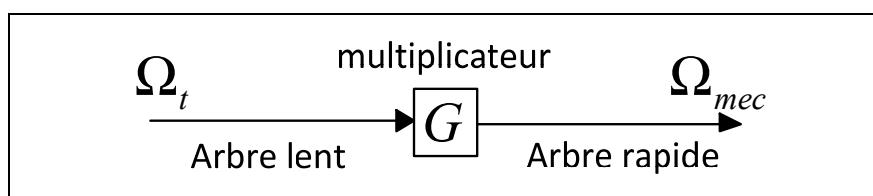


Figure 2.4 Modèle du multiplicateur

2.5 Modèle de l'arbre

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f\Omega_{mec} \quad (2.8)$$

Avec :

J = Inertie totale des parties tournantes (kg/m^3),

f = Coefficient de frottements visqueux,

C_{em} = Couple électromagnétique du générateur.

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{mec} a un signe négatif. Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine :

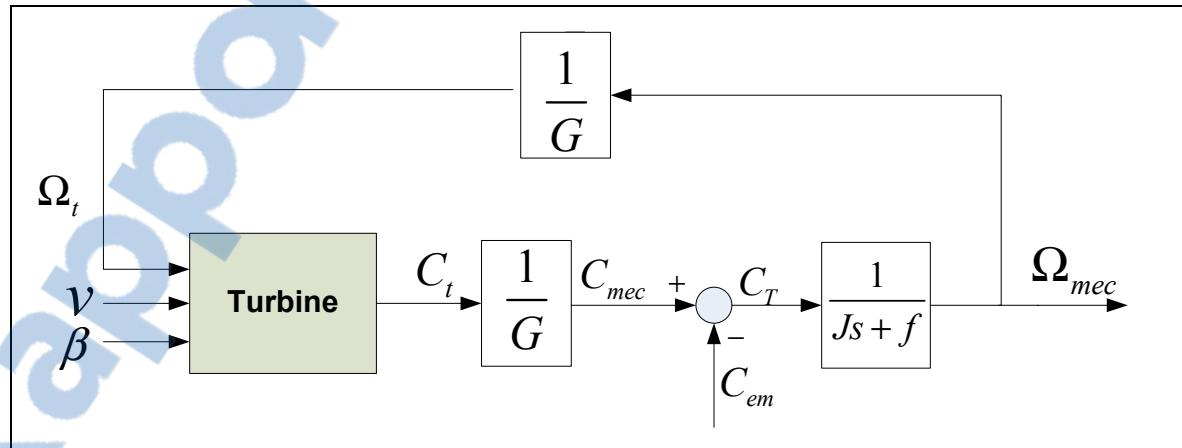


Figure 2.5 Modèle de l'arbre de l'éolienne

2.6 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique pour une source variante (par exemple la vitesse du vent dans le cas d'une éolienne). Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou générateurs éoliens. Le MPPT a été créé pour avoir la meilleure connexion possible entre la source non linéaire et le réseau et ainsi toujours extraire le maximum de puissance.

Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour des applications spécifiques. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- Le rendement global du système désiré par le constructeur
- Le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique
- L'application souhaitée (systèmes autonomes, connectés au réseau, spatiaux)
- Les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse,
- Le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

On distingue trois méthodes de MPPT.

2.6.1 Méthode de perturbation et observation

La méthode perturbation observation (PO) est sans doute la plus utilisée pour faire une recherche du point maximal de puissance. Ce principe de contrôleur MPPT est basé sur le « coude » de la caractéristique . C'est plus ou moins une méthode par tâtonnement, comme le montre la Figure 2.6.

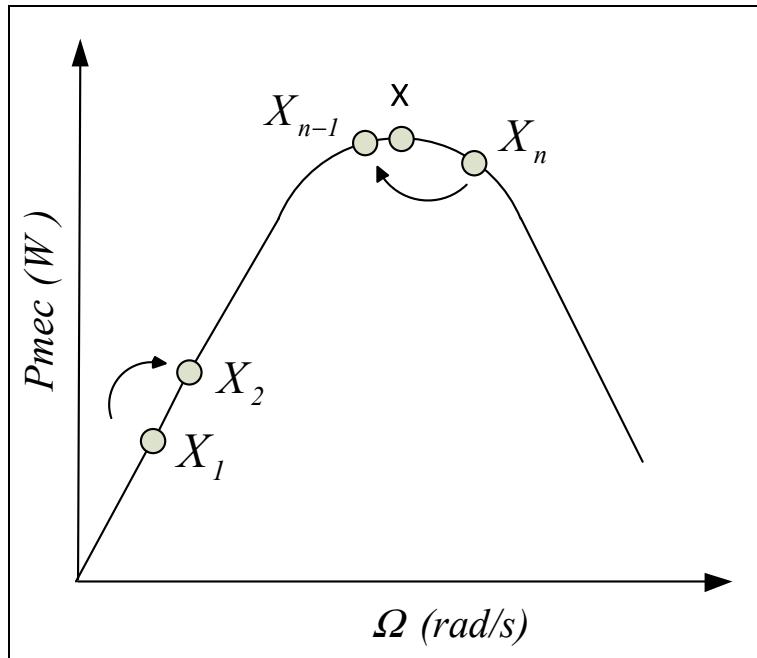


Figure 2.6 Méthode de perturbation et observation du MPPT

Avec :

$$X_1 = P_{mec}(t_1)$$

$$X_2 = P_{mec}(t_2)$$

On se place à un endroit de la courbe, au point (X_1). On regarde si la valeur du point suivant est supérieure ou non. Si oui, on se déplace au point suivant (X_2), jusqu'au moment où le point suivant (X_n) sera inférieur au précédent (X_{n-1}). À ce moment, on prend un intervalle de valeur entre chaque point plus faible, et l'on recommence à partir de (X_{n-1}), jusqu'à obtenir le point le plus haut MPP (Maximum Power Point) (X). De cette manière, le MPPT permet à l'éolienne de toujours fonctionner au point (X) et ainsi de toujours fournir la puissance électrique maximum au réseau.

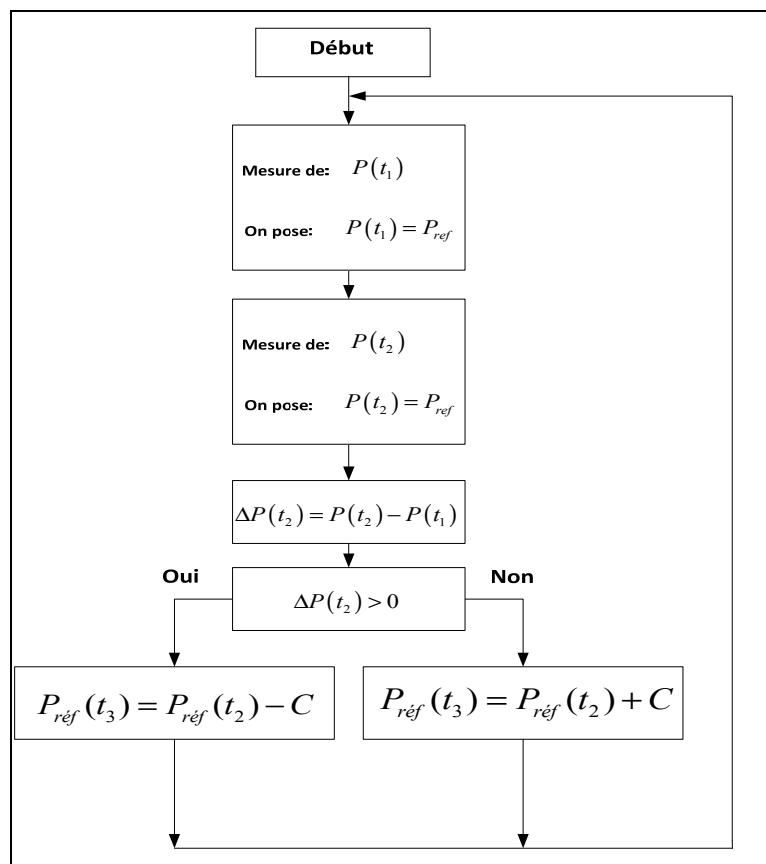


Figure 2.7 Algorithme de la méthode de perturbation et observation

2.6.2 Méthode de la puissance maximale

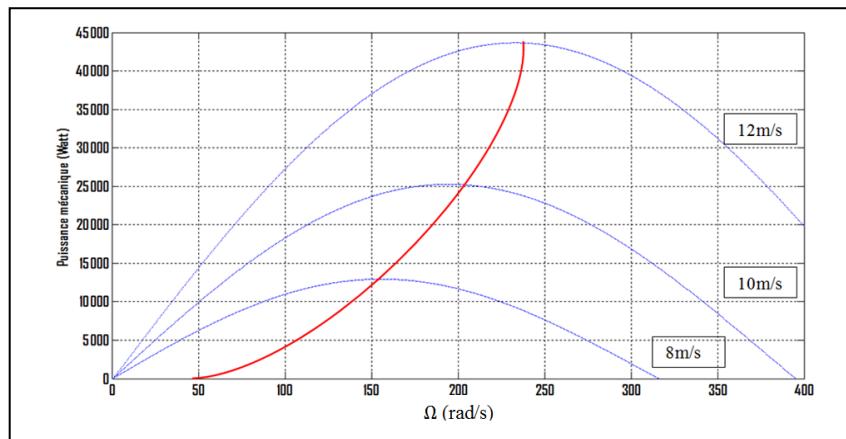


Figure 2.8 Courbe passant par les points de puissance maximum pour chaque vitesse de vent (courbe rouge)

D'après la Figure 2.2, on obtient les valeurs $\lambda^* = 9.6$ et $C_p(\max) = 0.52$

D'après l'équation (2.4), la puissance mécanique dans l'éolienne est notée :

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V^3$$

En remplaçant par $C_p(\max)$, on obtient :

$$P_{mec\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_{p\max} \cdot S \cdot V^3 \quad (2.9)$$

D'après l'équation (2.3), on a :

$$\lambda^* = \frac{R \cdot \Omega^*}{V}$$

Et donc :

$$V = \frac{R \cdot \Omega^*}{\lambda^*} \quad (2.10)$$

On peut donc écrire :

$$P_{mec\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_{p\max} \cdot S \cdot \left(\frac{R \cdot \Omega^*}{\lambda^*} \right)^3 \quad (2.11)$$

Avec : Ω^* la vitesse référence.

On obtient donc :

$$\Omega^* = \sqrt[3]{\frac{2P_{mec\max}}{S \cdot \rho \cdot C_{p\max}}} \cdot \frac{\lambda^*}{R} \quad (2.12)$$

On obtient de cette manière la vitesse mécanique référence à laquelle doit tourner l'arbre pour une vitesse de vent donné. On le modélise ci-dessous :

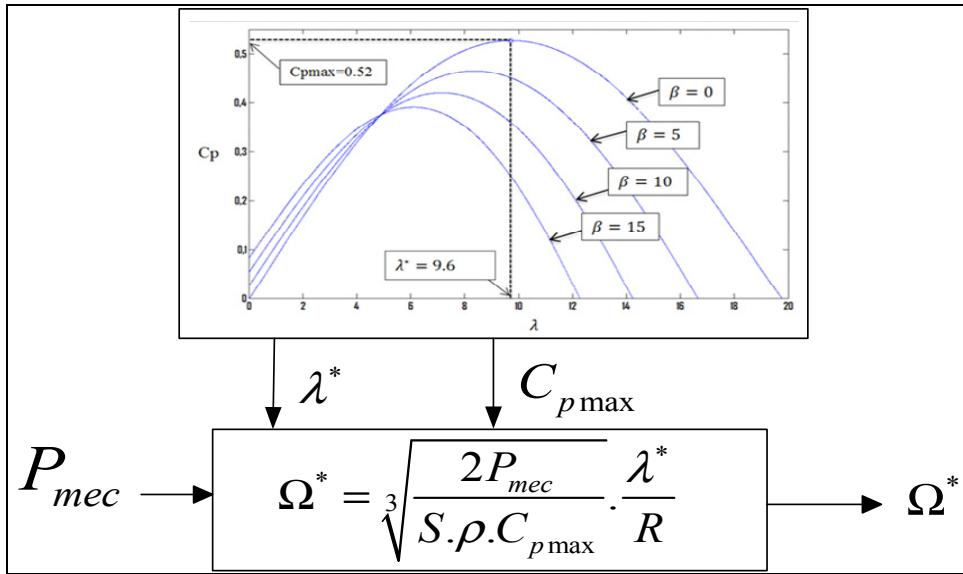


Figure 2.9 Méthode de la puissance maximale

2.6.3 Méthode du lambda nominal

D'après la Figure 2.2, on obtient la valeur $\lambda^* = 9.6$

D'après l'équation (2.3), on a :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V}$$

On peut donc écrire :

$$\lambda^* = \frac{R \cdot \Omega^*}{V} \Leftrightarrow \Omega^* = \frac{V \cdot \lambda^*}{R} \quad (2.13)$$

Avec : Ω^* la vitesse référence.

On obtient de cette manière la vitesse mécanique référence à laquelle doit tourner l'arbre pour une vitesse de vent donné.

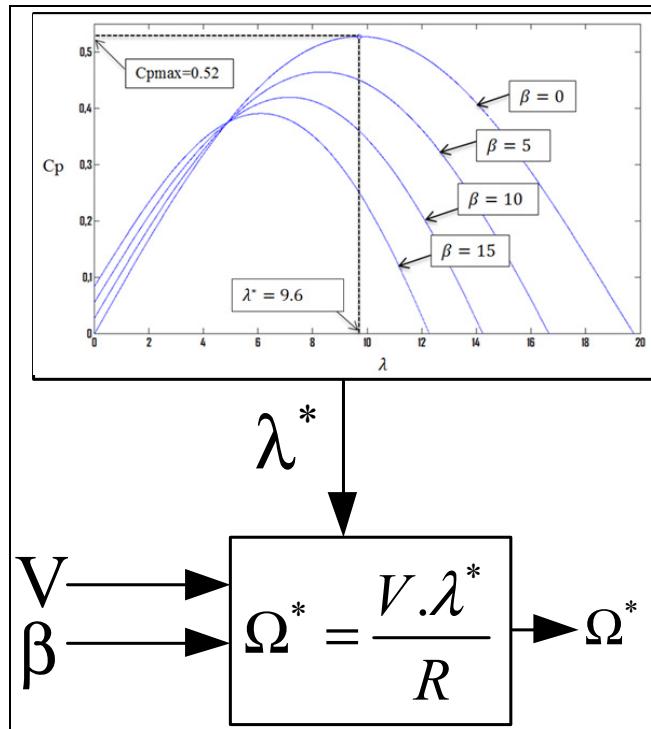


Figure 2.10 Méthode du $\lambda_{nominal}$

2.7 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné

2.7.1 Mise en équation de la machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine très complexe. Nous devons procéder à quelques simplifications pour pouvoir la modéliser (ces modifications n'altèrent pas le fonctionnement de la MADA) (Salloum, 2007) :

- on admet une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction magnétique à travers l'entrefer;
- les courants induits dans le circuit magnétique sont négligés (courant de Foucault);
- la saturation magnétique n'est pas prise en compte;

- les résistances des enroulements sont considérées constantes.

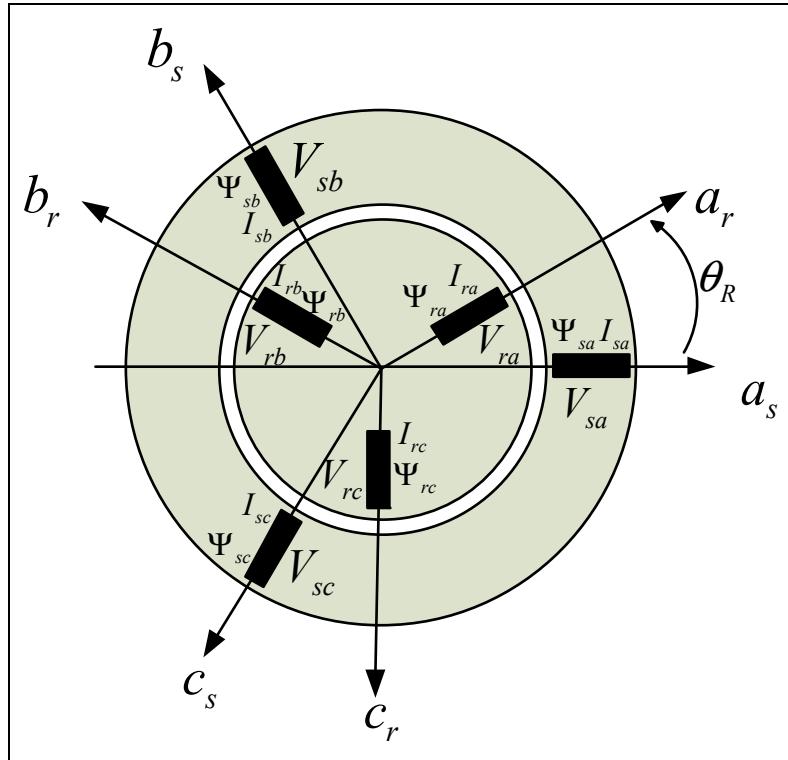


Figure 2.11 Représentation spatiale de la machine asynchrone dans le repère triphasé.

Avec :

a_s, b_s, c_s les vecteurs orientés suivant les enroulements statoriques,

a_r, b_r, c_r les vecteurs orientés suivant les enroulements rotoriques,

θ l'angle de position entre le stator et le rotor.

2.7.1.1 Équation des tensions de la machine asynchrone dans le plan ‘abc’

On note les équations de tension de la machine asynchrone dans le plan ‘abc’ (Dendouga, 2010) :

$$\begin{aligned}[V_s] &= [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s] \\ [V_r] &= [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Psi_r]\end{aligned}\tag{2.14}$$

Avec :

$[V_s] = [V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}]^T$ et $[V_r] = [V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}]^T$, respectivement les tensions des trois phases au stator et au rotor,

$[I_s] = [I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}]^T$ et $[I_r] = [I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}]^T$, respectivement les courants des trois phases au stator et au rotor,

$[\Psi_s] = [\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}]^T$ et $[\Psi_r] = [\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}]^T$, respectivement les vecteurs des flux totalisés traversant les enroulements du stator et du rotor,

$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$ et $[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$, respectivement les matrices des résistances

statoriques et rotoriques par phase.

2.7.1.2 Équation des flux de la machine asynchrone dans le plan ‘abc’

On note les équations de flux de la machine asynchrone dans le plan ‘abc’

$$\begin{aligned}[\Psi_s] &= [L_s] \cdot [I_s] + [L_m] \cdot [I_r] \\ [\Psi_r] &= [L_r] \cdot [I_r] + [L_m]^T \cdot [I_s]\end{aligned}\tag{2.15}$$

Avec :

$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{ls} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ls} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_{ls} \end{bmatrix}$, la matrice inductance de fuite au stator,

$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{lr} & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & L_{lr} & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & L_{lr} \end{bmatrix}$, la matrice inductance de fuite au rotor,

L_{ls} et L_{lr} , respectivement les inductances d'une phase au stator et d'une phase au rotor,

M_{ss} et M_{rr} respectivement les inductances mutuelles entre deux phases du stator et entre deux phases du rotor,

$[L_m] = L_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(p \cdot \theta_r) & \cos(p \cdot \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(p \cdot \theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p \cdot \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p \cdot \theta_r) & \cos(p \cdot \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p \cdot \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(p \cdot \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(p \cdot \theta_r) \end{bmatrix}$, la matrice des inductances mutuelles cycliques entre le stator et le rotor,

p : nombre de pair de pôle de la machine asynchrone.

2.7.1.3 Équation du couple électromagnétique de la machine asynchrone dans le plan ‘abc’

On note l'équation du couple électromagnétique de la machine asynchrone dans le plan ‘abc’

$$C_{em} = p [I_s]^T \cdot \frac{d}{d\theta} ([L_m] \cdot [I_r]) \quad (2.16)$$

2.7.2 La transformation de PARK

La machine asynchrone a des équations compliquées dans le repère triphasé abc. La complexité provient du fait que la matrice $[L_m]$ varie même lorsque la vitesse est en régime stationnaire. La transformation de PARK permet le passage d'un repère triphasé à un modèle diphasé. Cette transformation est un changement du repère abc au repère dq0. On utilise cette méthode pour simplifier les équations de la machine asynchrone et ainsi obtenir un modèle plus simple. Ce changement de repère permet d'éliminer les inductances variables dans le temps, notamment de rendre la matrice impédance indépendante de θ_r (Électronique, 2009).

Cette transformation permet d'orienter le repère dq0 comme on le désire. Ainsi, on peut l'orienter suivant le stator, suivant le rotor ou encore suivant le champ tournant.

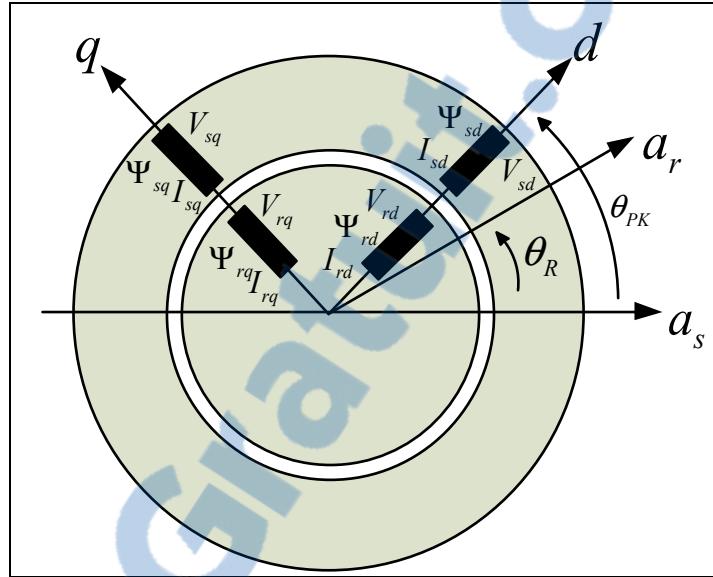


Figure 2.12 Schéma de la transformation de PARK

L'intérêt est de faire coïncider les grandeurs électriques statoriques et rotoriques pour simplifier les équations de la machine asynchrone. θ_{PK} est l'angle de transformation de PARK. On note P la matrice de PARK permettant le passage des composantes (tension, courant et flux) du repère abc au repère dq0 (Laborne, 2005) :

Au stator :

$$P(\theta_{PK})_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_{PK} & \cos \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{PK} + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_{PK} & -\sin \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_{PK} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Au rotor :

$$P(\theta_{PK})_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos[\theta_{PK} - \theta_R] & \cos\left(\theta_{PK} - \theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{PK} - \theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin[\theta_{PK} - \theta_R] & -\sin\left(\theta_{PK} - \theta_R - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{PK} - \theta_R + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

2.7.2.1 Calcul des tensions de la machine asynchrone dans le plan ‘dq0’

Afin de simplifier la modélisation de la machine asynchrone et ainsi de simplifier les commandes pour contrôler les convertisseurs de puissance, on calcule les tensions au stator dans le plan ‘dq0’.

D’après l’équation (2.14) on peut écrire :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s]$$

On utilise la transformée de PARK sur l’équation (2.14) :

$$P(\theta_{PK})_s [V_s] = P(\theta_{PK})_s [R_s] [I_s] + P(\theta_{PK})_s \frac{d}{dt} [\Psi_s] \quad (2.19)$$

D’après les propriétés des matrices, on a :

$$P(\theta_{PK})_s \frac{d}{dt} [\Psi_s] = \frac{d}{dt} \left[P(\theta_{PK})_s [\Psi_s] \right] - \left[\frac{d}{dt} P(\theta_{PK})_s \right] [\Psi_s] \quad (2.20)$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 [V_{sdq}] &= [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \left[\frac{d}{dt} P(\theta_{PK})_s [\Psi_s] \right] - \left[\frac{d}{dt} P(\theta_{PK})_s \right] [\Psi_s] \\
 &= [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{sdq}] - \left[\frac{d}{dt} P(\theta_{PK})_s \right] [\Psi_s]
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Et :

$$\begin{aligned}
 &\left[\frac{d}{dt} P(\theta_{PK})_s \right] [\Psi_s] \\
 &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{d}{dt} \theta_{PK} \right] \begin{bmatrix} \sin \theta_{PK} & \sin \left(\theta_{PK} + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_{PK} + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \theta_{PK} & \cos \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{PK} - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} [\Psi_s]
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

Avec :

$\frac{d}{dt} \theta_{PK} = \omega_{PK}$, la vitesse de rotation du champ de PARK

On obtient :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_{PK} \varphi_{sq} \\
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_{PK} \varphi_{sd}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

On utilise le même raisonnement pour les tensions au rotor dans le plan 'dq0'.

On obtient les équations électriques de tension de la machine asynchrone dans le plan dq0 :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_{PK} \varphi_{sq} & (2.24) \\
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_{PK} \varphi_{sd} \\
 v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - [\omega_{PK} - \omega_R] \varphi_{rq} \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + [\omega_{PK} - \omega_R] \varphi_{rd}
 \end{aligned}$$

2.7.2.2 Calcul des flux de la machine asynchrone dans le plan ‘dq0’

On simplifie de même les équations de flux de la machine asynchrone, on calcule les flux au stator dans le plan ‘dq0’.

D’après l’équation (2.15) on peut écrire :

$$[\Psi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [L_m] \cdot [I_r]$$

On utilise la transformée de PARK sur l’équation (2.15):

$$P(\theta_{PK})_s [\Psi_s] = P(\theta_{PK})_s [L_s] \cdot [I_s] + P(\theta_{PK})_s [L_m] \cdot [I_r] \quad (2.25)$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 P(\theta_{PK})_s [L_m] [i_r] & (2.26) \\
 &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{d}{dt} \theta_{PK} \right] \begin{bmatrix} \sin \theta_{PK} & \sin \left(\theta_{PK} + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_{PK} + \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \theta_{PK} & \cos \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} [i_r] \\
 &= \frac{3}{2} L_{sr} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Avec : $L_m = \frac{3}{2} L_{sr}$.

On utilise le même raisonnement pour les flux au rotor dans le plan ‘dq0’.

On obtient les équations du flux de la machine asynchrone dans le plan dq0 :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\
 \varphi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\
 \varphi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\
 \varphi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

2.7.2.3 Schéma équivalent de la machine asynchrone

On introduit de nouvelles variables dans les équations de la machine asynchrone afin d’établir son modèle équivalent.

Les équations des flux statoriques et rotoriques dans le plan ‘dq0’ sont données par les équations (2.27) :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = (L_{Is} + L_m) i_{sd} + L_m i_{rd} = L_{ls} i_{sd} + L_m i_m \\
 \varphi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} = (L_{Is} + L_m) i_{sq} + L_m i_{rq} = L_{ls} i_{sq} + L_m i_m \\
 \varphi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} = (L_{Ir} + L_m) i_{rd} + L_m i_{sd} = L_{lr} i_{rd} + L_m i_m \\
 \varphi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} = (L_{Ir} + L_m) i_{rq} + L_m i_{sq} = L_{lr} i_{rq} + L_m i_m
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Avec :

$$L_s = L_{Is} + L_m,$$

$$L_r = L_{Ir} + L_m,$$

On pose :

$\omega_s = \omega_{PK}$, la vitesse de rotation du champ électromagnétique du stator,

$\omega_r = \omega_{PK} - \omega_R$, la vitesse de rotation du rotor.

On en déduit donc des équations (2.24) les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} & (2.29) \\
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\
 v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd}
 \end{aligned}$$

On donne ainsi le schéma équivalent de la machine asynchrone (Wu, 2006) :

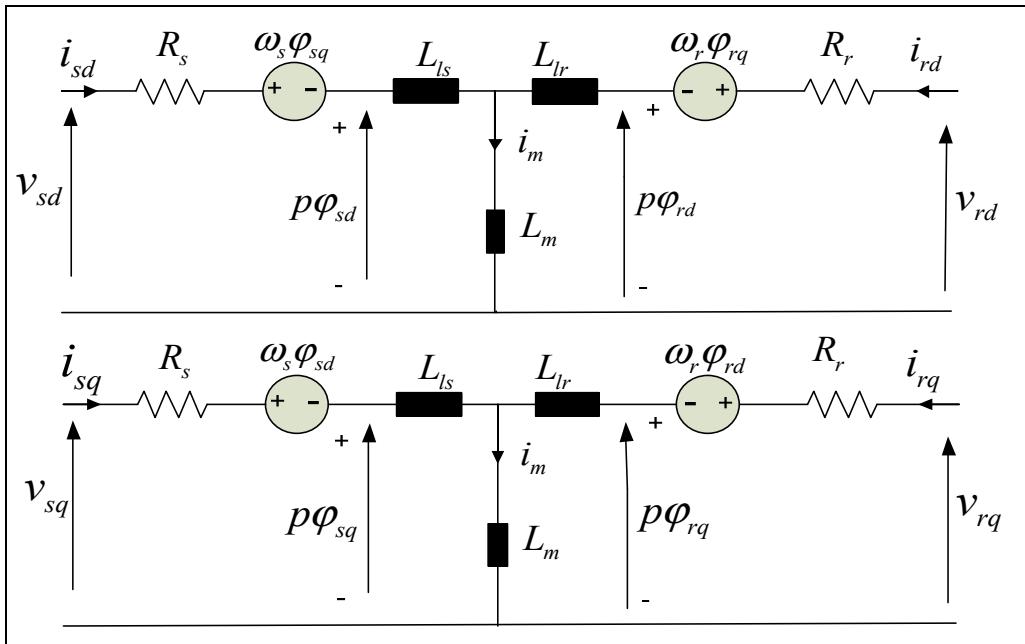


Figure 2.13 Schémas équivalents de la machine asynchrone dans le plan ‘dq’ dans un référentiel lié au champ tournant

2.7.3 Équations du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone peut être exprimé par les différentes équations ci-dessous (Azaizia, 2008) (Singh, 2010) :

$$C_{em} = P(\varphi_{rq}I_{rd} - \varphi_{rd}I_{rq}) \quad (2.30)$$

$$2.7.3.1 \quad C_{em} = P(\varphi_{sd}I_{sq} - \varphi_{sq}I_{sd}) \quad (2.31)$$

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{rd}I_{sq} - \varphi_{rq}I_{sd}) \quad (2.32)$$

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd}i_{rq} - \varphi_{sq}i_{rd}) \quad (2.33)$$

$$C_{em} = P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\varphi_{rd}\varphi_{sq} - \varphi_{rq}\varphi_{sd}) \quad (2.34)$$

$$C_{em} = PL_m (I_{rd}I_{sq} - I_{rq}) \quad (2.35)$$

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents éléments de la MADA. Nous les avons modélisés pour mieux comprendre l'aspect mathématique du fonctionnement de la MADA. Nous avons dans un premier temps modélisé les éléments permettant la transformation de

l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique grâce au modèle de la turbine en précisant l'utilité du multiplicateur et l'utilité de l'orientation des pales. Dans un deuxième temps nous avons expliqué l'intérêt du MPPT (Maximum Power Point Tracking) en présentant la méthode la plus utilisée actuellement : la méthode de perturbation et observation. Dans la dernière partie du chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone. Nous avons déduit ses équations permettant la réalisation des commandes des convertisseurs. Nous avons utilisé la transformation de PARK pour simplifier les équations de la machine asynchrone.

CHAPITRE 3

COMMANDÉ VECTORIELLE DU REDRESSEUR

La commande vectorielle permet de contrôler séparément le couple et le flux de la machine asynchrone. On peut orienter le flux par rapport au stator, par rapport au rotor ou par rapport au champ tournant. Ces différentes orientations nous permettent d'obtenir plusieurs manières de contrôler la machine asynchrone via le convertisseur (redresseur). Si on oriente le référentiel suivant l'axe d on contrôle le flux et si on oriente le référentiel suivant l'axe q on contrôle le couple (Salloum, 2008). La commande vectorielle est performante pour travailler avec des grandeurs instantanées. (Singh, 2010)

3.1 Les différents référentiels

Les équations de tension et de flux de la machine asynchrone dans le repère $dq0$ après transformation de PARK (chapitre précédent) nous ont montré que l'on peut simplifier des équations en changeant de repère. En alignant le flux (statorique par exemple) sur un axe du repère, on annule sa composante sur l'autre axe, on simplifie alors les équations. On obtient donc des équations non linéaires et la réalisation des commandes des convertisseurs de puissance est simplifiée.

Nous allons étudier les commandes vectorielles pour les trois orientations du flux suivantes :

- orientation du flux statorique suivant l'axe q ;

$$\begin{aligned}\varphi_{sq} &= \Psi_s \\ \varphi_{sd} &= 0\end{aligned}\tag{3.1}$$

- orientation du flux statorique suivant l'axe d ;

$$\begin{aligned}\varphi_{sd} &= \Psi_s \\ \varphi_{sq} &= 0\end{aligned}\tag{3.2}$$

- orientation du flux rotorique suivant l'axe d.

$$\begin{aligned}\varphi_{rd} &= \Psi_r \\ \varphi_{rq} &= 0\end{aligned}\tag{3.3}$$

3.2 Orientation du flux statorique suivant l'axe q

3.2.1 Calcul des flux

Les équations des flux statoriques et rotoriques dans le plan dq0.d'après l'équation (2.28) :

$$\begin{aligned}\varphi_{sd} &= L_{ls}i_{sd} + L_mi_m = L_{ls}i_{sd} + L_m(i_{sd} + i_{rd}) = L_si_{sd} + L_mi_{rd} \\ \varphi_{sq} &= L_{ls}i_{sq} + L_mi_m = L_{ls}i_{sq} + L_m(i_{sq} + i_{rq}) = L_si_{sq} + L_mi_{rq} \\ \varphi_{rd} &= L_{lr}i_{rd} + L_mi_m = L_{lr}i_{rd} + L_m(i_{rd} + i_{sd}) = L_ri_{rd} + L_mi_{sd} \\ \varphi_{rq} &= L_{lr}i_{rq} + L_mi_m = L_{lr}i_{rq} + L_m(i_{rq} + i_{sq}) = L_ri_{rq} + L_mi_{sq}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Avec :

$$\begin{aligned}L_{ls} + L_m &= L_s \\ L_{lr} + L_m &= L_r\end{aligned}\tag{3.5}$$

On oriente le flux statorique suivant l'axe q, on peut donc écrire :

$$\varphi_{sd} = 0 \quad (3.6)$$

A partir des équations de flux statorique dans le plan dq0, on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_{sd} = 0 &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \rightarrow i_{sd} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ \varphi_s = \varphi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \approx L_m i_m \rightarrow i_{sq} = \frac{L_m}{L_s} i_m - \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{aligned} \quad (3.7)$$

On remplace i_{ds} par $-\frac{L_m}{L_s} i_{dr}$ dans φ_{rd} d'après l'équation (2.26) on obtient :

$$\varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} = L_r i_{rd} + L_m \left(-\frac{L_m}{L_s}\right) i_{rd} = L_r i_{rd} \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}\right) = L_r i_{rd} \sigma \quad (3.8)$$

Avec le flux de dispersion de Blondel σ qui est donné par :

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}\right) \quad (3.9)$$

On remplace i_{sq} par $\frac{L_m}{L_s} i_m - \frac{L_m}{L_s} i_{rq}$ dans φ_{rq} d'après l'équation (2.26) on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq} = L_r i_{rq} + L_m \left(\frac{L_m}{L_s} i_m - \frac{L_m}{L_s} i_{rq}\right) = \frac{L_m^2}{L_s} i_m + i_{rq} \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \\ &= \frac{L_m^2}{L_s} i_m + i_{rq} L_r \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}\right) = \frac{L_m^2}{L_s} i_m + i_{rq} L_r \sigma \end{aligned} \quad (3.10)$$

Ainsi, on obtient les équations de flux dans le plan dq0 suivantes :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{sd} &= 0 \\
 \varphi_{sq} &= L_m i_m = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\
 \varphi_{rd} &= L_r i_{rd} \sigma \\
 \varphi_{rq} &= \frac{L^2}{L_s} i_m + i_{rq} L_r \sigma
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

3.2.2 Calcul des tensions rotoriques

D'après l'équation (2.23), on a :

$$\begin{aligned}
 v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

On remplace les expressions des flux obtenus aux équations (3.11) dans les expressions des tensions rotoriques des équations (3.12) on obtient :

$$\begin{aligned}
 v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d(L_r i_{rd} \sigma)}{dt} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d(\frac{L^2}{L_s} i_m + i_{rq} L_r \sigma)}{dt} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd})
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Tant que le stator est connecté au réseau, l'influence de la résistance statorique est faible. Le courant magnétisant du stator I_m peut être considéré comme constant. On peut donc écrire :

$$\frac{dI_m}{dt} = 0 \tag{3.14}$$

Ainsi on simplifie les expressions des tensions rotoriques et on obtient les équations des tensions rotoriques en régime dynamique :

$$\begin{aligned} v_{rd} &= R_r i_{rd} + L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + L_r \sigma \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

On pose : $u_{rd} = L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt}$ et $u_{rq} = \frac{\omega_r L_r \sigma}{\omega_s} \frac{di_{rq}}{dt}$

3.2.3 Loi de commande

On établit la loi de commande suivante pour le redresseur :

$$\begin{aligned} v_{rd}^* &= u_{rd} + R_r i_{rd} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \\ v_{rq}^* &= u_{rq} + R_r i_{rq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.2.4 Calcul du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est donnée par l'équation (2.33):

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} i_{rq} - \varphi_{sq} i_{rd}) \quad (3.17)$$

Or d'après l'équation (3.6) $\varphi_{sd} = 0$, on obtient donc :

$$C_{em} = -P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sq} i_{rd}) \quad (3.18)$$

3.2.5 Définition des valeurs références

On définit les valeurs références des grandeurs à contrôler. On utilise l'équation (3.18), obtient le courant de référence I_{rd}^* suivant:

$$i_{rd}^* = -\frac{L_s C_{em}^*}{PL_m \varphi_{sq}} = \frac{C_{em}^*}{K \varphi_{sq}} \quad (3.19)$$

Avec :

$$K = -\frac{PL_m}{L_s} \quad (3.20)$$

Pour obtenir C_{em}^* , on régule la vitesse du rotor ω_r par rapport à sa référence ω_r^* , la sortie du régulateur PI donne l'estimation de la référence du couple électromagnétique C_{em}^* . Pour imposer un courant rotorique suivant l'axe q nul, On fixe :

$$i_{rq}^* = 0 \quad (3.21)$$

3.2.6 Schéma de la commande

On modélise la commande sur la Figure 3.1 :

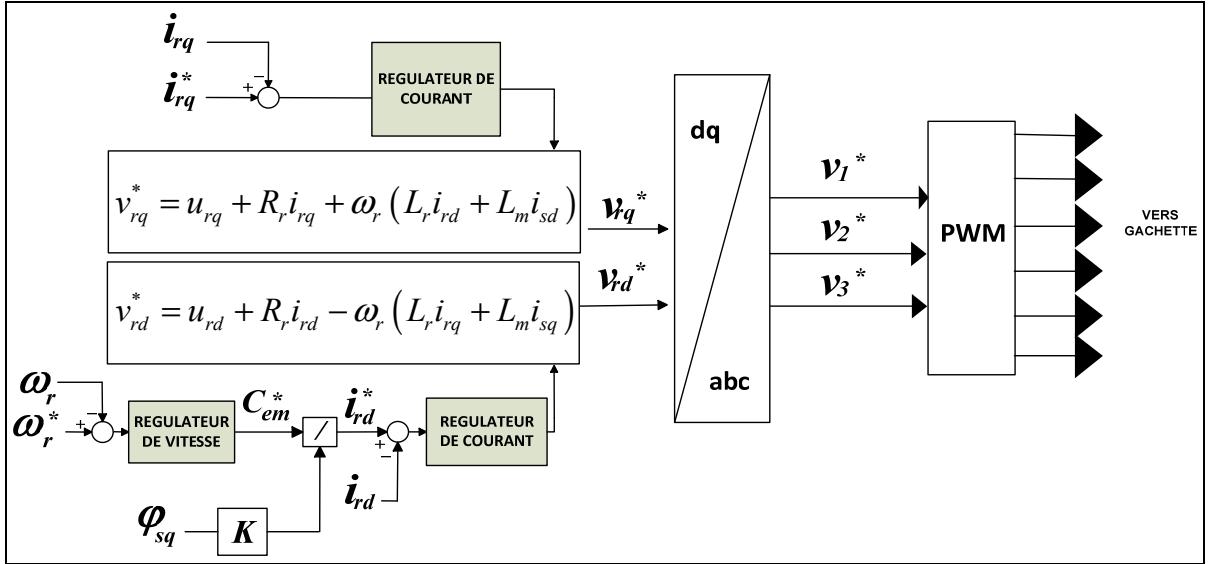


Figure 3.1 Schéma de commande vectorielle orientée au stator suivant l'axe q

3.3 Orientation du flux statorique suivant l'axe d

3.3.1 Calcul des flux

On oriente le flux statorique suivant l'axe q, on peut donc écrire :

$$\varphi_{sq} = 0 \quad (3.22)$$

A partir des expressions (2.28) de flux statoriques dans les équations dans le plan dq0, on obtient :

$$\varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} = 0 \rightarrow i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \quad (3.23)$$

$$\varphi_{sd} = \varphi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = L_m i_m \rightarrow i_{sd} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} i_m$$

On remplace i_{sq} par $-\frac{L_m}{L_s}i_{rq}$ dans φ_{rq} d'après l'équation (2.28) on obtient :

$$\varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} = L_r i_{rq} + L_m \left(-\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \right) = L_r i_{rq} \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \right) = L_r i_{rq} \sigma \quad (3.24)$$

Avec :

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \quad (3.25)$$

On remplace i_{sd} par $-\frac{L_m}{L_s}i_{rd} + \frac{L_m}{L_s}i_m$ dans φ_{rd} d'après l'équation (2.28) on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} = L_r i_{rd} + L_m \left(-\frac{L_m}{L_s} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} i_m \right) \\ &= L_r i_{rd} \left(1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \right) + \frac{L_m^2}{L_s} i_m = L_r i_{rd} \sigma + \frac{L_m^2}{L_s} i_m \end{aligned} \quad (3.26)$$

Ainsi, on obtient les équations de flux dans le plan dq0 suivantes :

3.3.2 Calcul des tensions rotoriques

$$\begin{aligned} \varphi_{sq} &= 0 \\ \varphi_{sd} &= L_m i_m \\ \varphi_{rq} &= L_r i_{rq} \sigma = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \\ \varphi_{rd} &= L_r i_{rd} \sigma + \frac{L_m^2}{L_s} i_m = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \end{aligned} \quad (3.27)$$

On rappelle les équations des tensions rotoriques dans le plan dq0, d'après l'équation (2.29) :

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq}$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd}$$

On remplace les expressions des flux obtenus aux équations (3.27) dans les expressions des tensions rotoriques, on obtient :

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d(L_r i_{rd} \sigma + \frac{L^2}{L_s} i_m)}{dt} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \quad (3.28)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d(L_r i_{rq} \sigma)}{dt} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd})$$

D'après l'équation (3.14), $\frac{dI_m}{dt} = 0$

On obtient les équations des tensions rotoriques en régime dynamique :

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \quad (3.29)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd})$$

On pose : $u_{rd} = L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt}$ et $u_{rq} = \frac{\omega_r L_r \sigma}{\omega_s} \frac{di_{rq}}{dt}$

3.3.3 Loi de commande

On établit la loi de commande suivante pour le redresseur :

$$\begin{aligned} v_{rd}^* &= u_{rd} + R_r i_{rd} - \omega_r (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) \\ v_{rq}^* &= u_{rq} + R_r i_{rq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{aligned} \quad (3.30)$$

3.3.4 Calcul du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est donnée par l'équation (2.33) :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} i_{rq} - \varphi_{sq} i_{rd}) \quad (3.31)$$

Or $\varphi_{sq} = 0$, on obtient donc :

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_s} (\varphi_{sd} i_{rq}) \quad (3.32)$$

3.3.5 Définition des valeurs références

On définit les valeurs références des grandeurs à contrôler. On utilise l'équation (3.32), on obtient ainsi le courant de référence I_{rd}^* suivant :

$$i_{rq}^* = \frac{L_s C_{em}^*}{P L_m \varphi_{sd}} \quad (3.33)$$

Avec :

$$K = \frac{P L_m}{L_s} \quad (3.34)$$

Pour obtenir le couple électromagnétique référence C_{em}^* on corrige la vitesse du rotor ω_r par rapport à sa référence ω_r^* . On donne plusieurs valeurs à ω_r^* entre 150 et 300rad/s.

D'après l'équation (3.23) on a :

$$L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = \varphi_s \rightarrow i_{rd} = -\frac{L_s}{L_m} i_{sd} + \frac{\varphi_s}{L_m} \quad (3.35)$$

On obtient donc :

$$i_{rd}^* = -\frac{L_s}{L_m} i_{sd}^* + \frac{\varphi_s}{L_m} \quad (3.36)$$

Pour obtenir le courant de référence i_{sd}^* on corrige la puissance réactive au stator Q_s par rapport à sa référence Q_s^* (Wei, 2009). On fixe :

$$Q_s^* = 0 \quad (3.37)$$

3.3.6 Schéma de la commande

On modélise la commande sur la Figure 3.2 :

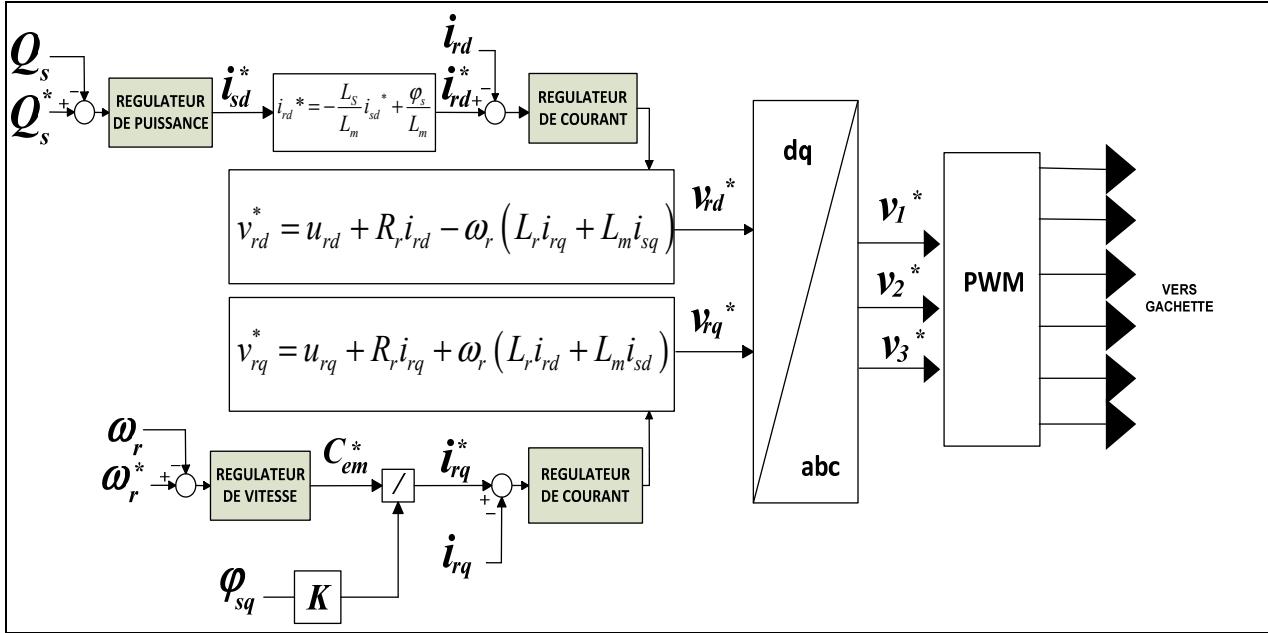


Figure 3.2 Schéma de commande vectorielle orientée au stator suivant l'axe d

3.4 Orientation du flux rotorique suivant l'axe d

3.4.1 Calcul des flux

On oriente le flux statorique suivant l'axe q, on peut donc écrire :

$$\varphi_{rq} = 0 \quad (3.38)$$

A partir des expressions de flux rotoriques dans les équations (2.28) dans le plan dq0, on obtient :

$$\varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} = 0 \rightarrow i_{sq} = -\frac{L_r}{L_m} i_{rq} \quad (3.39)$$

$$\varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} = L_m i_m \rightarrow i_{sd} = i_m - \frac{L_r}{L_m} i_{rd} = \frac{L}{L_m} (\varphi_{rd} - L_r i_{rd})$$

On remplace i_{sq} par $-\frac{L_m}{L_s}i_{rq}$ dans φ_{sq} d'après l'équation (2.28) on obtient :

$$\varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} = L_s \left(-\frac{L_r}{L_m} i_{rq} \right) + L_m i_{rq} = -\frac{L_r L_s}{L_m} \sigma i_{rq} \quad (3.40)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad (3.41)$$

On remplace i_{rd} par $-\frac{L_m}{L_r}i_{sd} + \frac{L_m}{L_r}i_m$ dans φ_{sd} d'après l'équation (2.28) on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = L_s \frac{1}{L_m} (\varphi_{rd} - L_r i_{rd}) + L_m i_{rd} = i_{rd} \left(L_m - \frac{L_r L_s}{L_m} \right) + \frac{L_s}{L_m} \varphi_{rd} \\ &= \frac{L_s}{L_m} \varphi_{rd} - \frac{L_r}{L_m} L_s \sigma i_{rd} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Ainsi, on obtient les équations de flux dans le plan dq0 suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi_{rq} &= 0 \\ \varphi_{rd} &= L_m i_m \\ \varphi_{sq} &= -\frac{L_r L_s}{L_m} \sigma i_{rq} \\ \varphi_{sd} &= \frac{L_s}{L_m} \varphi_{rd} - \frac{L_r}{L_m} L_s \sigma i_{rd} \end{aligned} \quad (3.43)$$

3.4.2 Calcul des tensions rotoriques en fonction des tensions statoriques

D'après l'équation (2.24) on a :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_{PK} \varphi_{sq} & (3.44) \\
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_{PK} \varphi_{sd} \\
 v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - [\omega_{PK} - \omega_R] \varphi_{rq} \\
 v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + [\omega_{PK} - \omega_R] \varphi_{rd}
 \end{aligned}$$

On veut exprimer v_{sd} et v_{sq} en fonction des courants rotoriques (Azaizia, 2009)

On calcule la tension statorique v_{ds} :

D'après l'équation (3.43) on peut écrire :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = \frac{L_s}{L_m} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \frac{L_r}{L_m} L_s \sigma \frac{di_{rd}}{dt} \quad (3.45)$$

Or :

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \Leftrightarrow \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = v_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_r \varphi_{rq} \quad (3.46)$$

On remplace l'équation obtenue (3.46) dans l'équation (3.45) on obtient:

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = \frac{L_s}{L_m} (v_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_r \varphi_{rq}) - \frac{L_r}{L_m} L_s \sigma \frac{di_{rd}}{dt} \quad (3.47)$$

On remplace $\frac{d\varphi_{sd}}{dt}$, i_{sd} et φ_{sq} dans v_{sd} , on obtient :

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} & (3.48) \\
 &= R_s \frac{1}{L_m} (\varphi_{rd} - L_r i_{rd}) + \frac{L_s}{L_m} (v_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_r \varphi_{rq}) - \frac{L_r}{L_m} L_s \sigma \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_s \frac{L_r L_s}{L_m} \sigma i_{rq} \\
 &= -\frac{R_r L_s + R_s L_r}{L_m} i_{rd} - \frac{L_s L_r \sigma}{L_m} \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_s \frac{L_s L_r}{L_m} \sigma i_{rq} + \frac{L_s}{L_m} V_{rd} + \frac{R_s}{L_m} \varphi_{rd}
 \end{aligned}$$

Or d'après les équations (2.24) et (3.43), on a :

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \Leftrightarrow \varphi_{rd} = \frac{v_{rq}}{\omega_r} - \frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \quad (3.49)$$

On remplace φ_{rd} dans v_{ds} on peut donc écrire :

$$\begin{aligned}
 v_{sd} &= -\frac{R_r L_s + R_s L_r}{L_m} i_{rd} - \frac{L_s L_r \sigma}{L_m} \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_s \frac{L_s L_r}{L_m} \sigma i_{rq} + \frac{L_s}{L_m} V_{rd} + \frac{R_s}{L_m} \left(\frac{v_{rq}}{\omega_r} - \frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \right) & (3.50) \\
 &= -\frac{R_r L_s + R_s L_r}{L_m} i_{rd} - \frac{L_s L_r \sigma}{L_m} \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{\omega_s L_s L_r \sigma - \frac{R_s R_r}{\omega_r}}{L_m} i_{rq} + \frac{L_s}{L_m} V_{rd} + \frac{R_s}{\omega_r L_m} v_{rq}
 \end{aligned}$$

On calcule la tension statorique v_{sq} :

On remplace $\frac{d\varphi_{sq}}{dt}$, i_{sq} et φ_{sd} dans v_{sq} , on obtient :

$$\begin{aligned}
 v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} = -\frac{R_s L_r}{L_m} i_{rq} - \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \left(\frac{L_s}{L_m} \varphi_{rd} - \frac{L_r}{L_m} L_s \sigma i_{rd} \right) & (3.51) \\
 &= -\frac{R_s L_r}{L_m} i_{rq} - \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \frac{L_s}{L_m} \varphi_{rd} - \omega_s \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} i_{rd}
 \end{aligned}$$

Or d'après l'équation (2.24) :

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \Leftrightarrow \varphi_{rd} = \frac{v_{rq}}{\omega_r} - \frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \quad (3.52)$$

On remplace φ_{rd} dans v_{sq} on peut donc écrire :

$$\begin{aligned} v_{sq} &= -\frac{R_s L_r}{L_m} i_{rq} - \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \frac{L_s}{L_m} \left(\frac{v_{rq}}{\omega_r} - \frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \right) - \omega_s \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} i_{rd} \\ &= -\frac{R_s L_r + \frac{\omega_s L_s R_r}{\omega_r}}{L_m} i_{rq} - \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_s \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} i_{rd} + \frac{\omega_s L_s}{\omega_r L_m} v_{rq} \end{aligned} \quad (3.53)$$

On obtient les tensions statoriques suivantes en fonction des tensions rotoriques:

$$\begin{aligned} v_{sd} &= -\frac{R_r L_s + R_s L_r}{L_m} i_{rd} - \frac{L_s L_r \sigma}{L_m} \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{\omega_s L_s L_r \sigma - \frac{R_s R_r}{\omega_r}}{L_m} i_{rq} + \frac{L_s}{L_m} V_{rd} + \frac{R_s}{\omega_r L_m} v_{rq} \\ v_{sq} &= -\frac{R_s L_r + \frac{\omega_s L_s R_r}{\omega_r}}{L_m} i_{rq} - \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_s \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} i_{rd} + \frac{\omega_s L_s}{\omega_r L_m} v_{rq} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Ainsi on obtient les tensions rotoriques en fonction des tensions statoriques en régime dynamique :

$$\begin{aligned} V_{rd} &= \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{R_r L_s + R_s L_r}{L_m} i_{rd} + \frac{L_s L_r \sigma}{L_m} \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{\omega_s L_s L_r \sigma - \frac{R_s R_r}{\omega_r}}{L_m} i_{rq} - \frac{R_s}{\omega_r L_m} v_{rq} + v_{sd} \right) \\ V_{rq} &= \frac{\omega_r L_m}{\omega_s L_s} \left(\frac{R_s L_r + \frac{\omega_s L_s R_r}{\omega_r}}{L_m} i_{rq} + \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s \frac{L_r L_s \sigma}{L_m} i_{rd} + v_{sq} \right) \end{aligned} \quad (3.55)$$

Donc :

$$\begin{aligned} v_{rd} &= \alpha_d i_{rd} + L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt} - \beta_q i_{rq} - \frac{R_s}{\omega_r L_s} v_{rq} + \frac{L_m}{L_s} v_{sd} \\ v_{rq} &= \alpha_q i_{rq} + \frac{\omega_r L_r \sigma}{\omega_s} \frac{di_{rq}}{dt} + \beta_d i_{rd} + \frac{\omega_r L_m}{L_s \omega_s} v_{sq} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \frac{R_r L_s + R_s L_r}{L_s} \\ \alpha_q &= \frac{R_s \omega_r}{L_s \omega_s} + R_r \\ \beta_q &= \frac{\omega_s L_s L_r \sigma - \frac{R_s R_r}{\omega_r}}{L_s} \\ \beta_d &= \omega_r L_r \sigma \end{aligned} \quad (3.57)$$

On pose : $u_{rd} = L_r \sigma \frac{di_{rd}}{dt}$ et $u_{rq} = \frac{\omega_r L_r \sigma}{\omega_s} \frac{di_{rq}}{dt}$

3.4.3 Loi de commande

On établit la loi de commande suivante pour le redresseur :

$$\begin{aligned} v_{rd}^* &= \alpha_d i_{rd} + u_{rd} - \beta_q i_{rq} - \frac{R_s}{\omega_r L_s} v_{rq} + \frac{L_m}{L_s} v_{sd} \\ v_{rq}^* &= \alpha_q i_{rq} + u_{rq} + \beta_d i_{rd} + \frac{\omega_r L_m}{L_s \omega_s} v_{sq} \end{aligned} \quad (3.58)$$

3.4.4 Calculs de puissances actives et réactives rotoriques

On remplace φ_{dr} et φ_{qr} dans les tensions rotoriques d'après les équations (2.24) :

$$\begin{aligned} v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} = R_r i_{rd} + \frac{dL_m i_m}{dt} \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} = R_r i_{rq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{aligned} \quad (3.59)$$

D'après l'équation (3.14), $\frac{dI_m}{dt} = 0$

On obtient les tensions rotoriques dans le plan dq0 :

$$\begin{aligned} v_{rd} &= R_r i_{rd} \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd}) \end{aligned} \quad (3.60)$$

On exprime les puissances actives et réactives dans le plan dq0 (Khojet El Khil, 2006) :

$$\begin{aligned} P_r &= V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} \\ Q_r &= V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq} \end{aligned} \quad (3.61)$$

On remplace les tensions V_{dr} et V_{qr} dans P_r et Q_r on obtient :

$$\begin{aligned} P_r &= V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} = R_r i_{rd}^2 (R_r i_{rq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd})) i_{rq} = R_r i_{rd}^2 + R_r i_{rq}^2 + \omega_r \varphi_{rd} i_{rq} \\ Q_r &= V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq} = (R_r i_{rq} + \omega_r (L_r i_{rd} + L_m i_{sd})) i_{rd} - R_r i_{rd} i_{rq} = \omega_r \varphi_{rd} i_{rd} \end{aligned} \quad (3.62)$$

On note P_{jr} les pertes joules au rotor tel que (Azaizia, 2008):

$$P_{jr} = R_r i_{rd}^2 + R_r i_{rq}^2 \quad (3.63)$$

La puissance P_r est proportionnelle au courant i_{rq} si le flux est maintenu constant. On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} P_r - P_{rj} &= Ki_{rq} & (3.64) \\ Q_r &= Ki_{rd} \end{aligned}$$

Avec :

$$K = f(\Omega, \omega_r) = \omega_r \varphi_{rd} \quad (3.65)$$

3.4.5 Définition des valeurs références

On définit les valeurs références des grandeurs à contrôler. On obtient ainsi les courants rotoriques référence:

$$\begin{aligned} i_{rq}^* &= \frac{P_r^*}{K} & (3.66) \\ i_{rd}^* &= \frac{Q_r^*}{K} \end{aligned}$$

3.4.6 Schéma de la commande

On modélise la commande sur la Figure 3.3 :

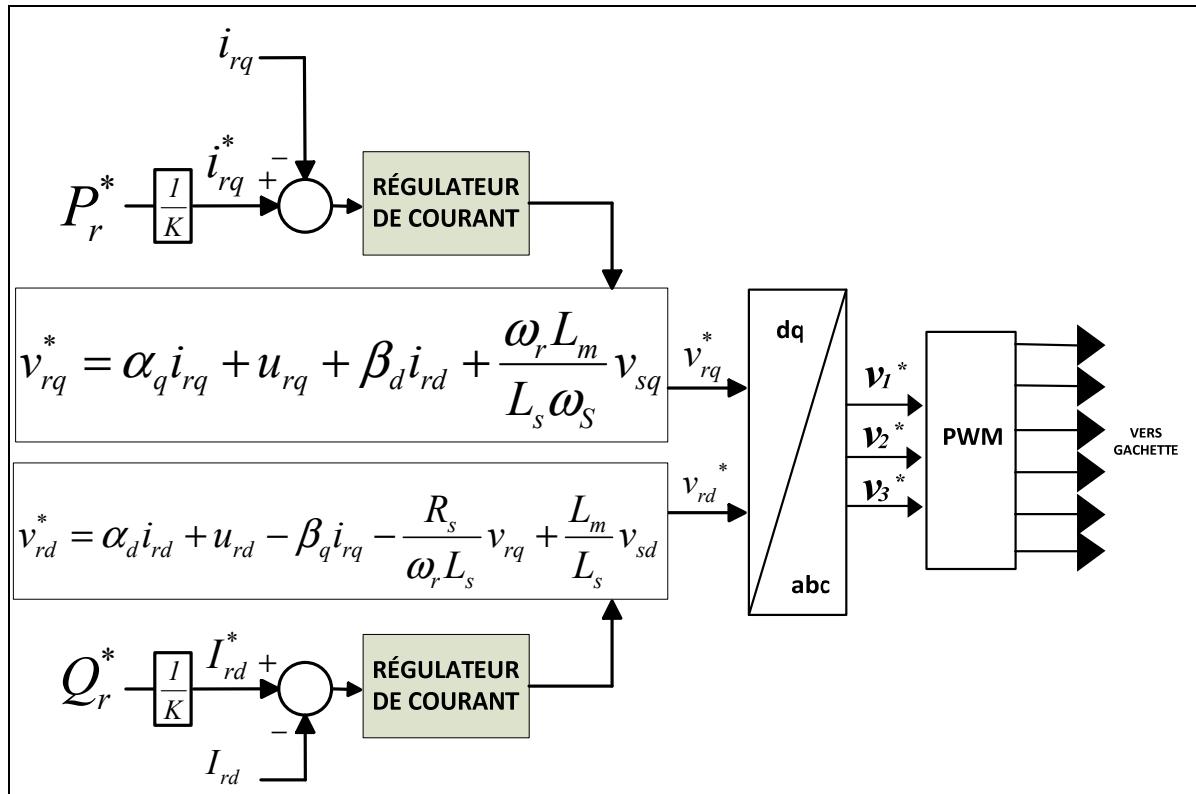


Figure 3.3 Schéma de commande vectorielle orientée au rotor suivant l'axe d

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre j'ai modélisé trois commandes vectorielles. La première orientée au stator suivant l'axe 'q', la deuxième orientée au stator suivant l'axe 'd' et la troisième orientée au rotor suivant l'axe 'd'. J'ai utilisé la commande vectorielle orientée au stator suivant l'axe 'q' pour les simulations sur Matlab.

CHAPITRE 4

COMMANDES DE L'ONDULEUR ET RÉSULTATS DE SIMULATION

Le filtre shunt actif est constitué de six IGBT, en configuration source de tension ayant des résistances R_r et des inductances L_r à l'entrée et un condensateur C_{dc} à la sortie. Il est branché en parallèle et très proche de la MADA. Sa fonction est de compenser les composantes harmoniques générées par la charge non linéaire, de compenser la puissance réactive d'une part celle consommée par la charge et d'autre part celle fournit à la machine asynchrone triphasé pour sa magnétisation.

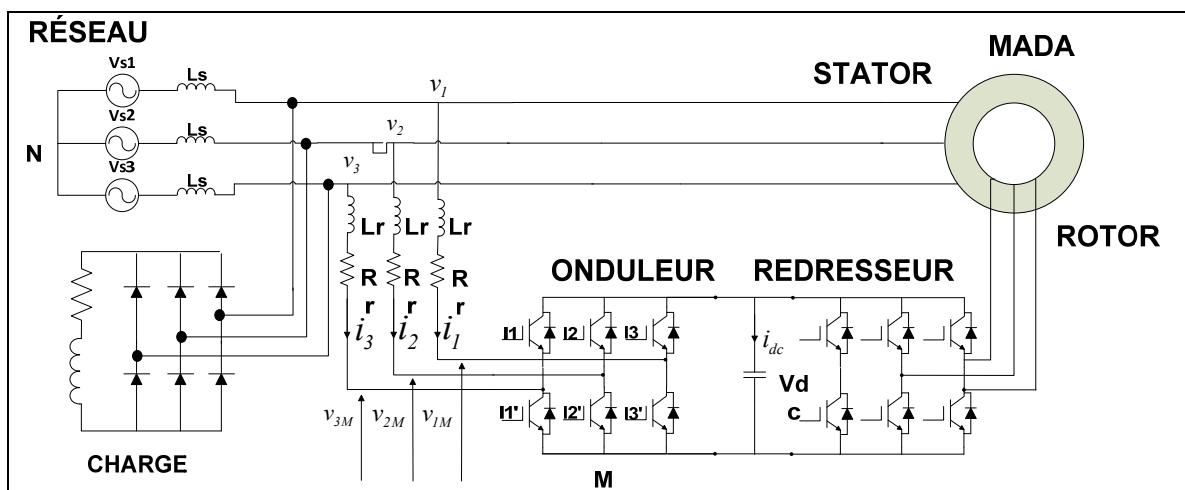


Figure 4.1 Schéma de la MADA avec les paramètres de l'onduleur

4.1 Commande non linéaire

La commande non linéaire est utilisée pour contrôler les courants et la tension du bus dc du filtre actif (Mendalek, 2003). Le filtre shunt actif est constitué de six IGBT, en configuration source de tension ayant des résistances R_r et des inductances L_r à l'entrée et un condensateur C_{dc} à la sortie. Il est branché en parallèle et très proche de la MADA. Sa fonction est de compenser les composantes harmoniques générées par la charge non linéaire, de compenser

la puissance réactive d'une part celle consommée par la charge et d'autre part celle fournit à la machine asynchrone triphasé pour son magnétisation. On branche la charge coté stator.

4.1.1 Modélisation dans le plan 'abc'

On applique les lois de Kirchhoff pour chaque phase au point de raccordement de l'onduleur, on obtient :

$$\begin{aligned} v_1 &= L_r \frac{di_1}{dt} + R_r i_1 + v_{1M} + v_{MN} & (4.1) \\ v_2 &= L_r \frac{di_2}{dt} + R_r i_2 + v_{2M} + v_{MN} \\ v_3 &= L_r \frac{di_3}{dt} + R_r i_3 + v_{3M} + v_{MN} \end{aligned}$$

Avec :

(v_1, v_2, v_3) , les tensions simples au point de branchement de l'onduleur

(i_1, i_2, i_3) , les courants simples à l'entrée de l'onduleur

(V_{1M}, V_{2M}, V_{3M}) , les tensions simples entre les entrées de l'onduleur et le point M

V_{MN} , la différence de potentiel entre le point M et le point neutre N de la source

On suppose les trois tensions équilibrées en admettant que la composante homopolaire des courants est nulle. On peut écrire :

$$v_{MN} = -\frac{I}{3} \sum_{n=1}^3 v_{nM} \quad (4.2)$$

Nous définissons la fonction de commutation c_k du bras k de l'onduleur. Cette fonction est l'état binaire des deux convertisseurs Ik et Ik' .

On aura donc :

$c_k = 0$ si Ik est ouvert et Ik' est fermé

$c_k = 1$ si Ik est fermé et Ik' est ouvert

On peut écrire $v_{kM} = c_k v_{dc}$ et ainsi écrire :

$$v_{MN} = -\frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 c_n v_{dc} \quad (4.3)$$

L'équation (4.1) pour une phase k devient alors :

$$v_k = L_c \frac{di_k}{dt} + R_c i_k + c_k v_{dc} - \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 c_n v_{dc} \quad (4.4)$$

Pour un convertisseur à six interrupteurs, on a huit séquences de fonctionnement différentes.

On définit la fonction séquentielle d_{nk} dépendante de la séquence de fonctionnement n et de la phase de k telle que:

$$d_{nk} = \left(c_k - \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 c_n \right)_n = \begin{bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ d_{n3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

On établit les différentes valeurs de d_{nk} dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.1 Tableau des différentes valeurs de d_{nk} en fonction de n et k.

n	$[c_1 \ c_2 \ c_3]$	d_{nk}		
		k=1	k=2	k=3
0	[0 0 0]	0	0	0
1	[1 0 0]	2/3	-1/3	-1/3
2	[1 1 0]	1/3	1/3	-2/3
3	[0 1 0]	-1/3	2/3	-1/3
4	[0 1 1]	-2/3	1/3	1/3
5	[0 0 1]	-1/3	-1/3	2/3
6	[1 0 1]	1/3	-2/3	1/3
7	[1 1 1]	0	0	0

D'après le Tableau 4.1 et l'équation (4.4) on peut écrire le système d'équation suivant:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= L_r \frac{di_1}{dt} + R_r i_1 + d_{n1} v_{dc} & (4.6) \\
 v_2 &= L_r \frac{di_2}{dt} + R_r i_2 + d_{n2} v_{dc} \\
 v_3 &= L_r \frac{di_3}{dt} + R_r i_3 + d_{n3} v_{dc}
 \end{aligned}$$

Du côté du bus DC, on peut écrire :

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} \quad (4.7)$$

On applique la loi de Kirchhoff pour les courants, on obtient :

$$(4.8) \quad i_{dc} = c_1 i_1 + c_2 i_2 + c_3 i_3 = \sum_{m=1}^3 c_m i_m$$

On a de plus :

$$(4.9) \quad \sum_{m=1}^3 c_m i_m = \sum_{m=1}^3 d_{nm} i_m$$

Donc :

$$(4.10) \quad \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \sum_{m=1}^3 d_{nm} i_m$$

Avec :

$$(4.11) \quad \begin{aligned} i_3 &= -i_1 - i_2 \\ d_{n3} &= -d_{n1} - d_{n2} \end{aligned}$$

On obtient ainsi l'équation différentielle du bus continu DC :

$$(4.12) \quad \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (2d_{n1} + d_{n2})i_1 + \frac{1}{C_{dc}} (d_{n1} + 2d_{n2})i_2$$

On obtient la représentation d'état de l'onduleur dans le plan 'abc' grâce aux équations (4.6) (4.12). On tient compte de l'absence de la composante homopolaire:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= L_r \frac{di_1}{dt} + R_r i_1 + d_{n1} v_{dc} & (4.13) \\
 v_2 &= L_r \frac{di_2}{dt} + R_r i_2 + d_{n2} v_{dc} \\
 \frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C_{dc}} (2d_{n1} + d_{n2}) i_1 + \frac{1}{C_{dc}} (d_{n1} + 2d_{n2}) i_2
 \end{aligned}$$

4.1.2 Modélisation dans le plan 'dq0'

La représentation d'état de l'onduleur dans le plan 'abc' est variable dans le temps et non linéaire. On utilise la transformation de PARK pour passer dans le plan stationnaire 'dq0' et ainsi faciliter l'implantation et l'extraction des harmoniques.

L'équation (2.17) nous donne la matrice de PARK :

$$P(\theta_{PK}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{PK} & \cos \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{PK} + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta_{PK} & -\sin \left(\theta_{PK} - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_{PK} + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

On note $[P(\theta)]^T$ la matrice inverse de PARK. D'après l'équation (4.12), on peut écrire :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{I}{C} [d_{n123}]^T [i_{123}] \quad (4.14)$$

On utilise la matrice de PARK :

$$\begin{aligned}
\frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{I}{C} \left([P(\theta_{PK})] \left[d_{ndq0} \right]^T \right) \left([P(\theta_{PK})] \left[i_{dq0} \right] \right) \tag{4.15} \\
&= \frac{I}{C} \left[d_{ndq0} \right]^T [P(\theta_{PK})]^T [P(\theta_{PK})] \left[i_{dq0} \right] \\
&= \frac{I}{C} \left[d_{ndq0} \right]^T \left[i_{dq0} \right] \\
&= \frac{d_{nd} i_d}{C} + \frac{d_{nq} i_q}{C} + \frac{d_{n0} i_0}{C}
\end{aligned}$$

Avec : $\left[i_{dq0} \right] = \left[i_d, i_q, i_0 \right]^T$, $\left[d_{ndq0} \right] = \left[d_{nd}, d_{nq}, d_{n0} \right]^T$, $d_{n0} = 0$ et $i_0 = 0$

On obtient :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{d_{nd} i_d}{C} + \frac{d_{nq} i_q}{C} \tag{4.16}$$

On tient compte de l'absence de la composante homopolaire, on obtient la matrice de transformation de PARK suivante:

$$P(\theta_{PK}) = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos \left(\theta_{PK} - \frac{\pi}{6} \right) & \sin \theta_{PK} \\ -\sin \left(\theta_{PK} - \frac{\pi}{6} \right) & \cos \theta_{PK} \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

Le système stationnaire (4.13) ayant pour variable d'état (i_1, i_2, v_{dc}) sera transformé en un modèle synchrone ayant comme variable d'état (i_d, i_q, v_{dc}) grâce à la transformée de PARK :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_{PK} - \frac{\pi}{6}\right) & \sin\theta_{PK} \\ -\sin\left(\theta_{PK} - \frac{\pi}{6}\right) & \cos\theta_{PK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_{dc} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

D'après les équations (4.6) on peut écrire :

$$\frac{d}{dt} [i_{l2}] = -\frac{R_r}{L_r} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [i_{l2}] - \frac{I}{L_r} [d_{n12}] v_{dc} + \frac{I}{L_r} [v_{l2}] \quad (4.19)$$

Avec : $[i_{l2}] = [i_1, i_2]^T$, $[d_{n12}] = [d_{n1}, d_{n2}]^T$ et $[v_{l2}] = [v_1, v_2]^T$

Donc d'après la transformée de PARK :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[P(\theta_{PK}) [i_{dq}] \right] &= -\frac{R_r}{L_r} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} P(\theta_{PK}) [i_{dq}] - \frac{I}{L_r} P(\theta_{PK}) [d_{ndq}] v_{dc} \\ &\quad + \frac{I}{L_c} P(\theta_{PK}) [v_{dq}] \end{aligned} \quad (4.20)$$

D'après les propriétés des matrices, on a :

$$\frac{d}{dt} \left[P(\theta_{PK}) [i_{dq}] \right] = P(\theta_{PK}) \frac{d}{dt} [i_{dq}] + \left[\frac{d}{dt} P(\theta_{PK}) \right] [i_{dq}] \quad (4.21)$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dq} \end{bmatrix} = & \left(-P(\theta_{PK})^{-1} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} P(\theta_{PK}) \end{bmatrix} - \frac{R_r}{L_r} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_{dq} \end{bmatrix} - \frac{I}{L_r} \begin{bmatrix} d_{ndq} \end{bmatrix} v_{dc} \\
 & + \frac{I}{L_r} \begin{bmatrix} v_{dq} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Nous pouvons vérifier de plus :

$$P(\theta_{PK})^{-1} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} P(\theta_{PK}) \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & -\omega \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \\ \omega \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

Ce qui nous permet d'obtenir grâce à l'équation (4.22) :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & -\omega \\ \omega & \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq} \end{bmatrix} - \frac{I}{L_r} \begin{bmatrix} d_{ndq} \end{bmatrix} v_{dc} + \frac{I}{L_r} \begin{bmatrix} v_{dq} \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

On obtient la représentation d'état de l'onduleur dans le plan 'dq0' grâce aux équations (4.16) et (4.24) :

$$\begin{aligned}
 L_r \frac{di_d}{dt} + R_r i_d &= v_d - d_{nd} v_{dc} + L_r \omega i_q & (4.25) \\
 L_r \frac{di_q}{dt} + R_r i_q &= v_q - d_{nq} v_{dc} - L_r \omega i_d \\
 \frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C_{dc}} d_{nd} i_d + \frac{1}{C_{dc}} d_{nq} i_q
 \end{aligned}$$

Ces équations représentent les équations dynamiques des courants I_d et I_q de l'onduleur. Elles sont couplées et non linéaires. Le couplage est dû à la présence des courants I_q et I_d respectivement dans les équations contenant le courant I_d et I_q . La non-linéarité est due aux termes d_{nd} et d_{nq} multipliant v_{dc} .

On pose : $u_d = L_r \frac{di_d}{dt} + R_r i_d$, $u_q = L_r \frac{di_q}{dt} + R_r i_q$ et $u_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt}$

On obtient alors :

$$\begin{aligned}
 u_d &= v_d - d_{nd} v_{dc} + L_r \omega i_q & (4.26) \\
 u_q &= v_q - d_{nq} v_{dc} - L_r \omega i_d \\
 u_{dc} &= d_{nd} i_d + d_{nq} i_q
 \end{aligned}$$

La méthode que l'on utilise effectue le découplage et la linéarisation de ces équations par le biais de nouvelles entrées équivalentes:

$$\begin{aligned}
 d_{nd} v_{dc} &= v_d^* & (4.27) \\
 d_{nq} v_{dc} &= v_q^*
 \end{aligned}$$

4.1.2.1 Loi de commande

On établit la loi de commande suivante pour l'onduleur:

$$\begin{aligned} v_d^* &= -u_d + v_d + L_r \omega i_q \\ v_q^* &= -u_q + v_q - L_r \omega i_d \end{aligned} \quad (4.28)$$

4.1.2.2 Définition des valeurs références

On définit les valeurs références des grandeurs à contrôler.

On fixe :

$$\begin{aligned} i_q^* &= -i_{statq} - i_{chq} \\ i_{dh}^* &= -i_{statdh} - i_{chdh} + i_{d0}^* \end{aligned} \quad (4.29)$$

D'après l'équation (4.26), on a :

$$u_{dc} = d_{nd} i_d + d_{nq} i_q$$

L'effort de commande attribué à cette boucle est :

$$i_{d0}^* = \frac{u_{dc} - d_{nq} i_q}{d_{nd}} = \frac{v_{dc} u_{dc} - v_{dc} d_{nq} i_q}{v_{dc} d_{nd}} \quad (4.30)$$

On suppose l'asservissement des courants idéal, on peut utiliser les propriétés suivantes :

$$v_{dc} d_{nq} = v_q = 0 \quad (4.31)$$

$$v_{dc} d_{nd} = v_d = \sqrt{\frac{3}{2}} \hat{v}$$

On obtient alors l'effort de commande suivant :

$$i_{d0}^* = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{v_{dc}}{\hat{v}} u_{dc} \quad (4.32)$$

u_{dc} représente la sortie du régulateur de tension

On fixe :

$$v_{dc}^* = 1200 \text{ V} \quad (4.33)$$

4.1.2.3 Schéma de la commande

On modélise la commande sur la Figure 4.2 :

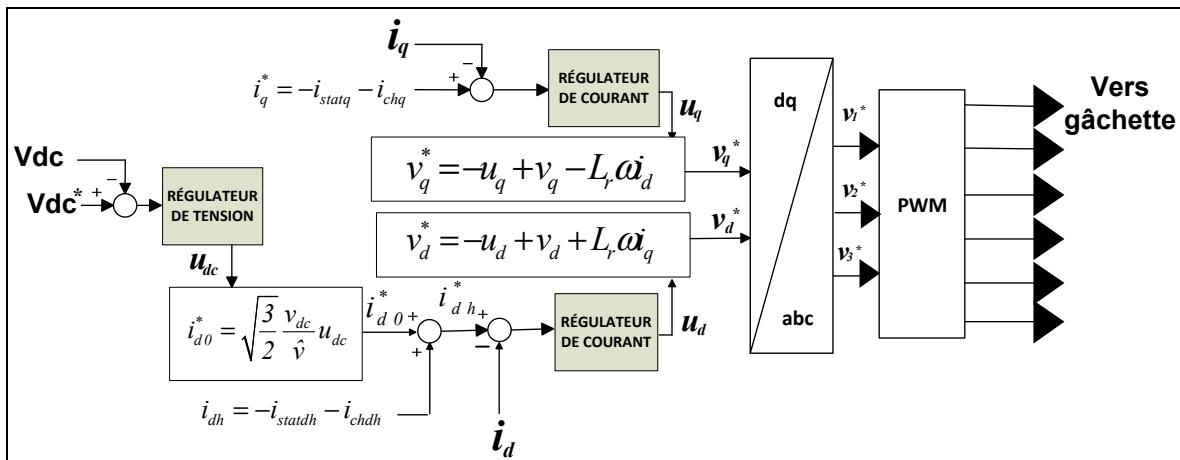


Figure 4.2 Schéma de commande non linéaire de l'onduleur

4.2 Commande indirecte dans le plan ‘abc’

4.2.1 Calcul des courants références

La commande indirecte est simple à mettre en place, la tension v_{dc} du bus DC est comparée avec une tension de référence v_{dc}^* , l'erreur engendrée est corrigée et nous permet d'obtenir une estimation du courant maximum de source I_{sm} . On capte les tensions du réseau

(v_a, v_b, v_c) pour calculer la valeur maximale qui est donnée par $v_m = \sqrt{\frac{2}{3}(v_a^2 + v_b^2 + v_c^2)}$.

Le vecteur unitaire est ainsi déduit en divisant chacune des tensions par v_m , les vecteurs sont donnés comme suit :

$$\begin{aligned} v_{ua} &= \frac{v_a}{v_m} & (4.34) \\ v_{ub} &= \frac{v_b}{v_m} \\ v_{uc} &= \frac{v_c}{v_m} \end{aligned}$$

Avec : (v_{ua}, v_{ub}, v_{uc}) les tensions unitaires de même fréquence que le réseau.

On multiplie ensuite les tensions unitaires (v_{ua}, v_{ub}, v_{uc}) par le courant maximum de source I_{sm} :

$$\begin{aligned} i_a^* &= i_{sm}^* \cdot v_{ua} & (4.35) \\ i_b^* &= i_{sm}^* \cdot v_{ub} \\ i_c^* &= i_{sm}^* \cdot v_{uc} \end{aligned}$$

Avec : (I_a^*, I_b^*, I_c^*) les courants référence.

4.2.2 Définition des valeurs des références

On compare ensuite les courants de référence aux courants du réseau I_{abc} (réseau) grâce au comparateur à Hystérésis. Celui-ci génère finalement les impulsions à l'onduleur.

On fixe la tension référence du bus continu v_{dc}^* :

$$V_{dc}^* = 1200 \text{ V} \quad (4.36)$$

4.2.3 Schéma de commande

On modélise la commande indirecte sur la Figure 4.3 :

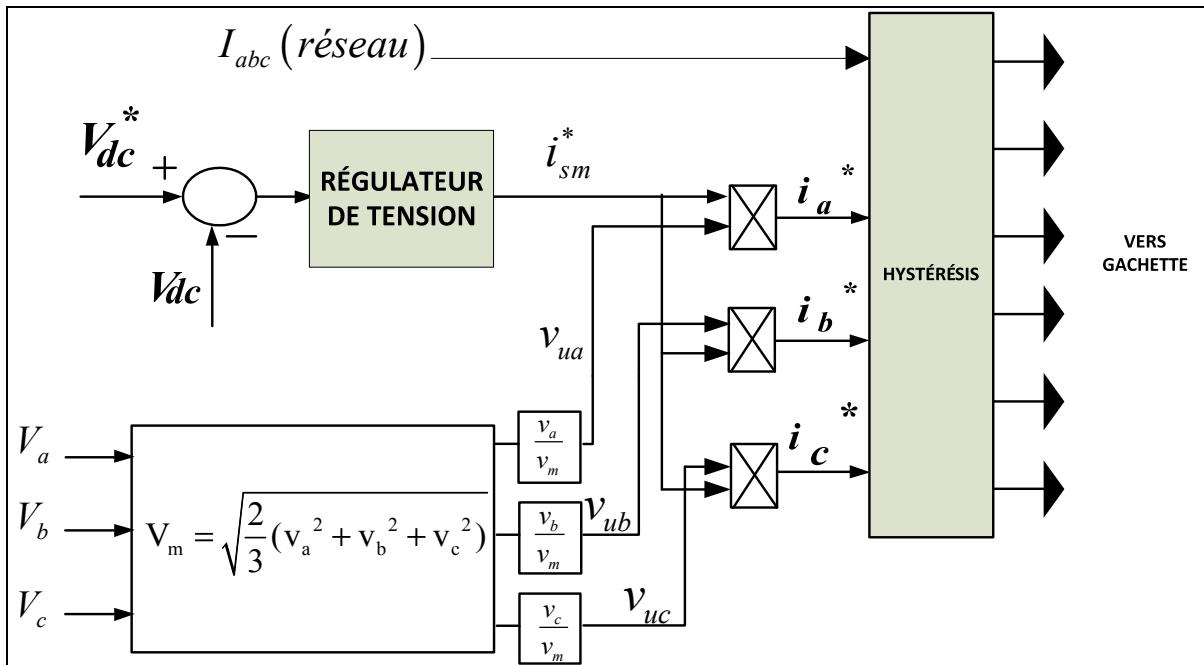


Figure 4.3 Schéma de la commande indirecte de l'onduleur

4.3 Commande indirecte dans le plan ‘dq0’

D'après l'équation (4.29), en supposant que l'éolienne envoie directement sa puissance vers

le réseau électrique ou bien on pose que le courant de charge est très faible devant le courant statorique de la MADA.

$$\begin{aligned}v_d &= L_r \frac{di_d}{dt} + R_r i_d + d_{nd} v_{dc} + L_r \omega i_q \\v_q &= L_r \frac{di_q}{dt} + R_r i_q + d_{nq} v_{dc} + L_r \omega i_d \\\frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{I}{C_{dc}} d_{nd} i_d + \frac{I}{C_{dc}} d_{nq} i_q\end{aligned}$$

Donc on peut écrire :

$$\begin{aligned}i_{sd} &= i_{statd} \pm i_d \\i_{sq} &= i_{statq} \pm i_q\end{aligned} \tag{4.37}$$

Avec : i_{sd} et i_{sq} courant du réseau.

Donc pour un fonctionnement hypo-synchrone :

$$\begin{aligned}i_d &= i_{statd} - i_{sd} \\i_q &= i_{statq} - i_{sq}\end{aligned} \tag{4.38}$$

On remplace l'équation (4.38) dans l'équation (4.25), on obtient :

$$\begin{aligned}
v_d &= L_r \frac{d(i_{statd} - i_{sd})}{dt} + R_r (i_{statd} - i_{sd}) + d_{nd} v_{dc} + L_r \omega (i_{statq} - i_{sq}) \quad (4.39) \\
v_q &= L_r \frac{d(i_{statq} - i_{sq})}{dt} + R_r (i_{statq} - i_{sq}) + d_{nq} v_{dc} - L_r \omega (i_{statd} - i_{sd}) \\
\frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C_{dc}} d_{nd} i_d + \frac{1}{C_{dc}} d_{nq} i_q
\end{aligned}$$

D'après l'équation (3.7), on a :

$$\begin{aligned}
\frac{di_{statd}}{dt} &= -\frac{L_m}{L_s} \frac{di_{dr}}{dt} \quad (4.40) \\
\frac{di_{statq}}{dt} &= -\frac{L_m}{L_s} \frac{di_{qr}}{dt}
\end{aligned}$$

D'après l'équation (3.15), on peut écrire:

$$\begin{aligned}
\frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r i_{rotd} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{statq}) + v_{dr}) \quad (4.41) \\
\frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{L_r \sigma} (-R_r i_{rotq} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{statd}) + v_{qr})
\end{aligned}$$

D'après les équations (4.41) et (4.42), on peut donc écrire :

$$\begin{aligned}
\frac{di_{statd}}{dt} &= \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} (-R_r i_{dr} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{statq}) + v_{dr}) \quad (4.42) \\
\frac{di_{statq}}{dt} &= \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} (-R_r i_{qr} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{statd}) + v_{qr})
\end{aligned}$$

On remplace $\frac{di_{statd}}{dt}$ et $\frac{di_{statq}}{dt}$ de l'équation (4.42) dans l'équation (4.39), on obtient :

$$\begin{aligned}
v_d &= -L_r \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} \left(-R_r i_{dr} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{statq}) + v_{dr} \right) \\
&\quad + d_{nd} v_{dc} + L_r \omega (i_{statq} - i_{sq}) + R_r (i_{statd} - i_{sd}) \\
v_q &= -L_r \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} \left(-R_r i_{qr} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{statd}) + v_{qr} \right) \\
&\quad + d_{nq} v_{dc} - L_r \omega (i_{statd} - i_{sd}) + R_r (i_{statq} - i_{sq})
\end{aligned} \tag{4.43}$$

$$\text{On pose : } u_{sd} = L_r \frac{di_{sd}}{dt} + R_r i_{sd} \quad \text{et} \quad u_{sq} = L_r \frac{di_{sq}}{dt} + R_r i_{sq}$$

On en déduit la loi de commande dans le cas général :

$$\begin{aligned}
d_{nd} v_{dc} &= -v_d + \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} \left(-R_r i_{dr} + \omega_r (L_r i_{qr} + L_m i_{statq}) + v_{dr} \right) - R_r i_{statd} \\
&\quad - L_r \omega (i_{statq} - i_{sq}) + u_{sd} \\
d_{nq} v_{dc} &= -v_q + \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} \left(-R_r i_{rotq} - \omega_r (L_r i_{dr} + L_m i_{statd}) + v_{qr} \right) - R_r i_{statq} \\
&\quad + L_r \omega (i_{statd} - i_{sd}) + u_{sq}
\end{aligned} \tag{4.44}$$

Pour une vitesse de rotation constante, on peut écrire que :

$$\frac{di_{statd}}{dt} = \frac{di_{statq}}{dt} = 0 \tag{4.45}$$

On remplace dans l'équation (4.39) et obtient donc :

$$\begin{aligned}
L_r \frac{di_{sd}}{dt} + R_r i_{sd} &= R_r i_{statd} + d_{nd} v_{dc} + L_r \omega (i_{statq} - i_{sq}) - v_d = u_{sd} & (4.46) \\
L_r \frac{di_{sq}}{dt} + R_r i_{sq} &= R_r i_{statq} + d_{nq} v_{dc} - L_r \omega (i_{statd} - i_{sd}) - v_q = u_{sq}
\end{aligned}$$

Ces équations représentent les équations dynamiques des courants de l'onduleur par rapport au courant du réseau. Elles sont couplées et non linéaires. Le couplage est dû à la présence des courants I_q et I_d respectivement dans les équations contenant le courant I_d . La non-linéarité est due aux termes d_{nd} et d_{nq} multipliant v_{dc} .

La commande que l'on utilise effectue le découplage et la linéarisation de ces équations par le biais de nouvelles entrées équivalentes :

$$\begin{aligned}
d_{nd} v_{dc} &= v_{sd}^* & (4.47) \\
d_{nq} v_{dc} &= v_{sq}^*
\end{aligned}$$

On pose : $u_{sd} = L_r \frac{di_{sd}}{dt} + R_r i_{sd}$, $u_{sq} = L_r \frac{di_{sq}}{dt} + R_r i_{sq}$

4.3.1 Loi de commande

On établit la loi de commande suivante pour l'onduleur:

$$\begin{aligned}
v_{sd}^* &= u_{sd} - R_r i_{statd} - L_r \omega (i_{statq} - i_{sq}) + v_d & (4.48) \\
v_{sq}^* &= u_{sq} - R_r i_{statq} + L_r \omega (i_{statd} - i_{sd}) + v_q
\end{aligned}$$

4.3.2 Définition des valeurs références

On définit les valeurs références des grandeurs à contrôler.

On fixe :

$$i_{sq}^* = 0 \quad (4.49)$$

D'après l'équation (4.32), on a :

$$i_d^* = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{v_{dc}}{\hat{v}} u_{dc}$$

u_{dc} représente la sortie du régulateur de tension. On fixe :

$$V_{dc}^* = 1200 \text{ V} \quad (4.50)$$

4.3.3 Schéma de la commande

On modélise la commande sur la Figure 4.4 :

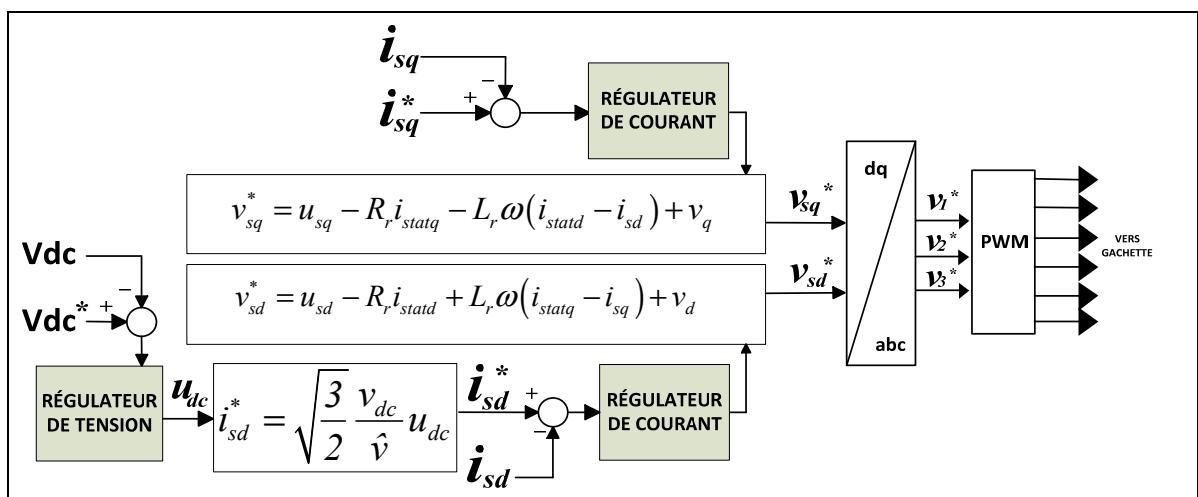


Figure 4.4 Schéma de commande indirecte dans le plan 'dq' de l'onduleur

4.4 Résultats de simulation

4.4.1 Introduction

Nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink pour la validation des algorithmes de commande appliquée à la MADA.

Nous avons réalisés trois simulations avec les commandes à l'onduleur:

- la simulation avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’ pour l’onduleur;
- la simulation avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’ pour l’onduleur;
- la simulation avec la commande non linéaire pour l’onduleur.

Pour le redresseur, nous avons gardé la même commande, à savoir, la commande vectorielle orientée au stator suivant l’axe q.

Les résultats observés sont :

- les simulations de la MADA en régime permanent : les courants dans la MADA, la tension V_{dc} , la vitesse du rotor, les courants dans l’onduleur, les courants et la tension dans le réseau électrique;
- les simulations de la MADA avec variation de la charge;
- les simulations de la MADA en régime dynamique lors du passage du fonctionnement hypo-synchrone vers hyper-synchrone;
- les simulations de la MADA avec le réseau électrique déséquilibré.

4.4.2 Résultat de simulation avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’

4.4.2.1 Régime permanent

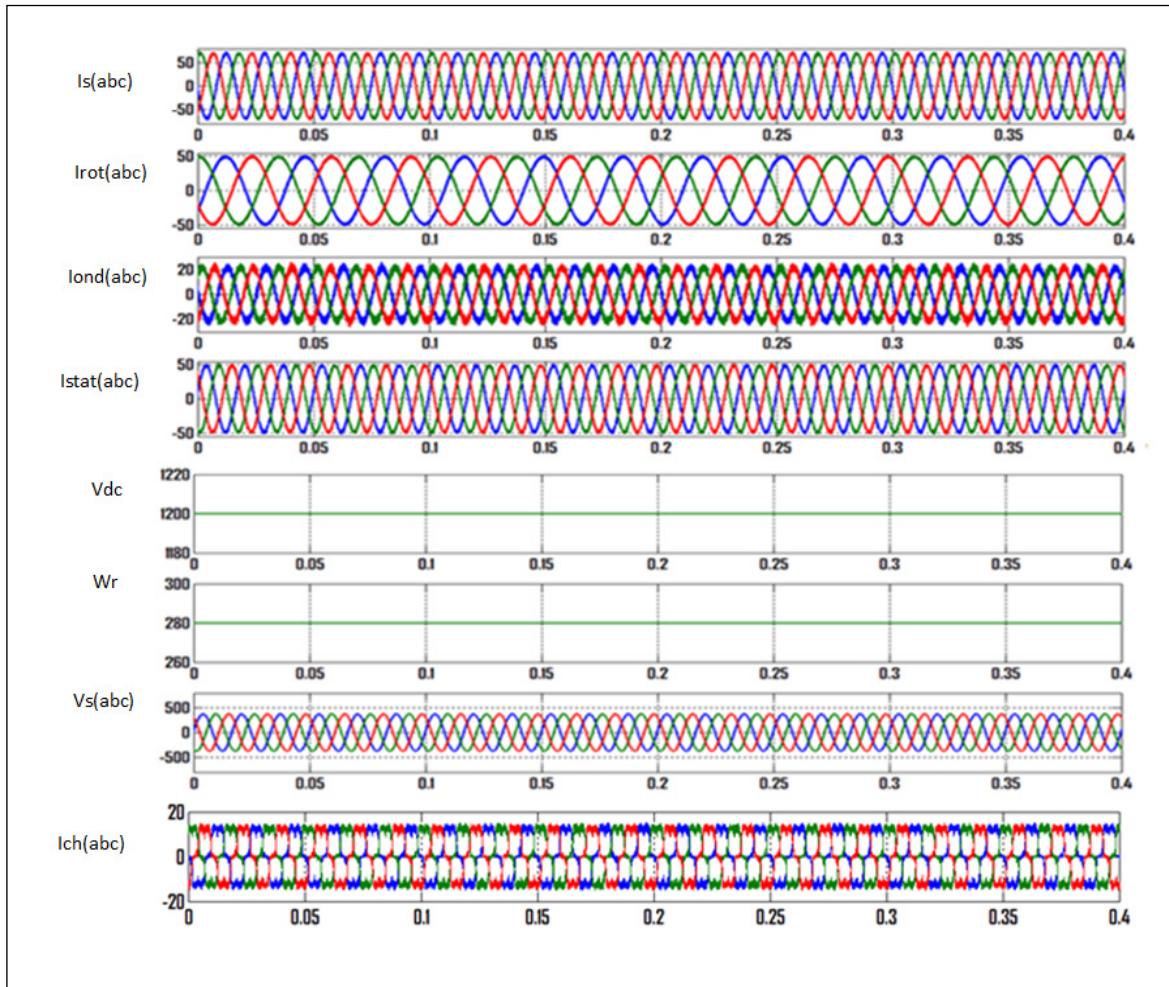


Figure 4.5 Réponse en régime permanent avec commande indirecte dans le plan ‘abc’

Dans la figure 4.5 sont représentés les courants au réseau (i_s), les courants au rotor (i_{rot}), les courants de l'onduleur (i_{ond}), les courants au stator (i_{stat}), la tension du bus dc (v_{dc}), la vitesse du rotor et la tension du réseau (V_s). On observe que les courants du réseau sont sinusoïdaux et en phase avec les tensions du réseau, ce qui confirme que l'onduleur compense parfaitement les courants harmoniques et la puissance réactive consommée d'une part par la charge et d'autre part la puissance réactive consommée par la machine asynchrone. On

remarque aussi que la fréquence des courants rotoriques est différente de la fréquence des courants du réseau. La tension du bus dc est parfaitement maintenue à sa valeur de référence à 1200V, de même que la vitesse du rotor est régulée à 280 rad/s.

4.4.2.2 Régime dynamique

Variation de charge, impact sur les courants :

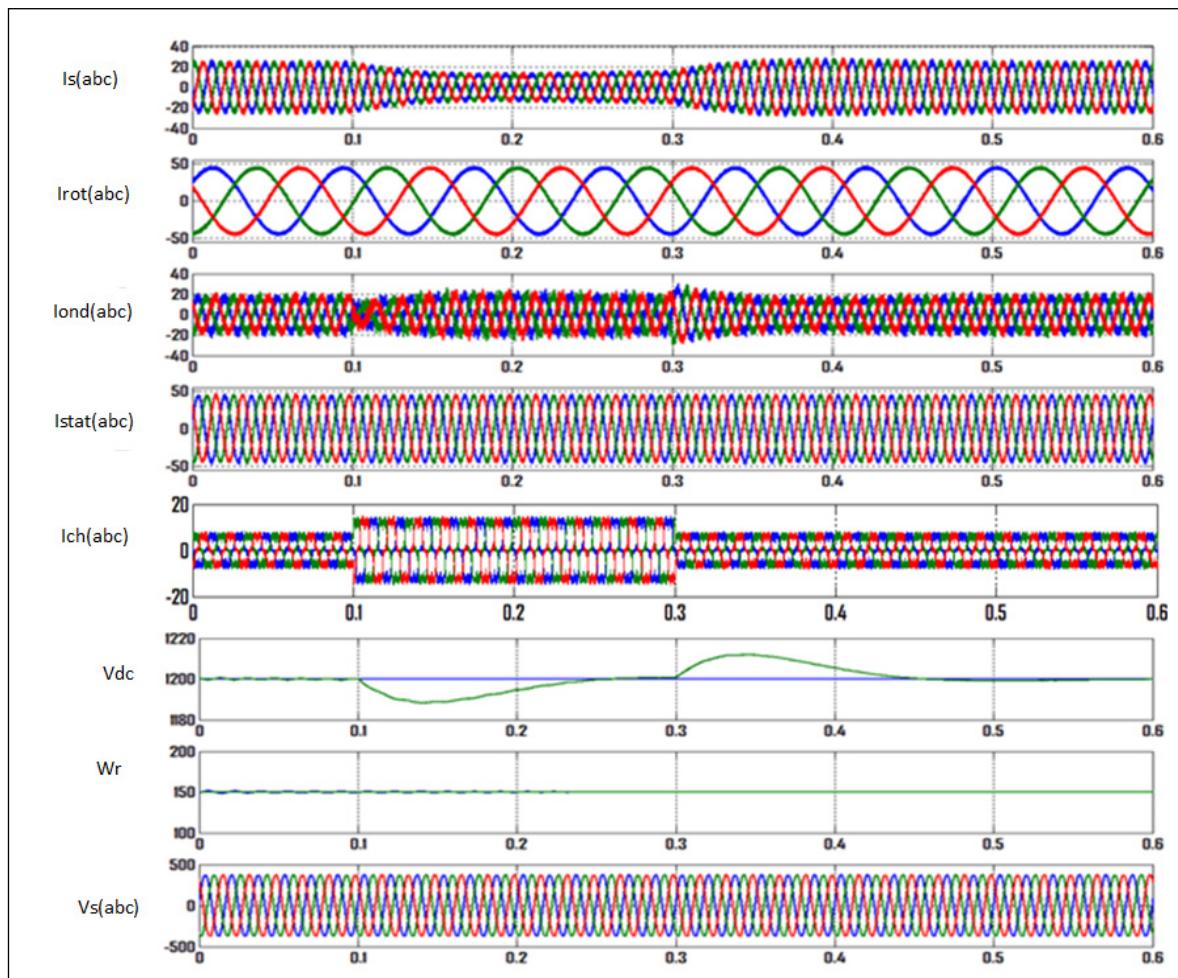


Figure 4.6 Réponse en régime dynamique avec variation de la charge avec la commande indirecte dans le plan 'abc'

On a introduit une charge non linéaire variable dans le circuit. On observe entre $t= 0.1$ s et $t= 0.3$ s une augmentation du courant dans la charge. Cette augmentation est due à

l'augmentation de la puissance active consommée par la charge. Elle provoque une diminution du courant dans le réseau. A $t = 0.3$ s, le courant de charge diminue et inversement le courant du réseau augmente.

Passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, impact sur les courants :

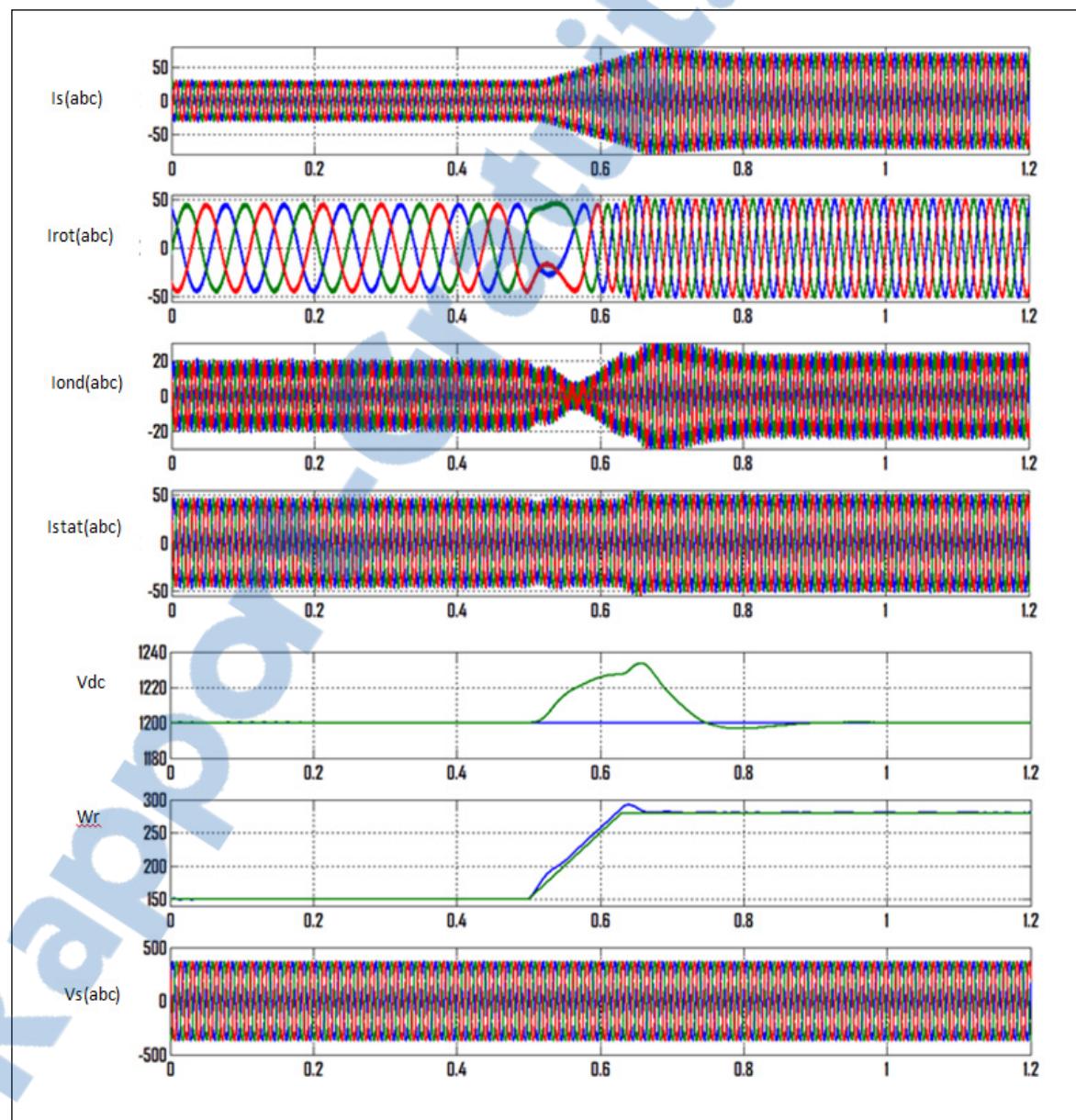


Figure 4.7 Réponse en régime dynamique avec commande indirecte dans le plan 'abc'

On observe le courant au rotor (i_{rot}) qui passe par trois phases:

- la première phase entre $t= 0$ s et $t= 0.5$ s, la machine asynchrone fonctionne en mode hypo-synchrone, la vitesse de rotation est fixée à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme ($\Omega_s = 180$ rd/s), le rotor absorbe de la puissance active;
- la deuxième phase entre $t= 0.5$ s et $t=0.6$ s, il y a inversion du courant rotorique, c'est l'étape de transition du passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, la vitesse passe de 150 rd/s à 280 rd/s;
- la troisième phase entre $t= 0.6$ s et $t=1.2$ s, La machine asynchrone fonctionne en mode hyper-synchrone, dans ce cas là, le rotor produit de la puissance active. Durant cette phase le réseau reçoit le courant du stator et le courant du rotor qui transite via l'onduleur. Cette troisième phase donne le meilleur rendement.

Le changement du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone intervient lorsque la vitesse du rotor augmente et dépasse la vitesse de synchronisme de la machine asynchrone. Ici la vitesse de synchronisme est égale à 180 rad/s. On observe en effet que la vitesse du rotor augmente et passe au-dessus de 180 rad/s à $t= 0.52$ s. Cela correspond au changement du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone. De plus on observe une augmentation de l'amplitude des courants au réseau (i_s), au stator (i_{stat}) et à l'onduleur (i_{ond}) lorsque la MADA passe en mode hyper-synchrone. La tension dans le bus DC (v_{dc}) est bien régulée à 1200V. Lors du passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone à $t=0.52$ s, on observe un dépassement de 2% pendant 200 ms (1220V au lieu de 1200V).

La tension dans le réseau (V_s) n'est pas perturbée par le passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone de la MADA.

Variation de la charge, impact sur les puissances :

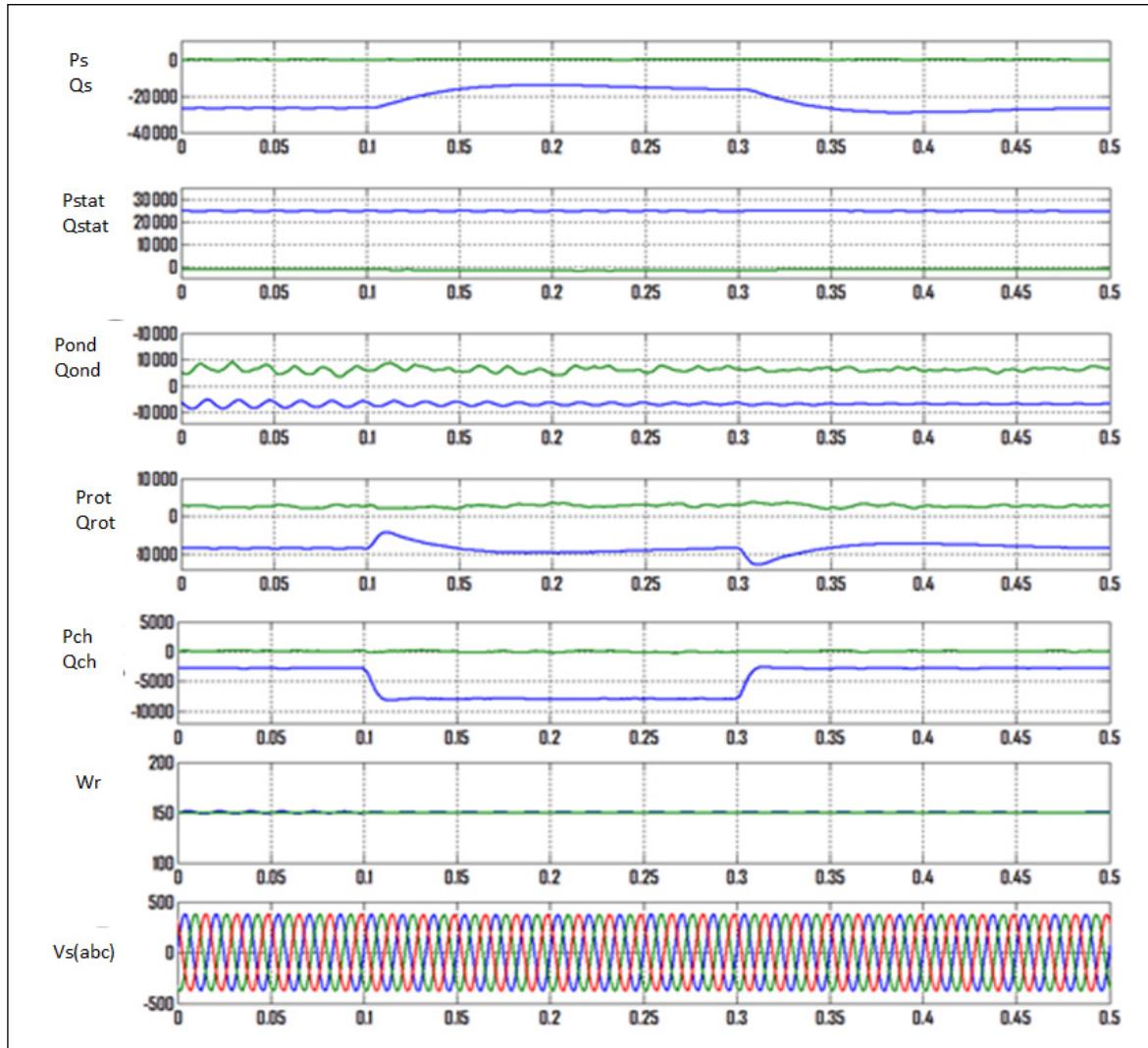


Figure 4.8 Écoulement des puissances lors de la variation de la charge avec la commande indirecte dans le plan 'abc'

Entre $t = 0.1$ s et $t = 0.3$ s (mode hypo-synchrone), on observe une augmentation de la puissance active de la charge. L'augmentation de la charge ne perturbe pas le fonctionnement de la MADA. Il y a bien conservation des puissances active.

Passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, impact sur les puissances :

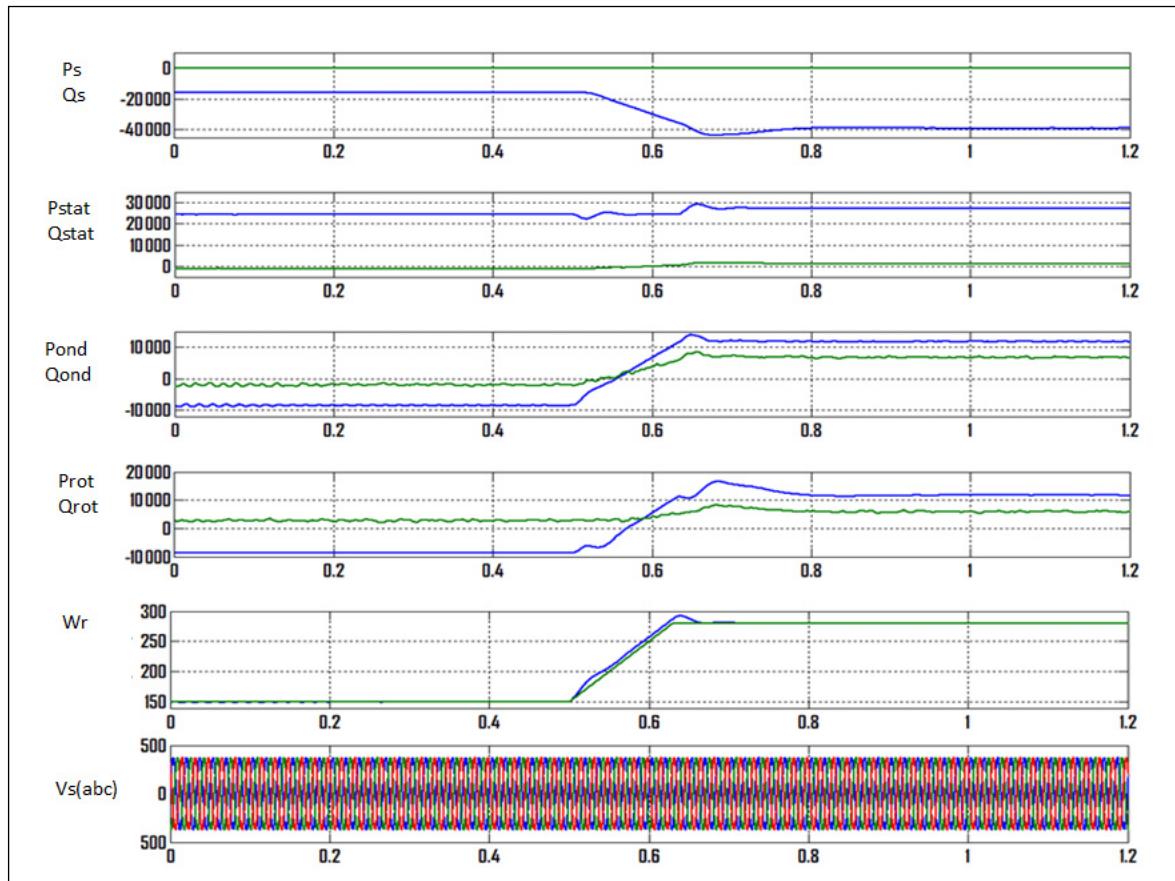


Figure 4.9 Écoulement des puissances en régime dynamique avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’

On observe d'abord la courbe 'vitesse du rotor', à partir de $t=0.52$ s, la vitesse passe au-dessus de 180 rad/s, la MADA passe alors du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone. On observe que la puissance réactive fournie par le réseau est nulle (courbe verte) et la puissance active (courbe bleue) correspond à la puissance active délivrée par l'éolienne au réseau (puissance active du stator + puissance active du rotor + puissance active consommée par la charge).

Entre le $t=0$ s et le $t= 0.55$ s, la MADA fonctionne en mode hypo-synchrone, seul le stator fournit de la puissance active tandis que le rotor absorbe de la puissance active du réseau électrique. Entre $t=0.55$ s et $t=1.2$ s, la MADA fonctionne en mode hyper-synchrone, le stator et le rotor fournissent de la puissance active au réseau.

4.4.3 Résultats de simulation avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’

4.4.3.1 Régime permanent

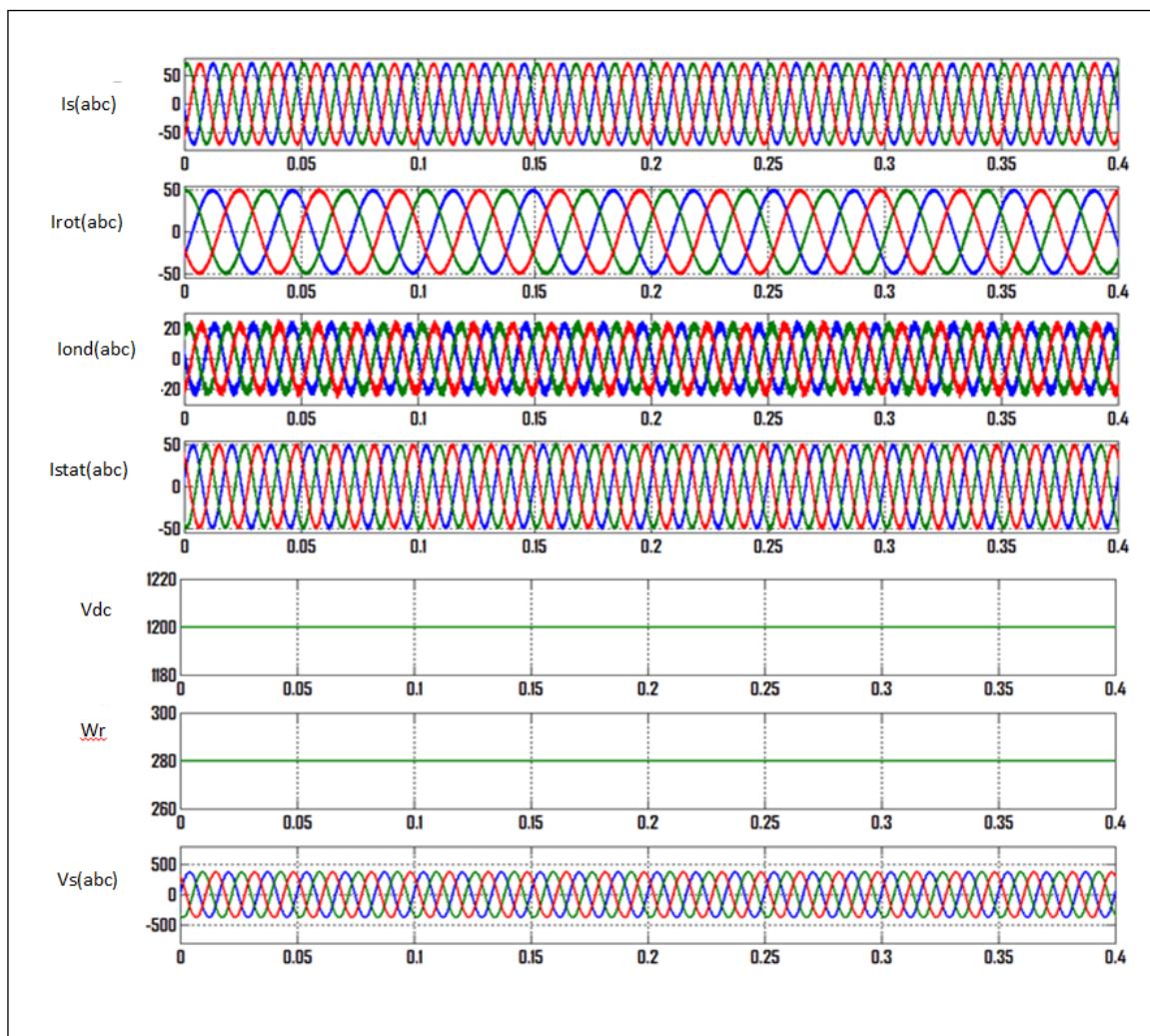


Figure 4.10 Réponse en régime permanent avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’

Les résultats en régime permanent de la MADA avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’ pour l’onduleur sont similaires avec les résultats en régime permanent de la MADA avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’. Les courants au réseau, au rotor, au stator et au niveau de l’onduleur sont sinusoïdaux. La fréquence du courant du réseau, du courant du stator et du courant dans l’onduleur sont identiques. La tension V_{dc} et la vitesse dans le rotor sont bien régulées.

4.4.3.2 Régime dynamique

Passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, impact sur les courants :

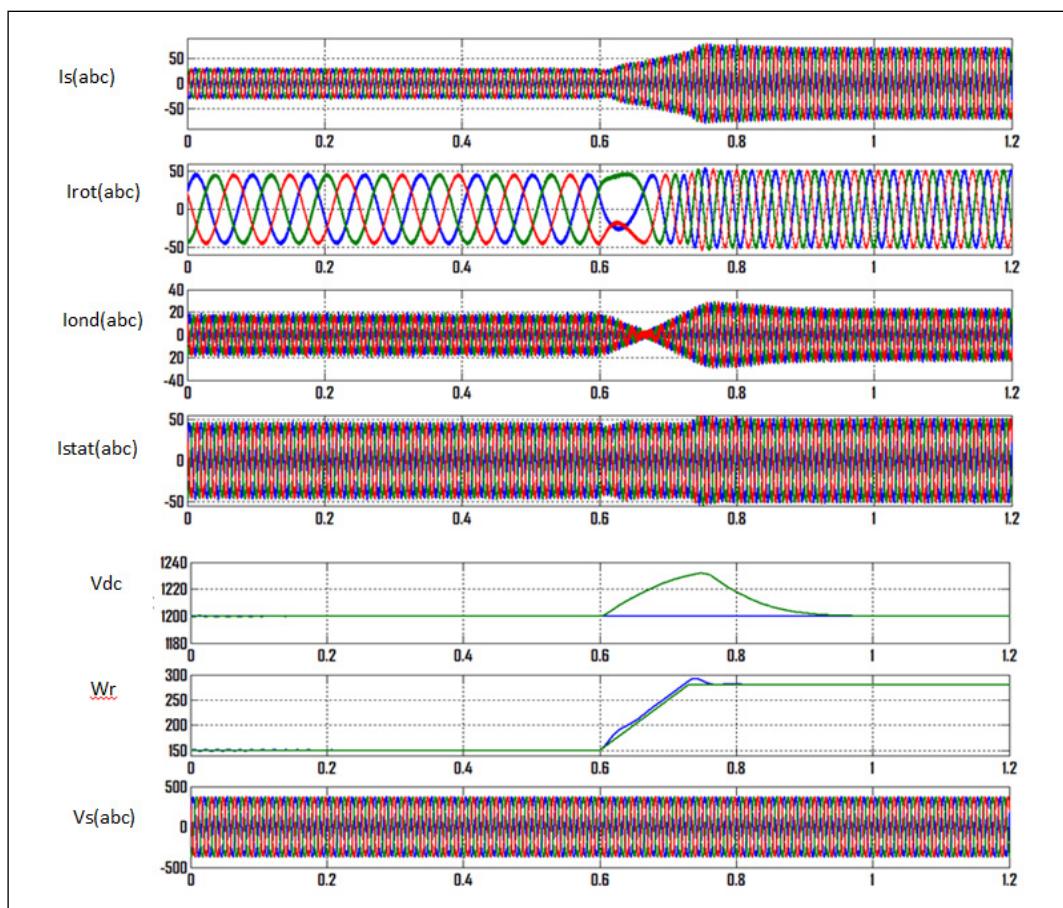


Figure 4.11 Réponse en régime dynamique avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’

Les résultats en régime dynamique de cette MADA sont quasi similaires à ceux de la MADA contrôlée avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’. Le passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone s’effectue à $t = 0.62$ s lorsque la vitesse du rotor dépasse la vitesse de synchronisme (180 rad/s). Ce passage provoque une inversion des phases et une augmentation de la fréquence dans le courant du rotor. Lorsque la MADA fonctionne en mode hyper-synchrone, elle fournit d’avantage de puissance au réseau, on constate sur la figure que le courant dans le réseau augmente pendant le mode hyper-synchrone. Chaque grandeur électrique présente les résultats escomptés.

Passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, impact sur les puissances :

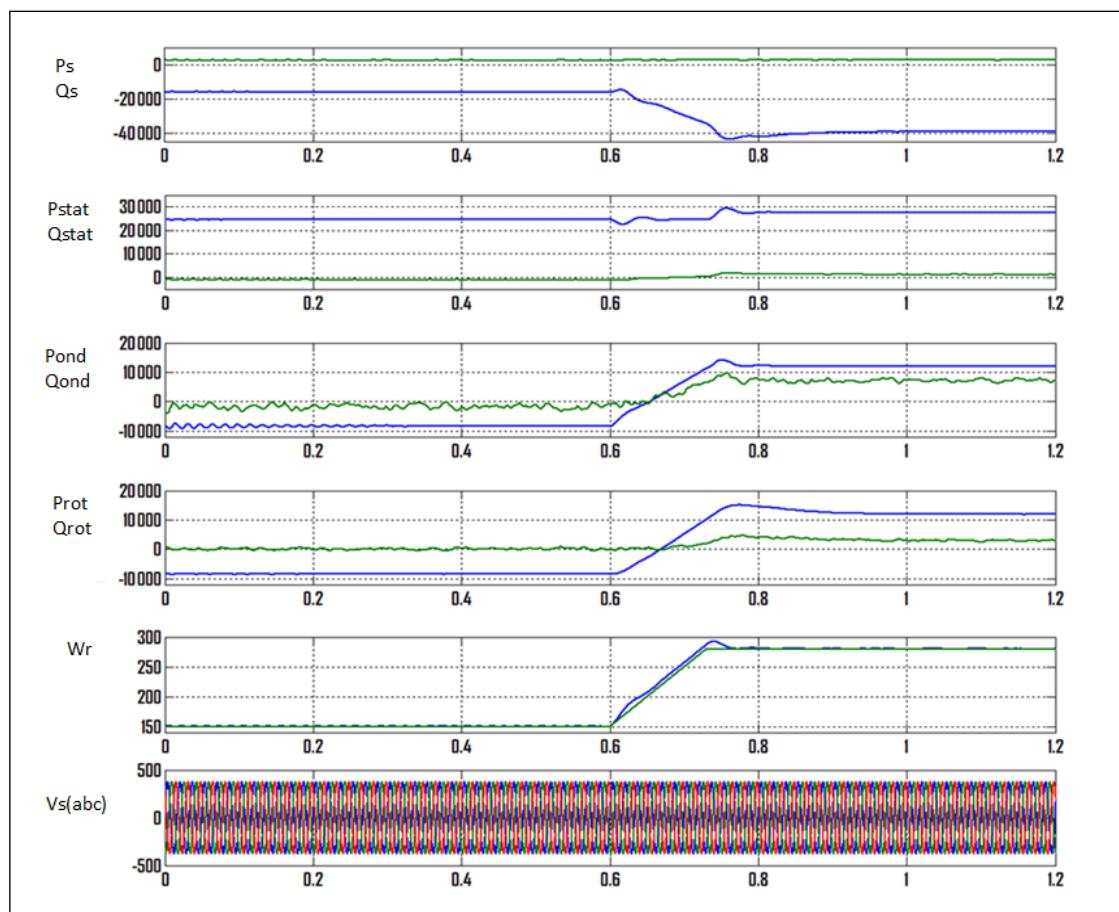


Figure 4.12 Écoulement des puissances en régime dynamique avec la commande indirecte dans le plan ‘dq0’

Le passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone provoque un changement de signe de la puissance active dans l'onduleur (et dans le rotor), celle-ci devient positive. Ainsi la MADA produit d'avantage de puissance. On observe une distribution des puissances : la somme des puissances actives au réseau, au rotor et au stator est égale à 0 quel que soit le mode de fonctionnement de la MADA.

4.4.4 Résultats de simulation avec la commande non-linéaire

4.4.4.1 Régime permanent

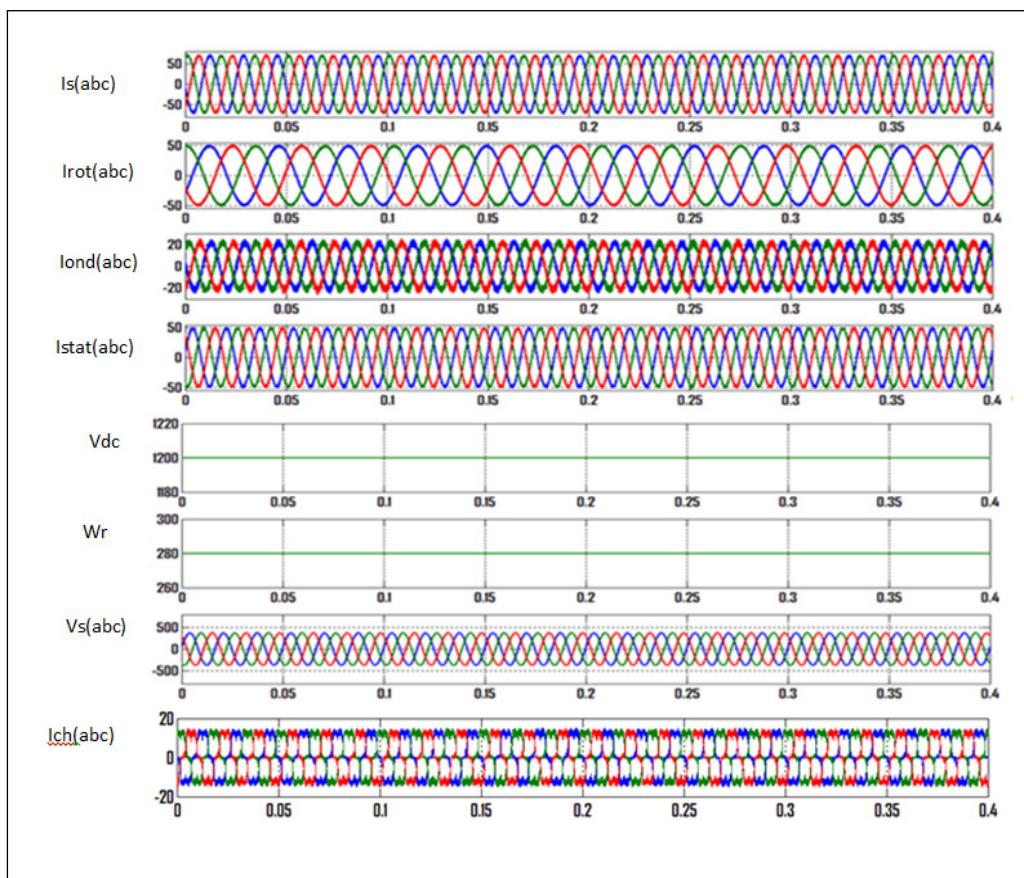


Figure 4.13 Réponse en régime permanent avec commande non linéaire

Les résultats en régime permanent de la MADA avec la commande non linéaire pour l'onduleur sont similaires avec les résultats en régime permanent de la MADA avec les commandes indirectes. Les courants au réseau, au rotor, au stator et au niveau de l'onduleur

sont sinusoïdaux, de fréquence et d'amplitudes constantes. La fréquence du courant du réseau, du courant du stator et du courant dans l'onduleur sont identiques. La tension V_{dc} et la vitesse dans le rotor sont bien régulées. Pour la commande non linéaire, la charge est placée du côté statorique.

4.4.4.2 Régime dynamique

Variation de la charge, impact sur les courants:

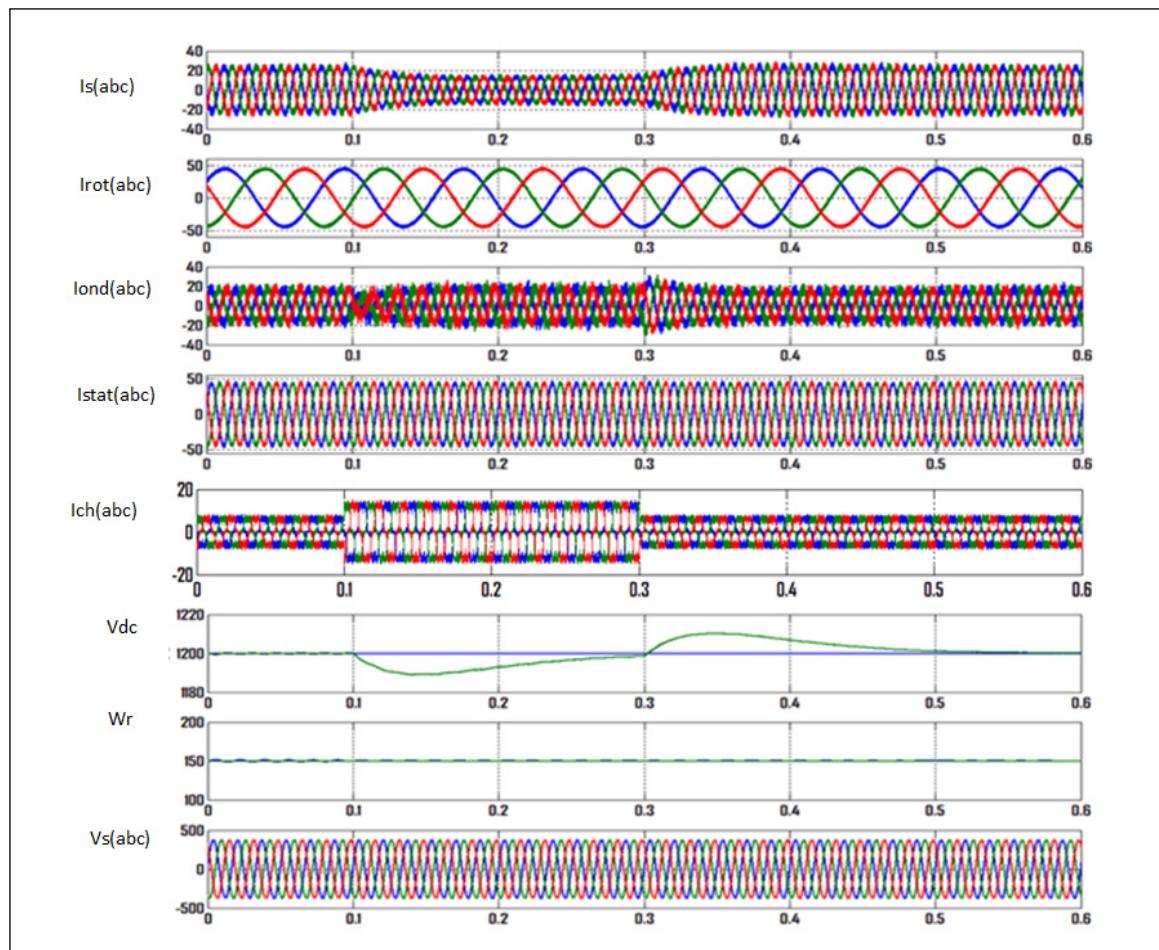


Figure 4.14 Réponse en régime dynamique avec variation de charge et avec la commande non linéaire

Comme pour la simulation avec la commande indirecte, l'augmentation de la charge (donc du courant dans la charge) entre $t=0.1$ s et $t=0.3$ s engendre une diminution du courant du réseau.

Passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone impact sur les courants:

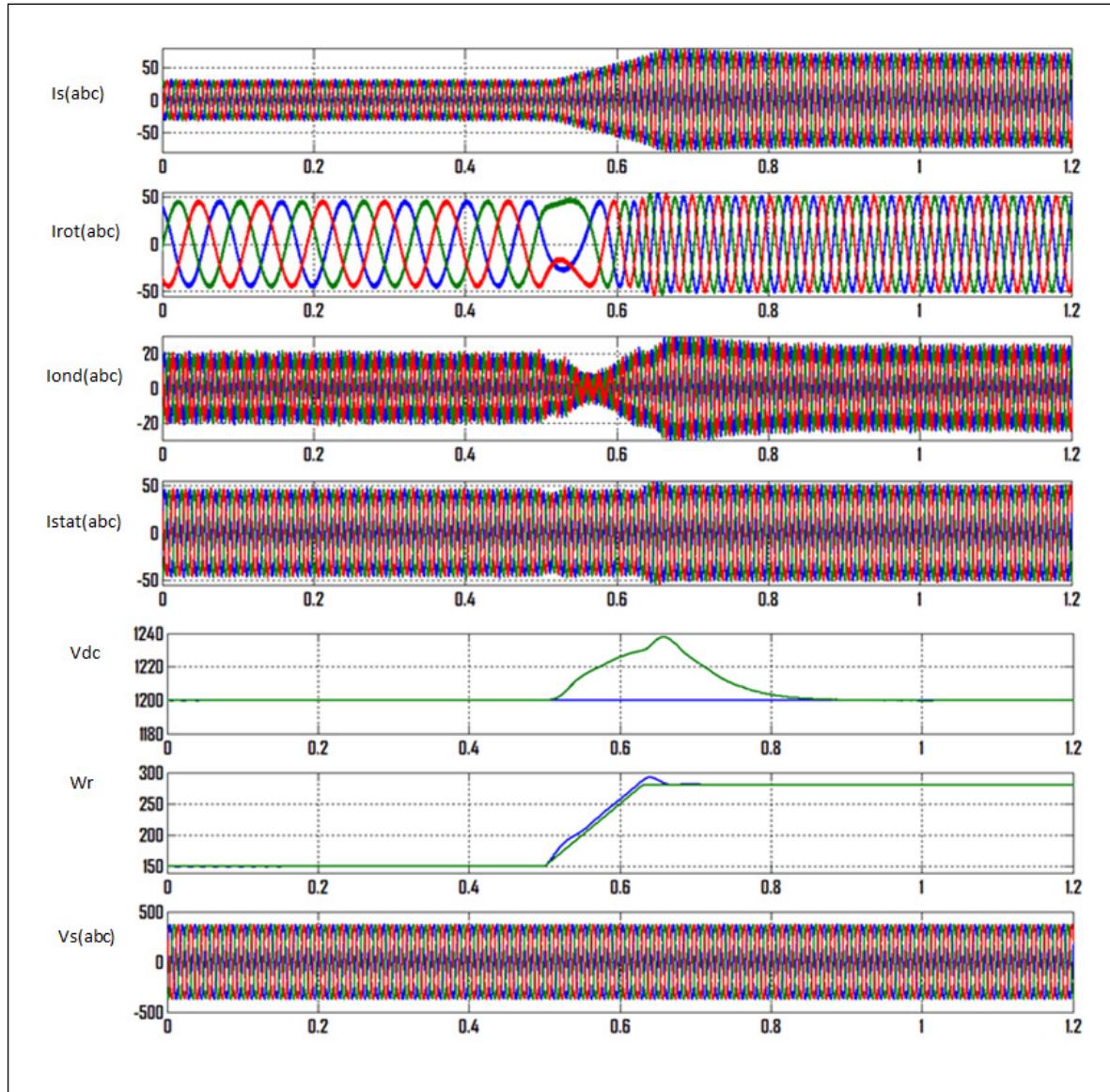


Figure 4.15 Réponse en régime dynamique avec commande non linéaire.

Les résultats en régime dynamique de cette MADA sont quasi similaires à ceux de la MADA contrôlée avec les commandes indirectes. Le passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone à $t=0.52$ s lorsque la vitesse du rotor dépasse la vitesse de synchronisme (180rad/s) provoque une inversion des phases et une augmentation de la fréquence dans le courant du rotor. Lorsque la MADA fonctionne en mode hyper-synchrone, elle fournit d'avantage de puissance au réseau. On constate sur la figure que le courant dans le réseau augmente pendant le mode hyper-synchrone. Chaque grandeur électrique présente les résultats escomptés.

Variation de la charge, impact sur les puissances :

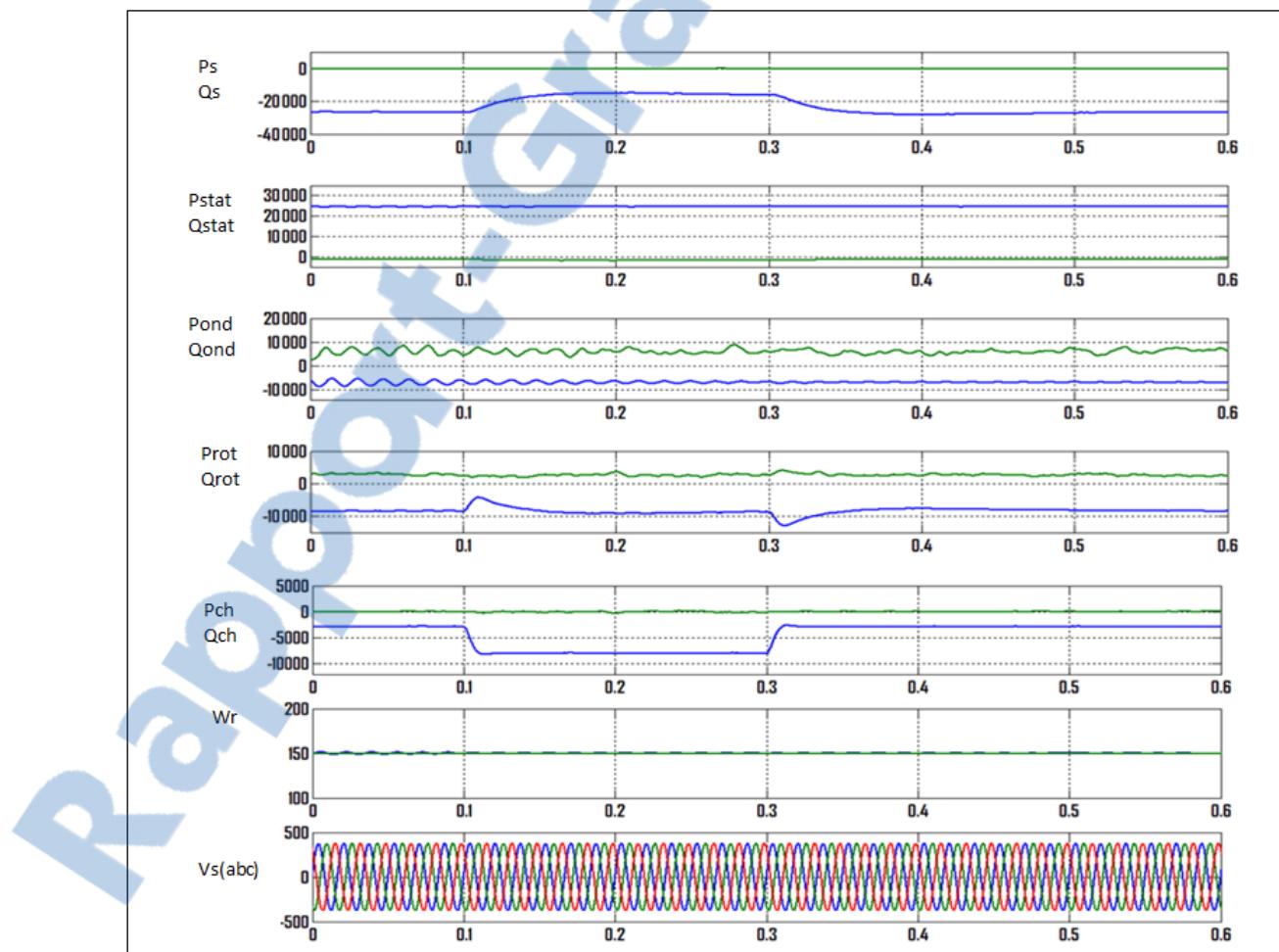


Figure 4.16 Écoulement des puissances avec variation de charge avec la commande non linéaire

On observe une compensation des puissances actives, si l'on additionne les puissances actives au réseau, au stator à la charge et au niveau de l'onduleur, on obtient 0. L'augmentation de la charge entre $t= 0.1$ s et $t=0.3$ s engendre une diminution de la puissance absorbée par le réseau. Ces résultats sont les résultats souhaités.

Passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone, impact sur les puissances :

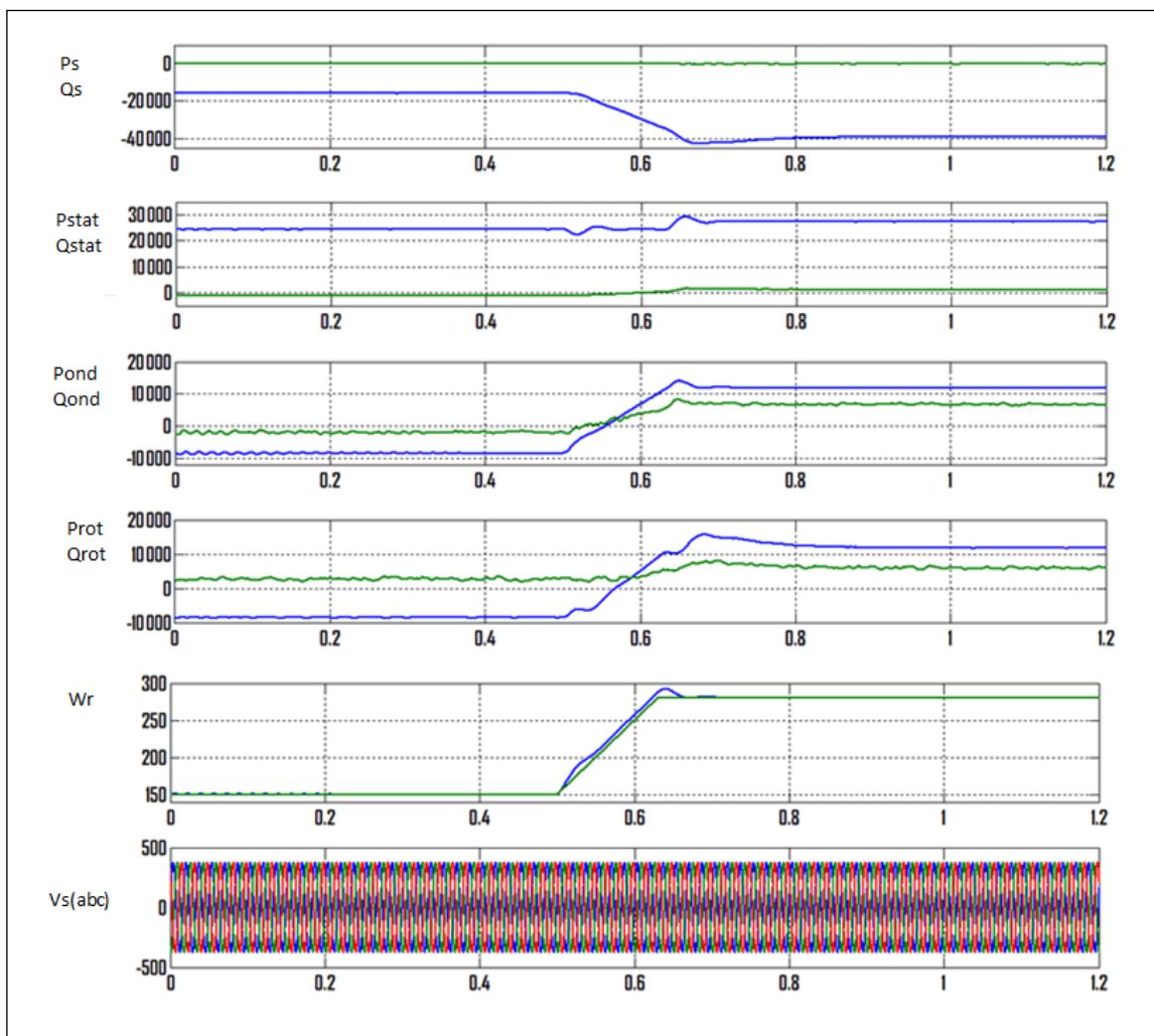


Figure 4.17 Écoulement des puissances en régime dynamique avec commande non linéaire

Le passage du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone provoque un changement de signe de la puissance active dans l'onduleur (et dans le rotor), celle-ci devient positive. Et

ainsi la MADA produit d'avantage de puissance. On observe une compensation des puissances, la somme des puissances actives au réseau, au rotor et au stator est égale à 0 quel que soit le mode de fonctionnement de la MADA.

4.5 Résultats de simulation avec détérioration de tension sur le réseau

4.5.1 Détérioration de la tension sur le réseau

Il existe différents types de creux de tension. Chaque creux de tension est caractérisé par sa durée et son amplitude. En effet, un creux de tension peut durer quelques millisecondes comme plusieurs secondes. Le creux peut faire chuter la tension à 20% de sa valeur référence. Les creux de tension peuvent affecter le fonctionnement de l'industrie et sont à l'origine de nombreuses pertes économiques.

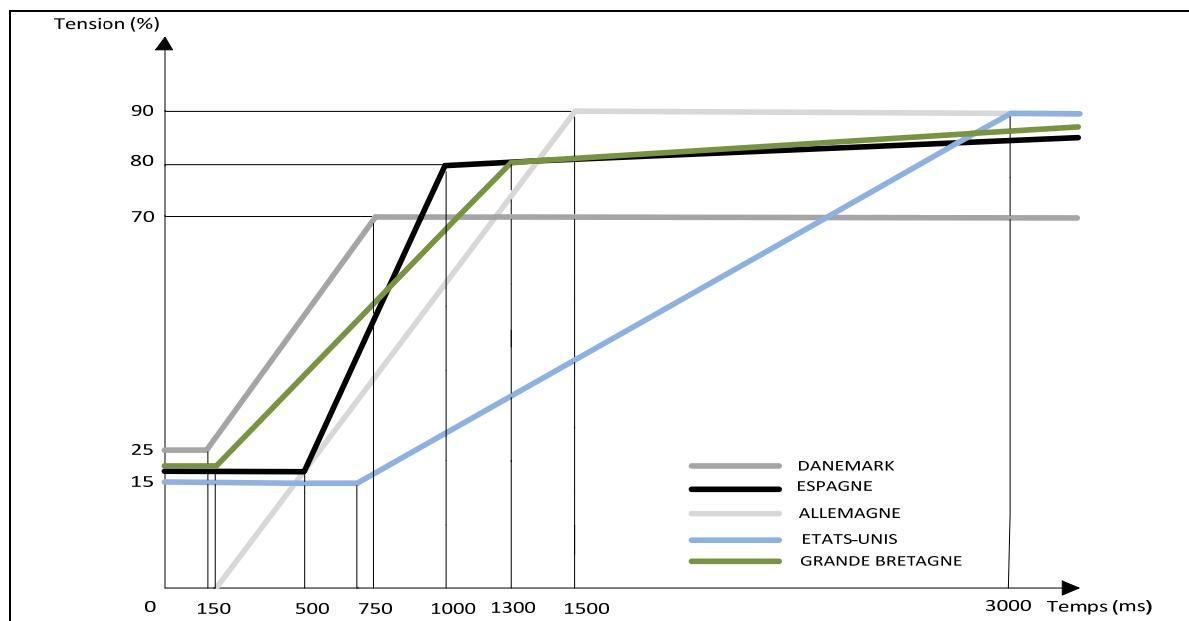


Figure 4.18 Profil des creux de tension dans différents pays (Iov, 2007)

Le schéma de la Figure 4.18 témoigne des creux de tension recensés dans 5 pays développés. On observe par exemple la courbe bleue représentant les creux de tension moyens aux États-Unis. Le creux reste 0.75 seconde à 15% de sa valeur de tension normale, puis après 0.75

seconde, le creux diminue jusqu'à retrouver la tension initiale au bout de 3 secondes. On peut donc en déduire que le creux de tension a duré 3 secondes. Évidemment plus le réseau est stable moins il y a de creux de tension. Voici un schéma des profils des creux de tension du réseau de 5 pays différents développés (Iov, 2007).

Durant la transmission et l'utilisation de l'énergie électrique, la tension du réseau n'est pas toujours stable, sa qualité varie. On peut observer différents types de variations de tension sur un réseau électrique (Chandra, 2009):

- les variations de la valeur de crête ou de la valeur efficace;
- la surtension temporaire : la valeur efficace de la tension dépasse la valeur nominale de 10 à 80% pendant 0.5 cycles à 1 minute;
- le creux de tension : la valeur efficace de la tension est en dessous de la valeur nominale de 10 à 90% pendant 0.5 cycles à 1 minute;
- les coupures brèves ou prolongées;
- le papillonnement : variations aléatoires et répétitives de la valeur efficace entre 90 et 100% de la valeur nominale (fluctuation lente);
- la tension de choc : brefs pics de tension;
- un déséquilibre de phases : déformation de l'onde.

Le phénomène creux de tension est généralement produit lors d'un branchement de grosses charges ou lors d'un court-circuit, ce dernier est le phénomène le plus rependu en termes de détérioration de tension sur le réseau. On distingue plusieurs types de creux de tension, ils peuvent être symétriques (défaut identiques sur trois phases) ou asymétriques (défaut différents sur une, deux ou trois phases).

La qualité de l'énergie électrique sur le réseau dépend de l'onde, du courant ou de la tension du réseau. Sa qualité, si elle est mauvaise peut engendrer de nombreux dysfonctionnements et dégâts sur les appareils des clients. En général, la cause est un problème de compatibilité, la question à se poser est : l'équipement connecté au réseau est-il compatible avec les événements apparaissant sur celui-ci ? Le réseau et ses détériorations sont-ils compatibles

avec l'équipement qui lui est connecté? Ces problèmes ont deux issues : soit améliorer la qualité de l'onde, soit améliorer l'équipement. On dit que le réseau est de bonne qualité si :

- l'onde est parfaitement sinusoïdale;
- l'amplitude est constante;
- la fréquence est constante.

Pour améliorer les équipements, on peut leur intégrer des filtres électroniques qui permettent de réduire les harmoniques, on peut aussi leur intégrer des condensateurs qui agiront en cas de surtension. Une autre méthode consiste à installer une alimentation sans interruption qui se déconnecte du réseau lorsque celui-ci se détériore. La qualité des ondes du réseau dépend de plusieurs critères, Elle peut être détériorée par:

- une mauvaise utilisation du réseau par un client (déconnexion d'une grosse charge inductive). Ce client utilisant une charge non linéaire peut ainsi créer des courants de défaut, de coup de foudre ou des harmoniques, ce qui va causer par exemple une distorsion de tension;
- un coup de foudre ou arc électrique;
- un court-circuit dans le réseau;
- des courants importants dus au démarrage de machines électriques.

C'est donc soit le fournisseur d'électricité, soit le client qui est responsable de la pollution du réseau électrique. Le réseau s'engage à fournir une tension sans pollution. Le client s'engage à ne pas générer des harmoniques de courant et de tension dépassant la limite permise. On peut parler de répartition des responsabilités. Les détériorations de tension peuvent mener à l'interruption d'importants processus industriels et donc à des défauts de production importants qui peuvent coûter très cher. De ce fait, le cout de ces détériorations de tension est de plusieurs milliards de dollars chaque année. Différentes études ont été effectuées sur des réseaux comprenant des éoliennes. Généralement, les éoliennes sont déconnectées du réseau

lors des détériorations de tension pour éviter des dégâts matériels. Dans notre cas, nous allons devoir commander la MADA pour qu'elle fonctionne correctement et qu'elle ne soit pas perturbée lorsque le réseau présente une détérioration de tension du type creux de tension ou déséquilibre de la tension.

4.5.2 Conséquence sur la MADA de la détérioration de tension sur le réseau

Des perturbations de la tension du réseau vont engendrer des problèmes pour la machine asynchrone (Peng, 2010). Un courant de défaut dans le rotor et une surtension dans le bus continu DC (Holdsworth, 2003). Ce courant de défaut peut détruire les convertisseurs de puissance qui ne sont pas dimensionnés pour supporter les aléas du réseau. La première stratégie va être de limiter le courant de défaut au stator pour logiquement éviter le courant de défaut dans le rotor et donc la surtension dans le bus continu DC.

Pour permettre à la MADA de fonctionner durant les détériorations de tension, sans prendre le risque de détruire les convertisseurs de puissance, on utilise la commande vectorielle pour le redresseur et la commande non linéaire pour l'onduleur.

Initialement, la commande utilisée pour contrôler l'onduleur était la commande indirecte. Or celle-ci, comme présenté dans le chapitre 4, dépend de la tension du réseau. Lorsque celui-ci subit une perturbation, la régulation du bus DC est perturbée et le courant au réseau est de ce fait perturbé. On obtient donc une éolienne qui ne fonctionne pas correctement lors d'une détérioration de tension.

4.5.3 Résultats de simulation pendant une détérioration de tension avec la commande indirecte dans le plan ‘abc’

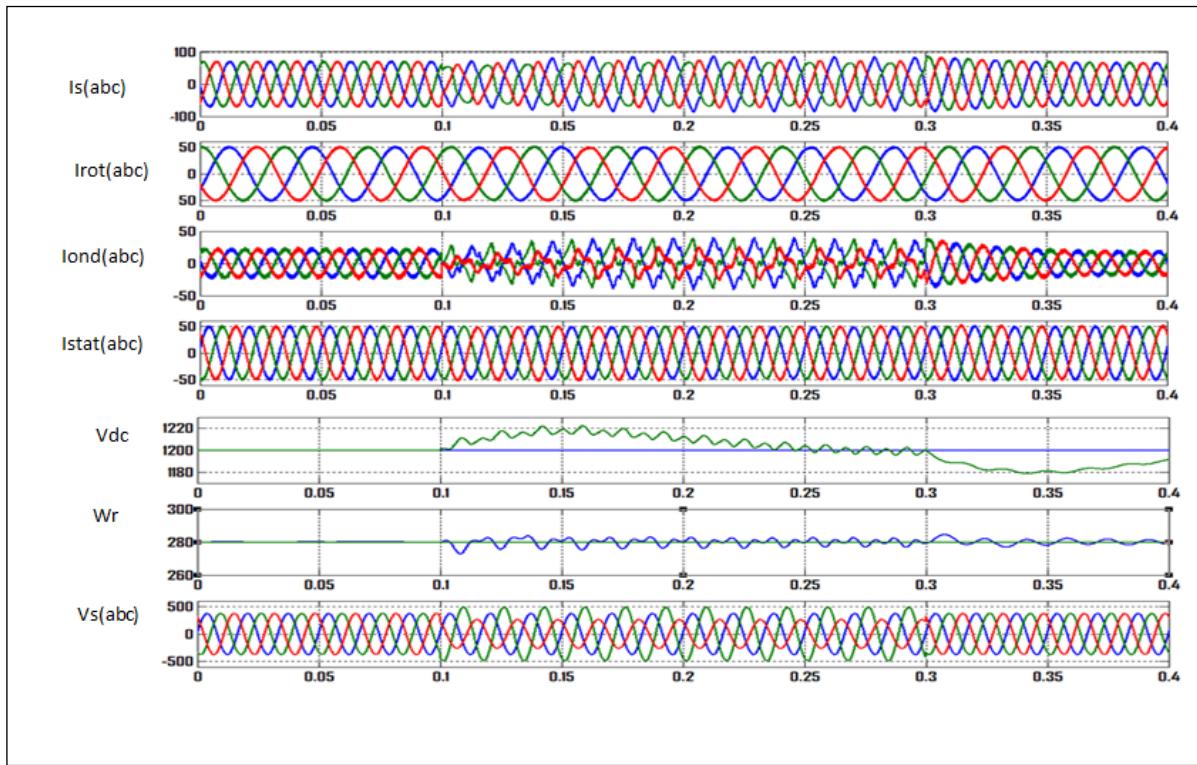


Figure 4.19 Réponse en régime permanent pendant une détérioration de tension avec la commande indirecte

On observe que la tension dans le réseau (V_s) est déséquilibrée entre $t=0.1$ s et $t=0.3$ s. L'une des phases est 30% supérieure à sa valeur initiale, une autre phase n'a pas évolué et la dernière phase est 30% inférieure à sa valeur initiale. On observe une déformation du courant dans le réseau, amplitudes différentes et le signal n'a plus une forme sinusoïdale. De plus la tension V_{dc} présente des déformations (oscillations). On constate donc que ce modèle de MADA ne fonctionne pas correctement lors d'une détérioration de tension sur le réseau. La cause principale vient du fait que la commande indirecte contrôlant l'onduleur dépend de la tension du réseau pour la détermination des vecteurs unitaires.

Mais en remplaçant un PLL pour la détermination des vecteurs unitaires de tension par celui du calcul de la l'amplitude maximale de la composante positive des tensions de source, on trouve les simulations représentées dans la figure 4.20.

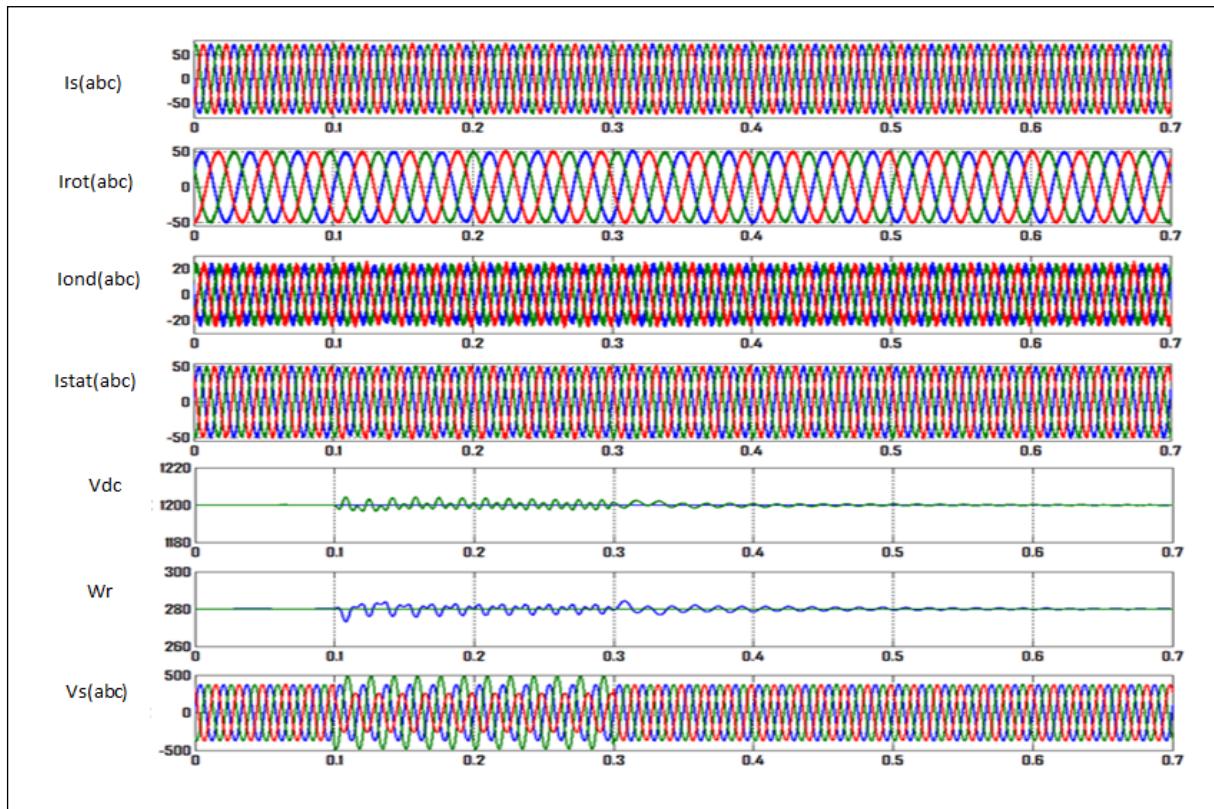


Figure 4.20 Réponse en régime permanent pendant une détérioration de tension avec la commande indirecte dans le plan 'abc' avec un PLL modifié

Pour remédier au problème des tensions détériorées dans le réseau, on ajoute le PLL pour la détermination des vecteurs unitaires de tension. Celui-ci calcule l'amplitude maximale de la composante positive des tensions de source, on obtient les résultats de simulations représentées sur la figure 4.20. Cette simulation présente les résultats souhaités.

4.5.4 Résultats de simulation pendant une détérioration de tension avec la commande non linéaire

4.5.4.1 Détérioration de la tension sur le réseau, impact sur les courants :

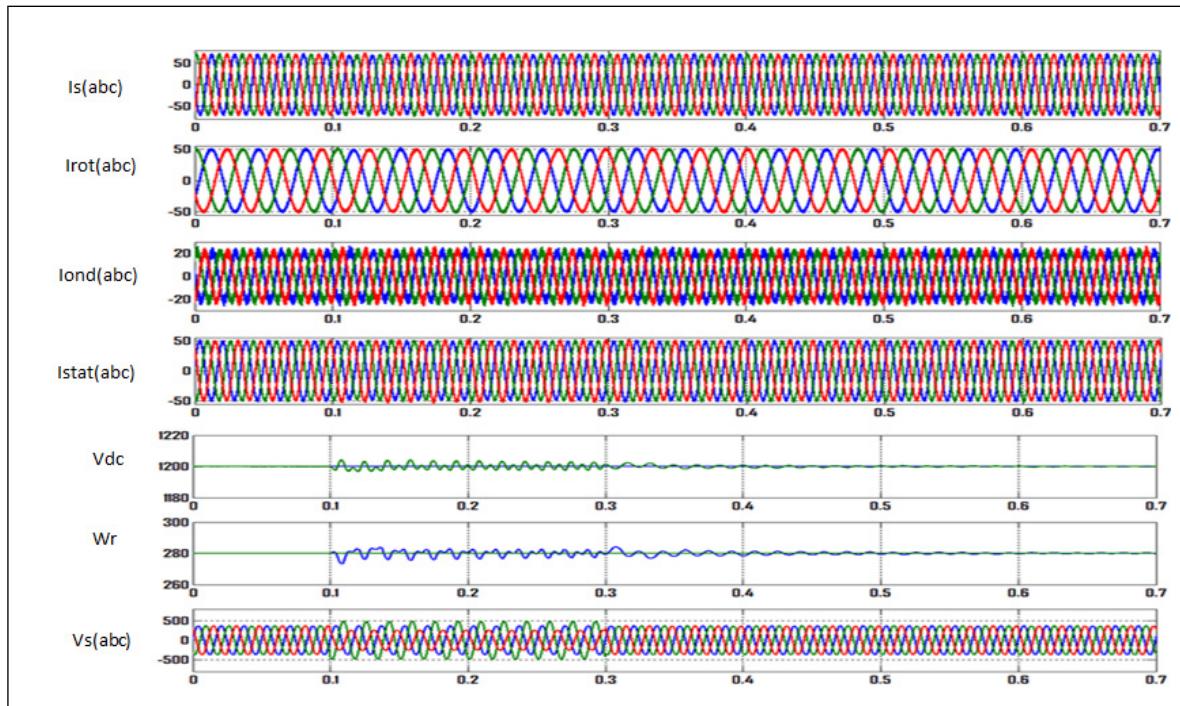


Figure 4.21 Réponse pendant une détérioration de tension en régime permanent avec la commande non linéaire

Comme étudié dans le chapitre 3, les résultats de simulation de la MADA en régime permanent sont bons. On observe la tension dans le réseau (v_s). Il y a un déséquilibré entre le $t=0.1$ s et le $t=0.3$ s. La fréquence des 3 phases n'est pas affectée, seule l'amplitude est modifiée. La phase verte subit une augmentation d'amplitude de 30%. La phase bleue n'est pas modifiée. La phase rouge subit une diminution d'amplitude de 30%. Pendant ce creux de tension, c'est-à-dire entre $t= 0.1$ s et $t=0.3$ s, on observe que le courant dans le réseau n'est pas perturbé. Le courant garde la même fréquence et la même amplitude. La régulation de la tension v_{dc} et la régulation de la vitesse du rotor présentent de petites oscillations. Elles se stabilisent lorsque la détérioration de tension au réseau s'arrête.

4.5.4.2 Détérioration de la tension du réseau, impact sur les puissances :

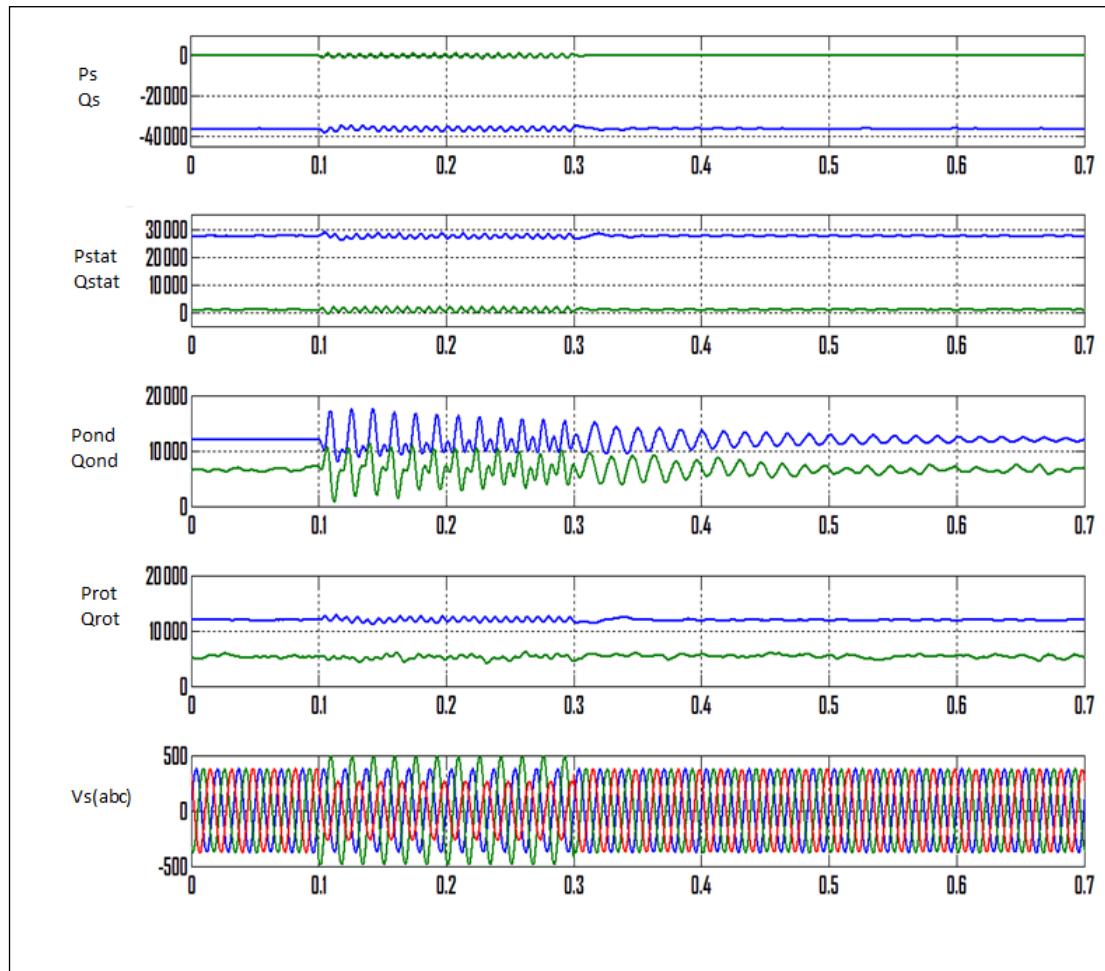


Figure 4.22 Écoulement de puissance pendant une détérioration de tension en régime permanent avec la commande non linéaire

Comme étudiés précédemment, les résultats de puissance de la MADA avec la commande non linéaire, on observe lors du déséquilibré de la tension du réseau une perturbation des puissances active et réactive dans le rotor. Les puissances active et réactive de l'onduleur, du stator et du réseau lors de la détérioration de la tension ne sont que très faiblement perturbées. La MADA fonctionne correctement pendant la détérioration de tension.

CONCLUSION

Ce travail, à travers l'étude des différentes commandes des convertisseurs de puissance appliquées à la MADA, m'a permis d'acquérir une bonne expertise du fonctionnement des différentes éoliennes.

Dans un premier temps, j'ai fait un survol de la revue de littérature. Je me suis inspiré des travaux effectués dans le passé pour expliquer le fonctionnement des éoliennes, leur place dans la société actuelle. J'ai décrit les spécificités de la MADA (Machine A Double Alimentation), ses avantages et ses inconvénients.

Dans la deuxième partie, j'ai modélisé les différents composants de l'éolienne pour expliquer comment l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie électrique grâce notamment au modèle de la turbine éolienne. L'intérêt étant de comprendre le fonctionnement mathématique de la MADA pour comprendre comment ont été réalisées les différentes commandes. J'ai modélisé la machine asynchrone dans le repère 'dq0' de PARK.

Dans la troisième partie, j'ai étudié trois types de commandes vectorielles à flux orienté : la commande vectorielle orientée au stator suivant l'axe q, la commande vectorielle orientée au stator suivant l'axe d et la commande vectorielle orientée au rotor suivant l'axe d. Ces commandes permettent de contrôler le redresseur.

Enfin en dernière partie j'ai étudié les différentes commandes de l'onduleur. Dans un premier temps la commande non linéaire. Ensuite les commandes indirectes dans le plan 'abc' et dans le plan 'dq0'. J'ai simulé la MADA avec ces trois commandes pour l'onduleur (et avec la commande vectorielle statorique suivant l'axe q pour le redresseur). J'ai exposé les résultats en régime permanent, en régime dynamique et lorsque la charge varie. Les résultats sont bons pour les trois modèles simulés, ces modèles fonctionnent très bien. Dans un deuxième temps, j'ai simulé ces trois modèles lorsque la tension du réseau se dégrade (chute de tension sur le réseau). La commande indirecte dépendant de la tension du réseau n'a pas fonctionnée

correctement. Finalement on l'a modifiée à l'aide d'un PLL et on a obtenu les résultats recherchés : la MADA fonctionne pendant une détérioration de tension. On a simulé la MADA avec la commande non linéaire à l'onduleur. Celle-ci fonctionne parfaitement.

Actuellement, les différentes éoliennes en activité se déconnectent du réseau lorsque celui-ci est perturbé. Le modèle étudié précédemment est conçu pour ne jamais se déconnecter. Il permettra ainsi de toujours fournir de la puissance au réseau et donc d'offrir un rendement plus élevé. Le travail effectué montre qu'il est encore possible d'apporter des développements aux systèmes éoliens. Les conditions de déroulement de ce mémoire nous ont contraint à limiter notre travail à une étude théorique et donc à des résultats de simulation. Il serait donc intéressant de tester ce modèle sur un banc expérimental et en observer les résultats. On peut imaginer que ce type de modèle pourrait être implanté sur des réseaux tels que HYDRO-QUEBEC au Québec ou EDF en France.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Apere : Association pour la Promotion des Énergies Renouvelables. Publication 2011. « Énergie durable ». En ligne. <<http://www.apere.org/index/node/2>>. Consulté le 22 décembre 2011.
- Anaya-Lara, O., F. M. Hughes, N. Jenkins et G. Strbac. 2006. « Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation ». IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, n2, p164-170.
- Azaizia, Rachid. 2008. « Étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux ». Mémoire en génie électrique, Bougara, Université M'Hamed Bougara faculté des hydrocarbures et de la chimie, 105p.
- Benalia, Leila. 2010. « Commande en tension des moteurs à induction double alimentés ». Thèse de doctorat en génie électrique, Batna, Université de Batna, 177p.
- Carlin, P. W. A. S. Laxson et E. B. Muljadi. 2003. « the history and state of the art of variable-speed wind turbine technology » Wind turbine, vol. 6, n2, p 129-159.
- Cerig. Publication 2009. « Impression des cellules solaires photovoltaïques ». En ligne. <<http://cerig.efpg.inpg.fr/memoire/2010/impression-photovoltaique.htm>>. Consulté le 20 décembre 2011.
- Chandra, Ambrish. 2009. ENR850 : Qualité de l'énergie électrique : notes de cours. Programme de maîtrise en génie électrique. Montréal : École de Technologie Supérieure, 1 v. (pag. multiple).
- Datta, R. et V. T. Ranganathan. 2001. « Direct power control of a grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors ». IEEE transaction on power electronics, vol. 16, n3, p390-399.
- Dendouga, A. R. Abdessemed, M. L. Bendaad et A. Chaiba. 2007. « Decoupled Active and Reactive Power Control of a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) ». In Mediterranean Conference. (Athènes, July. 27-29 2007), p1-5.
- e-LEE : e-Learning tools for electrical engineering. Publication 2003. « Principe de fonctionnement de la MADA ». En ligne. <<http://sites-test.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Mada/EtudeMADA/Principe.htm>>. Consulté le 25 septembre 2011.
- El-Aimani, S. B. Francois, B. Robyns, E. De Jaeger. 2005. « Dynamic behaviour of two stator flux control systems of a doubly fed induction generator based grid-connected

wind turbine during voltage dips ». In 18th conférence on Electricity distribution. (Turin, June 6-9 2005), p1-5.

Électronique. Publication 2009. « Modélisation de la machine asynchrone ». En ligne. <<http://electronique1.blogspot.ca/2011/02/modelisation-de-la-generatrice.html>> . Consulté le 25 février 2012.

Eoljorat. Publication 2011. En ligne. <<http://www.eoljorat.ch/PgStd1.asp?m=200>>. Consulté le 22 février 2012.

Hamdi, Naoul. 2008. « Modélisation et commande des génératrices éoliennes ». Mémoire en génie électrique, Constantine, Université de MENTOURI, 188p.

Hopfensperger, B. D. J. Atkinson et R.A.Lakin. 2000. « Stator-flux-oriented control of a doubly fed induction machine with and without position encoder ». IEEE proceedings-electric power applications, vol. 147, n4, p.241-250.

Ho Mae-Wan. Publication 2011. « Les énergies renouvelables coutent moins cher ». Rapport ISI 19 janvier 2011. En ligne. <<http://yonne.lautre.net/spip.php?article4773>>. Consulté le 22 février 2012.

Holdsworth, L., Wu, X.G., Ekanayake, J.B., et al. 2003. « Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances ». IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2003 IEEE, p. 1-10.

Iov, Florin, Hansen A., SorensenP., et al. 2007. « Mapping of grid faults and grid codes (Riso Report) ». En ligne. 41p. <<http://windenergyresearch.org/2007/01/mapping-of-grid-faults-and-grid-codes/>>. Consulté le 23 Mars 2012.

Khojet El Khil, S. I. Slama-Belkhodja, M. Pietrzak-David. 2011. « PWM voltage source inverter rating with the power distribution law for a DFIM speed drive ». Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium. (Tunis, June 27-30 2011). p703-709.

Laborne, Hervé. 2005. La vitesse variable du moteur asynchrone régime permanent : notes de cours. Programme de master1 en génie électrique. Ivry-sur-seine : ESME Sudria, 1 v. (page. multiple).

Ledru, Bernard. Publication 2006. « L'énergie éolienne ». En ligne. <<http://www.eoljorat.ch/PgStd1.asp?m=200>>. Consulté le 15 novembre 2011.

Mendalek, N. K. Al-Haddad, Louis-A. Dessaint, S. Casoria. 2003. « A new regulation algorithm applied to a hybrid power filter ». Electrical and computer engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. (Montréal, Mai 4-7 2003). Vol. 1, p417-420.

- Mirecky, Adam. 2005. « Étude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat en génie électrique, Toulouse, Institut national polytechnique de Toulouse, 252p.
- Muller, S. M. Deicke et R. W. De Doncker. 2002. « Doubly fed induction generator system for wind turbines ». IEEE Industry Application Magazine, vol. 8, n3, p26-33.
- Pena R. J.C. Clare et G. M. Asher. 1996. « Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation ». IEEE Proceedings-Electric Power Application, vol. 143, n3, p231-241.
- Pend, L. Y. Li, B. Francois. 2009. « Improved crowbar control strategy of DFIG based wind turbines for grid fault ride-through ». Applied power electronics conference and exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-fourth annual IEEE. p1932-1938.
- Poitier, Frédéric. 2003. « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de doctorat en génie électrique, Nantes, Université de Nantes, 166p.
- Riad, Toufouti. 2008. « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone ». Thèse de doctorat en génie électrique, Constantine, Université de MENTOURI, 174p.
- RTE : Réseau de transport d'électricité. Publication 2012. En ligne. <http://www.rte-france.com/uploads/Mediatheque_docs/vie_systeme/annuelles/Bilan_electrique/RTE_bilan_electrique_2011.pdf>. Consulté le 10 mars 2012.
- Salah Eddine, Rezgui. 2009. « Commande de machine électrique en environnement ». Mémoire en génie électrique, Constantine, Université de MENTOURI, 145p.
- Salloum, G. R. Mbayed, M. Pietrzak-David, B. De Fornel. 2007. « Loop-shaping H control for a doubly fed induction motor ». Power electronics ans applications, 2007 European Conference. (Toulouse, Septembre 2-5 2007). p1-9.
- Singh, Bhim, Shiv Kumar Aggarwal and Tara Chandra Kandpal. 2010. « Performance of wind turbine conversion system using a doubly fed induction generator for maximum power point tracking ». Industry applications society annueal meeting (IAS), 2010 IEEE, p. 1-7.
- Tremblay, E. A. Chandra, P.J. Lagace. 2006. « Grid-side converter control of DFIG wind turbines to enhance power quality of distribution network ». Power engineering society general meeting, 2006 IEEE. p1-6.

Wei, Zhi-nong, Yu X., Wu J., et al. 2009. « the intelligent control of DFIG-based wind generation ». Sustainable power generation and supply, 2009, Conference publications, p. 1-5.

Wu, Bin. 2006. « High-Power Converters and AC drives ». Whiley-IEEE Press, 2006, p. 1-15.

WWEA : World Wind Energy Association. Publication 2012. « World market recovers and sets a new record : 42 GW of new capacity in 2011, total at 239 GW ». En ligne. <<http://www.wwindea.org/home/index.php>>. Consulté le 20 février 2012.