وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعـــة سطيـــف 1

UNIVERSITE SETIF1

UFAS (ALGERIE)

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Electrotechnique

Faculté de Technologie

Pour obtenir le diplôme

De Magister En Electrotechnique

Option :

Réseaux électriques

Par :

Melle. HIBER Wafa

Thème

Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne

Soutenu le **19/03/2013** *devant la commission d'examen composée de :*

M. RAHMANI Lazhar	Professeur à l'Université de Sétif	Président
M. GHERBI Ahmed	Professeur à l'Université de Sétif	Rapporteur
M. RADJEAI Hammoud	Maître de Conférences à l'Université de Sétif	Examinateur
M. HACHEMI Mabrouk	Maître de Conférences à l'Université de Sétif	Examinateur

Dédicaces

Je dédie cette œuvre qui est l'aboutissement de plusieurs années de sacrifice, à mes êtres les plus chers au monde, d'abord à la mémoire de mon père, que Dieu le garde dans son vaste paradis, à ma très chère mère. Durant cette longue période, elle n'a ménagé aucun effort moral et matériel pour me prêter son assistance indéfectible que Dieu me la protège.

A mes frères et mes sœurs surtout HAYAT.

Ceci sans oublier mes professeurs auxquels je rends un vibrant hommage pour la science et le savoir prodigués tout au long de mon cursus universitaire. Ce qui m'a permis de réaliser ce mémoire duquel ils tireront toute leur fierté et qui, j'espère, sera à la hauteur de leurs espérances.

A mon fiancé et ma belle-famille notamment ma belle-mère.

A toutes mes amies.

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

Wafa.

Remerciements

Je tiens à remercier en tout premier lieu Pr. Ahmed GHERBI, Directeur de ce mémoire, je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines, son encadrement qui m'a offert la possibilité de réaliser ce travail et qui m'a permis d'élargir mon spectre de connaissances scientifiques.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

- Pr. RAHMANI Lazhar pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.
- Dr. RADJEAI Hamoud pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire et pour sa participation au jury.
- Dr. HACHEMI Mabrouk pour avoir accepté d'être examinateur de ce travail.

Merci à mes enseignants pour leurs efforts durant toutes mes années d'étude à l'université et à mes collègues de l'université qui m'ont accompagné dans mon parcours.

Finalement, mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes camarades et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

Sétif, le 19/03/2013

W. HIBER

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 4

Chapitre 01 ..... *6*

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS 6

1.1. Introduction 6
1.2. Notions théoriques sur l'énergie éolienne 6
1.3. Différentes parties d'un aérogénérateur 7
1.4. Différents types d'éoliennes 8
1.4.1. Eoliennes à axe horizontal 8
1.4.2. Eoliennes à axe vertical 8
1.5. Zones de fonctionnement de l'éolienne 9
1.6. Production optimale de l'énergie 10
1.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe 10
1.6.2. Fonctionnement à vitesse variable 12
1.7. Machines utilisées dans le système éolien 12
1.7.1. Systèmes utilisant la machine synchrone 13
1.7.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone 14
1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 19
1.8.1. Avantages 19
1.8.2. Inconvénients 19
1.9. Dispositifs de stockage de l'énergie éolienne 20
1.10. Conclusion 20

Chapitre 02 ..... *21*

MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE 21

2.1. Introduction 21
2.2. Modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA 21
2.2.1. Description du système éolien 21
2.2.2. Modélisation du système éolien 22
2.3. Fonctionnement et modélisation de la MADA 25
2.3.1. Description de la machine 25
2.3.2. Structure de la machine 25
2.3.3. Mode de fonctionnement 26

2.3.4. Alimentation de la MADA 28
2.3.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation 30
2.3.6. Avantages et inconvénients 34
2.4. Modélisation de l'alimentation de la MADA 36
2.4.1. Structure du convertisseur statique (redresseur à MLI.onduleur) 36
2.4.2. Modulation de Largeur d'Impulsion 38
2.4.3. Modélisation du redresseur triphasé à diodes 40
2.5. Résultats de simulation 40
2.6. Conclusion 42

Chapitre 03 44

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA 44

3.1. Introduction 44
3.2. Définition de la commande vectorielle 45
3.3. Principe de la commande à flux orienté 45
3.3.1. Choix de référentiel 45
3.3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique 46
3.3.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques 47
3.3.4. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques 48
3.3.5. Contrôle indépendant des puissances active et réactive 50
3.4. Etude de la régulation pour la commande 53
3.4.1. Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI) 53
3.4.2. Calcul des régulateurs 54
3.5. Résultats de simulation 58
3.5.1. Commande vectorielle directe 58
3.5.2. Commande indirecte 59
3.5.3. Contrôle de facteur de puissance 60
3.6. Conclusion 60

Chapitre 04 62

POLLUTION HARMONIQUE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE : EFFETS ET SOLUTIONS 62

4.1. Introduction 62
4.2. Définition des harmoniques 62
4.3. Interprétation des harmoniques 63
4.4. Sources des harmoniques et leurs effets 64
4.4.1. Sources des harmoniques 64

4.4.2. Effets des harmoniques 65
4.5. Mesures et prévention des harmoniques 66
4.5.1. Mesures des harmoniques 66
4.5.2. Facteur de puissance 66
4.5.3. Normes standards 68
4.6. Solutions pour la dépollution harmonique 69
4.6.1. Filtrage passif 69
4.6.2. Filtrage actif 69
4.7. Techniques de commande utilisées dans le filtrage actif parallèle 73
4.7.1. Principe de filtrage actif parallèle 73
4.7.2. Commandes des filtres actifs parallèles 73
4.8. Fonctionnement de l'ensemble du système éolien avec filtre actif parallèle 81
4.9. Dimensionnement des paramètres du régulateur PI 82
4.9.1. Action proportionnelle 82
4.9.2. Action intégrale 82
4.10. Simulation 82
4.10.1. Résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI 84
4.10.2. Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis 85
4.10.3. Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis modulé 86
4.11. Conclusion 88
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES 89

Liste des figures

Figure 1-1.Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde 7
Figure 1-2.Eléments constitutifs d'une éolienne 7
Figure 1-3.Turbine éolienne en amont et en aval 8
Figure 1-4.Turbine à axe vertical 9
Figure 1-5.Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent 10
Figure 1-6.Eolienne à vitesse fixe 10
Figure 1-7.Eolienne à vitesse variable 12
Figure 1-8.Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique 13
Figure 1-9.Machine asynchrone avec liaison directe au réseau 14
Figure 1-10.Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur-onduleur 15
Figure 1-11.Machine asynchrone à rotor bobiné 15
Figure 1-12.MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée 16
Figure 1-13.Structure de KRAMER pour la MADA 17
Figure 1-14.Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur. 17
Figure 1-15.Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI 18
Figure 2-1.Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA 22
Figure 2-2.Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau 22
Figure 2-3.Modèle mécanique de la turbine éolienne 24
Figure 2-4.Schéma bloc du modèle de la turbine 25
Figure 2-5.Représentation schématique d'une MADA. 25
Figure 2-6.MADA connectée à deux réseaux triphasés 26
Figure 2-7.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone 27
Figure 2-8.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone 27
Figure 2-9.Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone 27
Figure 2-10.Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone 28
Figure 2-11.MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor 28
Figure 2-12.MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs. 29
Figure 2-13.Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun 29
Figure 2-14.Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA 36
Figure 2-15.Principe de commande en MLI sinus-triangulaire 39
Figure 2-16.Représentation du redresseur triphasé à diodes 40
Figure 2-17.Couple de la turbine et la vitesse de rotation 41

Figure 2-18.Puissances active et réactive statoriques....41
Figure 2-19.Courants statoriques....41
Figure 2-20.Tension du bus continu....41
Figure 2-21.Déphasage entre tension et courant d'une phase statorique de la GADA....42
Figure 3-1.Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu....45
Figure 3-2.Orientation du flux statorique, rotorique et d'entrefer....46
Figure 3-3.Schéma bloc du système à réguler....49
Figure 3-4.Schéma synoptique de la commande vectorielle directe de la GADA....50
Figure 3-5. Schéma bloc de commande directe des puissances actives et réactives....51
Figure 3-6. Schéma synoptique de la commande indirecte avec boucles des puissances et des courants....52
Figure 3-7. Schéma bloc de commande indirecte des puissances et des courants....53
Figure 3-8.Problème de commande simplifié (contrôle directe)....54
Figure 3-9.Schéma de bloc d'un système régulé par un PI pour les puissances....55
Figure 3-10.Schéma bloc d'un système régulé par un PI pour les courants....56
Figure 3-11.Résultats de simulation pour la commande directe....58
Figure 3-12.Résultats de simulation pour la commande indirecte....59
Figure 3-13.Facteur de puissance coté stator....60
Figure 4-1.Représentation de l'effet d'un harmonique....64
Figure 4-2.(a) Filtre passif résonant(b) Filtre passif amorti....69
Figure 4-3.Schéma de principe du filtrage actif parallèle....70
Figure 4-4.Schéma de principe du filtrage actif série....71
Figure 4-5.Filtre active série et filtre passif parallèle....71
Figure 4-6.Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle....72
Figure 4-7.Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle....72
Figure 4-8.Combinaison parallèle-série des filtres actifs....72
Figure 4-9.Principe de la compensation active des harmoniques....73
Figure 4-10.Schéma de la méthode classique des puissances active et réactive instantanées....75
Figure 4-11. Schémas de deux types classiques de filtres....75
Figure 4-12.Principe du FMV....76
Figure 4-13. Schéma de la méthode des puissances active et réactive instantanées en utilisant FMV [8]....77
Figure 4-14.Principe de la commande par MLI....80
Figure 4-15.Commande conventionnelle par hystérésis....81
Figure 4-16.Commande par hystérésis modulé....81
Figure 4-17.Schéma du système avec filtre actif parallèle....81
Figure 4-18.Schéma du système étudié....82

Figure 4-19.Courant de la charge non linéaire i_{ca}. 83
Figure 4-20. Courant de la source avant filtrage. 83
Figure 4-21.Spectre harmonique du courant de la source. 83
Figure 4-22. Courant de la source après filtrage....84
Figure 4-23.Analyse harmonique du courant de source après filtrage....85
Figure 4-24.Courant injecté par le filtre actif....85
Figure 4-25.Courant de la source après filtrage....85
Figure 4-26. Analyse harmonique du courant de source après filtrage....86
Figure 4-27.Courant injecté par le filtre actif avec un zoom....86
Figure 4-28. Courant de la source après filtrage....87
Figure 4-29. Analyse harmonique du courant de source après filtrage....87
Figure 4-30.Courant injecté par le filtre actif....87

Liste des tableaux

Tableau 4.1. Principales charges polluantes [35] 65
Tableau B.2 Transformation de CONCORDIA.....93

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MAS	Machine asynchrone
MS	Machine Synchrone
MCC	Machine à Courant Continu
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
f.m.m	Force magnétomotrice
PI	Proportionnel Intégral
Park	Transformation de Park
IGBT	Transistors Bipolaires à Gâchette Isolée
GTO	Gate Turn Off
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
EDF	Electricité De France
FAP	Filtre Actif Parallèle
FPH	Filtre parallèle Hybride
FMV	Filtre Multi Variables
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
THD	Taux de Distorsion Harmonique

Symboles

ρ	La densité volumique de l'air (kg/m^3)
P_t	Puissance captée par la turbine (W)
C_p	Coefficient de puissance
C_t	Couple mécanique $(N.m)$
G	Gain du multiplicateur
V_n	Vitesse nominale du vent (m/s)
V_d	Vitesse du vent démarrant la turbine (m/s)
$V_{\max}$	Vitesse maximale du vent (m/s)
V_{red}	Tension redressé (V)
λ	Vitesse relative de l'éolienne
β	L'angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal $(°)$
P_{mt}	Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé (W)
g	Glissement d'une machine asynchrone
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne (m^2)
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine (red/s)
f	Fréquence (Hz)
P_{mec}	Puissance mécanique sur l'arbre de la machine (W)

P_r	Puissance active rotorique (W)
P_s	Puissance active statorique (W)
P_n	Puissance nominale de la turbine (W)
R	Rayon de la turbine (m)
ω	Vitesse angulaire de rotation du rotor (red/s)
ω_s	Vitesse angulaire de rotation du champ tournant (red/s)
C_m	Coefficient du couple de l'éolienne
J_m	Moment d'inertie total de l'ensemble turbine et générateur $(kg.m^3)$
f_r	Coefficient de frottement visqueux
R_s, R_r	Résistances d'une phase statorique et rotorique (Ω)
L_s, L_r	Inductances cycliques statorique et rotorique (H)
L_m	Inductance mutuelle cyclique stator.rotor (magnétisante) (H)
I_{sabc}, I_{rabc}	Courants triphasés statoriques et rotoriques de la machine asynchrone (A)
I_{sdq}, I_{rdq}	Composantes du courant statorique et rotorique dans le repère (d,q) (A)
p	Nombre de paires de pôles
V_{sabc}, V_{rabc}	Tensions triphasées statoriques et rotoriques de la machine asynchrone (V)
V_{sdq}, V_{rdq}	Composantes de tension statorique et rotorique dans le repère (d,q) (V)
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a (rad)
K_p, K_i	Gain proportionnel et Gain intégral du régulateur PI
ξ	Coefficient d'amortissement
ω_c	Pulsation fondamentale du réseau
V_{DC}	Tension du bus continu (V)
$\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}$	Flux statoriques et rotoriques (Wb)
M	Inductance mutuelle entre phase du stator (H)
M_s, M_r	Inductance mutuelle stator.stator et rotor.rotor (H)
u_{ab}, u_{bc}, u_{ca}	Tensions composées (V)
u_{ao}, u_{bo}, u_{co}	Tensions d'entrée de l'onduleur (V)
u_{an}, u_{bn}, u_{cn}	Tensions simples de la machine (V)
m	Indice de modulante
f_p	Fréquence de porteuse (Hz)
f_m	Fréquence de modulante (Hz)
ω_s, ω_r, ω_{sl}	Pulsations électriques des grandeurs statoriques, rotoriques et de glissement
θ_s, θ_r, θ_{sl}	Angles relatifs aux pulsations statoriques, rotoriques et de glissement (rad)
P_s, Q_s	Puissances active et réactive statoriques de la MADA (W), (VAr)
v_1, v_4	Perturbations à rejeter
v_2, v_3	Termes de couplage entre les axes d et q
ε_d, ε_q	Perturbations représentant la somme de v_1 et des résidus de couplage
A_{tr}	Amplitude du signal triangulaire

B_h	Largeur de la bande d'hystérésis
i_s	Courant de la source (A)
i_c	Courant de la charge (A)
i_f	Courant injecté par le filtre (A)
i_f^*	Courant de référence (A)
K	Constante du FMV
V_s	Tension de la source (V)
F_p	Facteur de puissance
φ_h	Déphasage de l'harmonique h
I_1	Valeur efficace du courant fondamental (A)
φ_1	Déphasage du courant fondamental
I_h	Valeur efficace du courant harmonique du rang h (A)
h	Rang d'harmonique

INTRODUCTION GENERALE

Le réseau électrique est un assemblage de matériels ayant pour rôle d'acheminer l'électricité depuis la source (centrales) jusqu'aux utilisateurs dans les meilleures conditions économiques et techniques. L'énergie électrique, par sa facilité d'utilisation, de régulation et d'automatisation, est devenue indispensable à la vie quotidienne.

Ces dernières années, nous assistons à une augmentation sans cesse croissante de la demande de la puissance électrique afin de répondre aux exigences industrielles et quotidiennes. Cette augmentation est accompagnée par les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique et l'environnement dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables qui représentent une solution importante. Parmi les nouvelles sources d'énergie, on trouve l'énergie éolienne qui fait l'objet de ce travail [1].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique), en particulier l'énergie éolienne qui représente une solution importante et pourrait mitiger beaucoup de problèmes grâce essentiellement à ses impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde. Ainsi, la production d'électricité par des sources d'énergies renouvelables offre une grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [2, 3]. Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions de vent. Le système éolien est contrôlé de manière à maximiser la puissance produite en recherchant en permanence le point de fonctionnement à maximum de puissance [4].

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire même la destruction totale de tous ces équipements [5].

L'insertion de plus en plus croissante des éoliennes a conduit les chercheurs en « Génie Electrique » à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien puis le filtrage parallèle à la présence de ce dernier. L'objectif principal de ce travail est de faire l'analyse et le filtrage d'un réseau électrique avec une production éolienne.

Le premier chapitre est consacré à des notions théoriques sur l'énergie éolienne. Les différents types et les zones de fonctionnement de l'éolienne, suivi par un rappel sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs associés, sont décrits. Les différentes formes de stockage d'énergie y seront aussi présentées pour envisager des solutions d'association avec l'éolienne.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de Machines Asynchrones A Double Alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions du vent. Pour atteindre ces objectifs, le second chapitre est consacré à la MADA, son principe de fonctionnement, ses domaines d'utilisation ainsi que sa modélisation dans le repère biphasé (d, q) lié au synchronisme à l'aide de la transformation de PARK. Cette partie est validée par des résultats de simulation obtenus sous environnement Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre présente une stratégie de commande vectorielle en puissances active et réactive statoriques appliquée à la MADA. Il sera alors possible de donner des valeurs de consigne indépendantes pour la puissance active et la puissance réactive. Ceci permettra de régler en permanence la valeur de la puissance réactive que la machine va fournir au réseau.

Dans le quatrième chapitre, on discutera le problème des perturbations harmoniques. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées. Des solutions seront proposées pour la dépollution harmonique et les différentes techniques de commande existantes qui peuvent être appliquées dans le filtrage actif parallèle. Ce dernier est une solution originale afin d'éliminer les harmoniques de courant et ainsi limiter leur propagation dans le réseau. Effectivement, les charges non linéaires, de plus en plus nombreuses sur le réseau électrique, génèrent des courants harmoniques se propageant dans tout le réseau et perturbant ainsi les autres charges où est connectée l'éolienne.

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 01

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

1.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones [6]. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, on présente des notions théoriques sur l'énergie éolienne, des différents types d'aérogénérateurs (verticaux, horizontaux, à vitesse fixe et vitesse variable), puis on passe à l'état de l'art des machines utilisées (génératrices synchrones, asynchrones à cage et asynchrone à bagues doublement alimentées avec ses différentes configurations d'alimentation), et on donne les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, en ajoutant un bref aperçu sur les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne.

1.2. Notions théoriques sur l'énergie éolienne

Aujourd'hui, plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure 1.1 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [7].

Dans le courant de 21ème siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

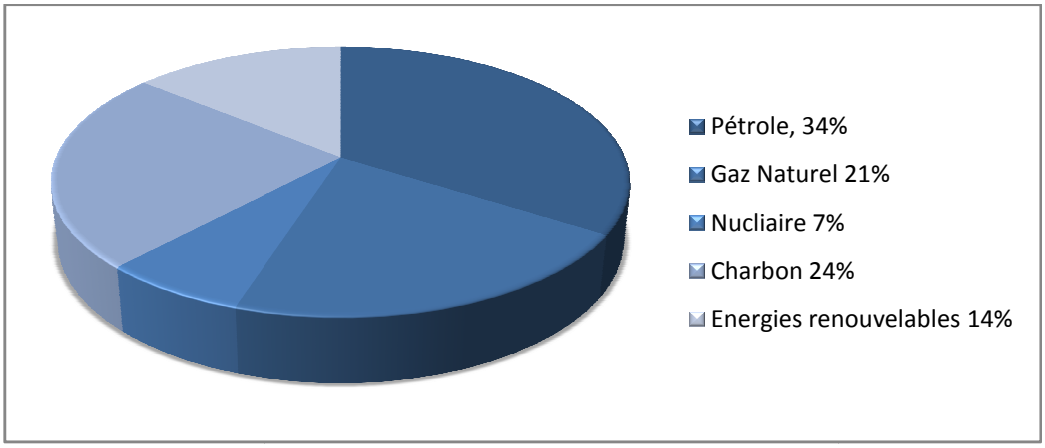


Figure 1-1.Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde

Il existe plusieurs ressources d'énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la géothermie et la biomasse. Ces ressources d'énergie sont pratiquement inépuisables et propres [7].

1.3. Différentes parties d'un aérogénérateur

Une éolienne est composée de plusieurs éléments présents sur la figure 1.2.

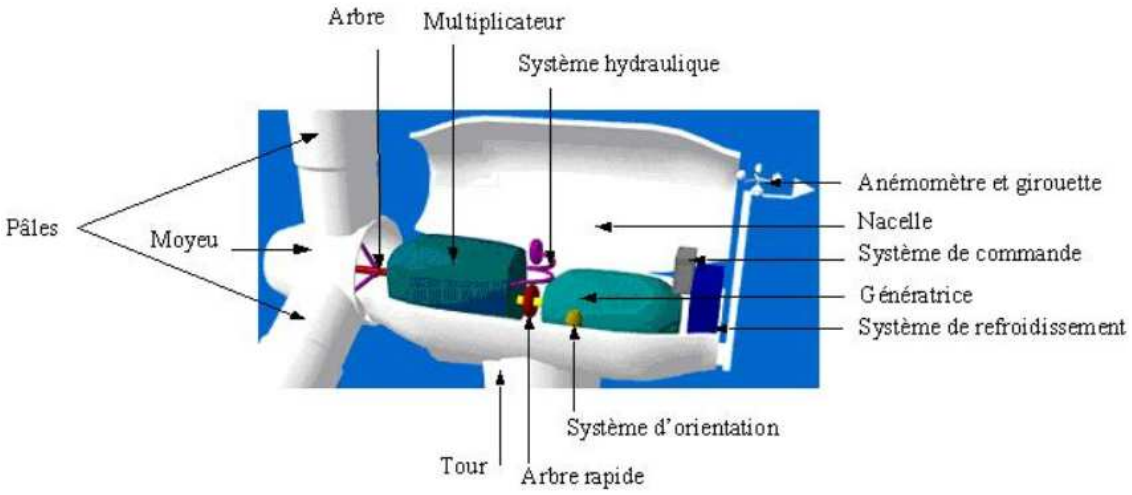


Figure 1-2. Eléments constitutifs d'une éolienne

Un mat, ou tour, supporte la nacelle et la turbine. Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. La nacelle avec une armature métallique accueille la génératrice et son système de refroidissement, le multiplicateur de vitesse et différents équipements électroniques de contrôle qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne.

Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent supportant un arbre rapide et la turbine. Cette dernière possède trois pales qui permettent de capter l'énergie du vent et de la transférer à l'arbre

lent. Un système électromécanique permet généralement d'orienter les pales et de réguler la vitesse de rotation de la turbine. Les pales fournissent également un frein aérodynamique par «mise en drapeau » ou seulement par rotation de leurs extrémités. Un anémomètre et une girouette, situés sur le toit de la nacelle, fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent [8].

1.4. Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice:

1.4.1. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes les plus utilisées et sont dotées d'un système de commande où la conception oriente le rotor face au vent. Une turbine à axe horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical. Elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

Selon son nombre de pales, une éolienne à axe horizontal est dite monopale, bipale, tripale ou multipale. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux autres types. Suivant leur orientation en fonction du vent, les éoliennes à axe horizontal sont dites en « amont » (upwind) ou en « aval » (downwind), la figure 1.3 montre ces deux types, celle en amont est largement prédominante [1].

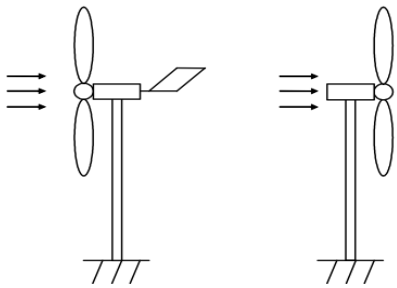


Figure 1-3. Turbine éolienne en amont et en aval.

1.4.2. Eoliennes à axe vertical

Elles sont les moins utilisées, à cause de leur manque de performances par rapport à la précédente. L'axe de rotation de ce type est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce

type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur est disposé au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol. Ces turbines ne disposent pas de commande d'angle de pale comme la précédente. La figure 1.4 montre trois conceptions d'une éolienne à axe vertical. Le faible rendement aérodynamique et la quantité du vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol constituent les principaux handicaps de ce type face à l'autre type [1, 7].

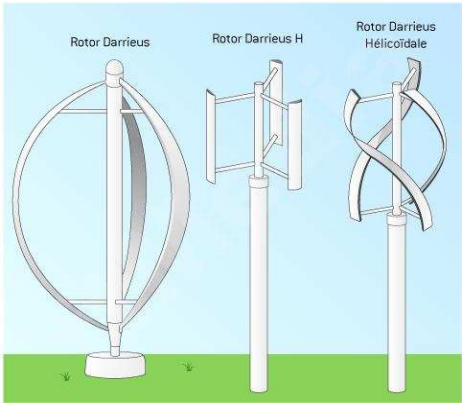


Figure 1-4. Turbine à axe vertical

1.5. Zones de fonctionnement de l'éolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance. Donc, il existe pour la puissance éolienne nominale P_n une vitesse du vent nominale pour laquelle l'aérogénérateur est bien dimensionné. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à V_n, la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter toute destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. A côté de la vitesse nominale V_n, on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage, V_d à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie ;
- la vitesse maximale du vent, $V_{\max}$, pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses V_n, V_d et $V_{\max}$ définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Figure 1.5) :

- La zone I, où $P = 0$, la vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible ;
- La zone II, le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent;

– La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n ;

– La zone IV, la vitesse du vent devient trop forte, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle [9, 10].

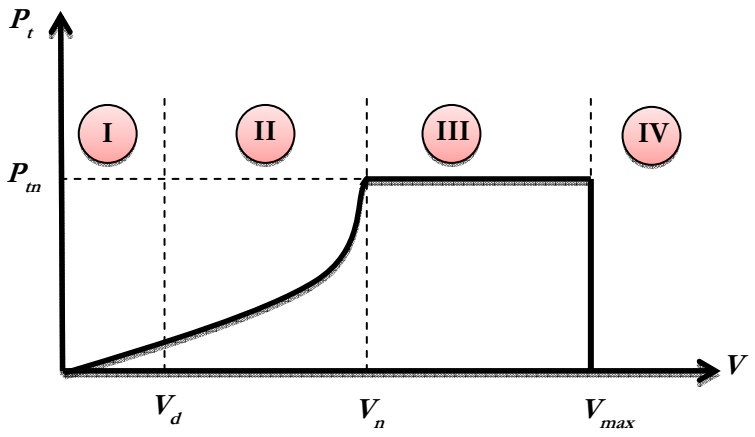


Figure 1-5. Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

1.6. Production optimale de l'énergie

On peut classer les éoliennes en deux catégories suivant le mode de fonctionnement : des éoliennes fonctionnant à vitesse fixe et celles fonctionnant à vitesse variable.

1.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières qui ont été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, donc sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de pairs de pôles de la génératrice utilisée (Figure 1.6) [11].

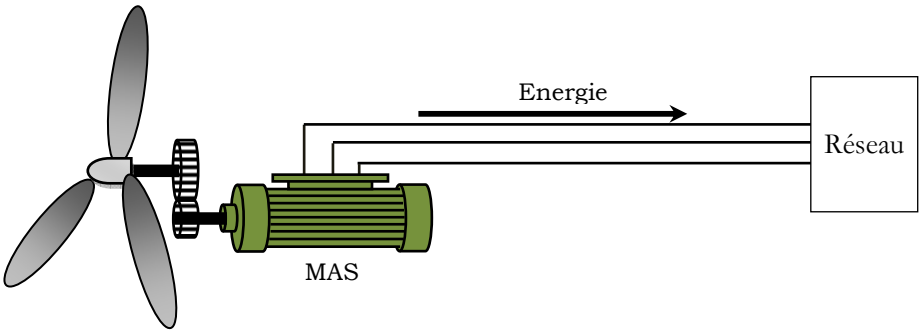


Figure 1-6. Eolienne à vitesse fixe

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et fournit la puissance électrique au réseau. On peut

distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables [12].

1.6.1.1. Eolienne à décrochage aérodynamique

C'est un régulateur par décrochage aérodynamique ; autrement dit, le comportement géométrique des pales peut évoluer selon le rapport entre les deux vitesses du vent et de la turbine, ce qui permet le décrochage à partir d'une certaine vitesse du vent. Ce décrochage dépend notamment de l'angle de calage des pales qui peuvent être fabriquées avec un pas variable suivant la position le long de la pale et possèdent aussi un mécanisme de freinage en bout. Cette technique du "Stall Control" a aussi quelques avantages [9] :

- Pas de système de contrôle d'angle de calage ;
- Construction plus simple et moins coûteuse du rotor ;
- Maintenance plus aisée et fiabilité meilleure.

Pour les machines de fortes puissances, on trouve également le système "Stall actif". Le décrochage aérodynamique est alors obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système à orientation des pales qui est maintenant présenté [13].

1.6.1.2. Eoliennes à pales orientables

C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse du vent et de la puissance active à extraire. L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent. Le fonctionnement à vitesse fixe possède les caractéristiques suivantes :

- Système électrique plus simple ;
- Plus grande fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- Pas besoin de système électronique de commande ;
- Moins cher [9, 13].

1.6.2. Fonctionnement à vitesse variable

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente et d'améliorer le rendement et la qualité de la conversion de l'énergie, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent. L'optimisation de la puissance dans la charge ou le réseau récepteur peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance) (Figure 1.7).

Le fonctionnement à vitesse variable demande la définition d'une stratégie de commande globale de la turbine. Il faut donc indiquer les variations de la vitesse de rotation, couple ou puissance souhaitées en fonction des variations de la vitesse du vent [11].

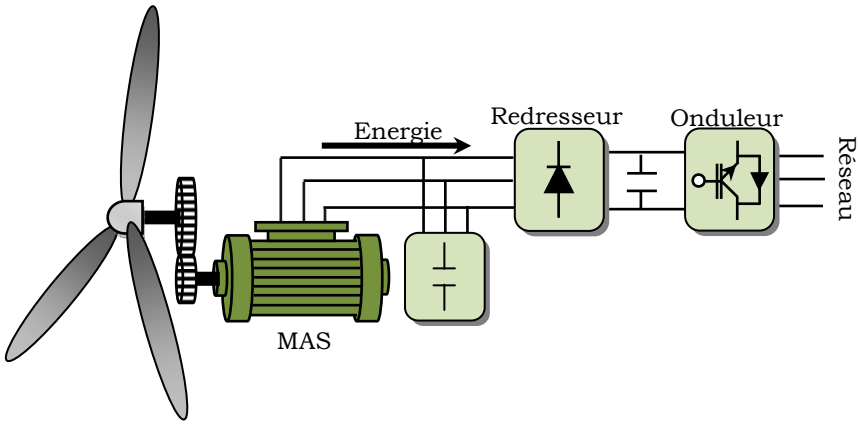


Figure 1-7. Eolienne à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le train de puissance ;
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité [9].

1.7. Machines utilisées dans le système éolien

La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. La plupart de génératrices utilisées dans les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages à savoir ; robustes, faible coût et mécaniquement simple.

Le choix du type d'aérogénérateur dépend de plusieurs critères à savoir :

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge ;

- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore) ;
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome)[9].

Les générateurs, habituellement rencontrés dans les éoliennes, sont présentés dans les paragraphes suivants :

1.7.1. Systèmes utilisant la machine synchrone

Ces systèmes sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi, les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (Figure 1.8).

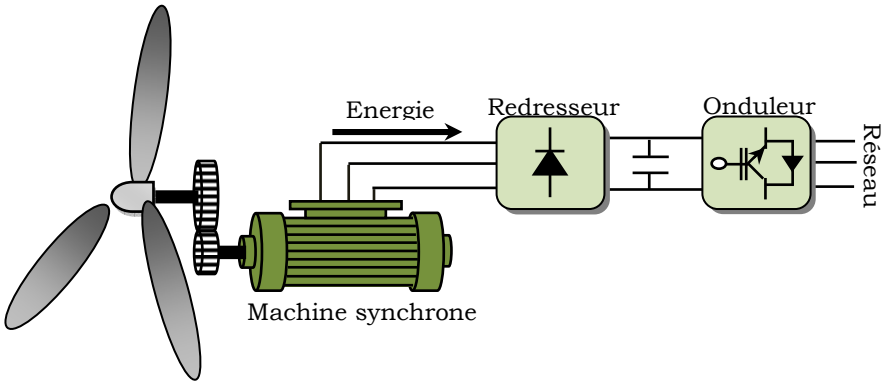


Figure 1-8. Système éolien à base d'une machine synchrone et un convertisseur électronique

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

1.7.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone

La machine asynchrone équipe actuellement une grande partie du parc éolien. Elle a l'avantage d'être robuste et de faible coût.

1.7.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La connexion directe au réseau de ce type de machines est plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. La simplicité de la configuration de ce système permet de limiter la maintenance de la machine. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage/décrochage au réseau [14]. L'insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques (Figure 1.9), permet de magnétiser la machine durant sa production de l'énergie.

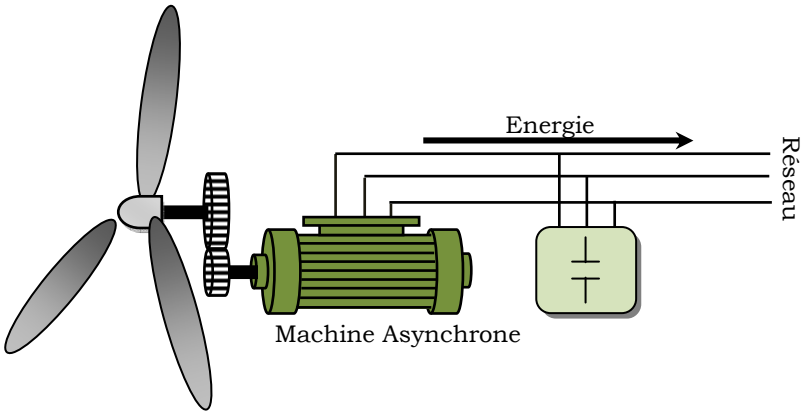


Figure 1-9. Machine asynchrone avec liaison directe au réseau

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

Le dispositif de base est représenté sur la figure 1.10. Cette configuration autorise un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils

représentent donc un coût important, des pertes non négligeables et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée [14].

1.7.2.3. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [15]. Le stator est directement relié au réseau et les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique (Figure 1.11).

La MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines [16]. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage.

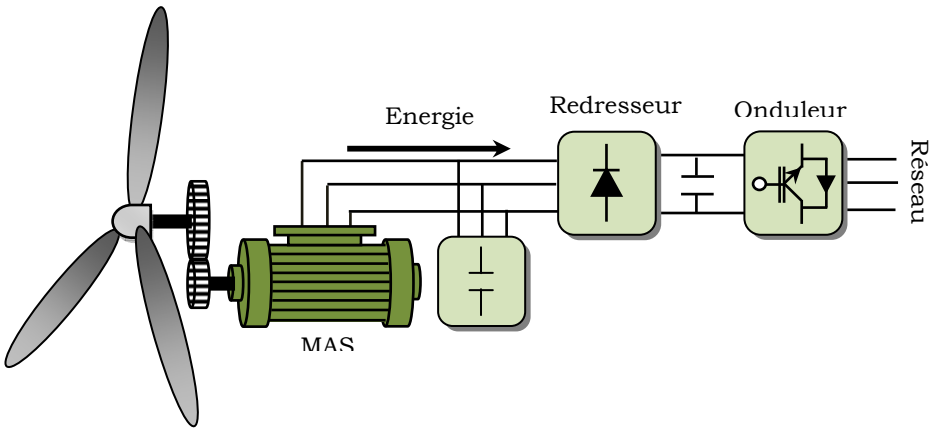


Figure 1-10. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur-onduleur

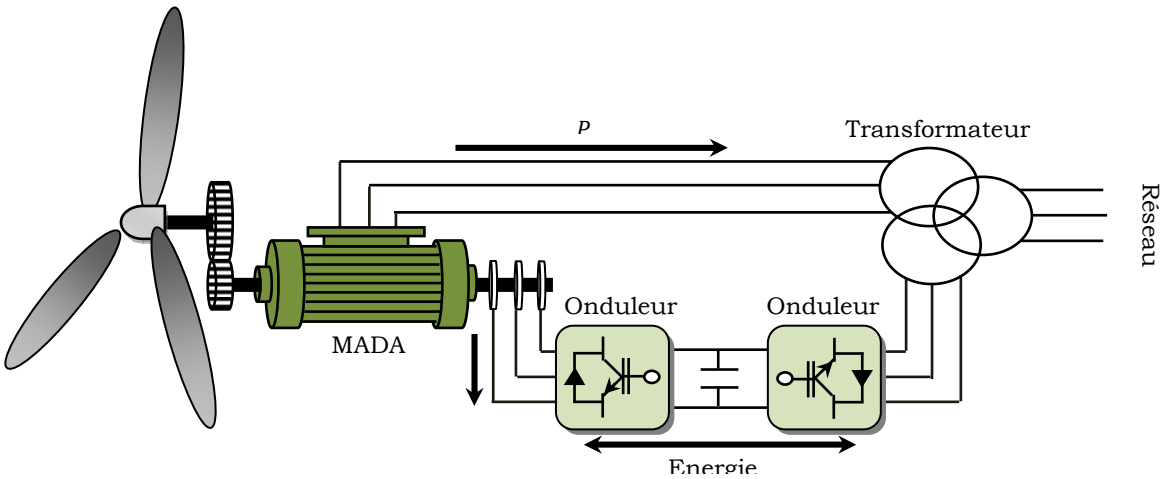


Figure 1-11. Machine asynchrone à rotor bobiné

a. Structure à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure 1.12. Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [17].

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation de la machine.

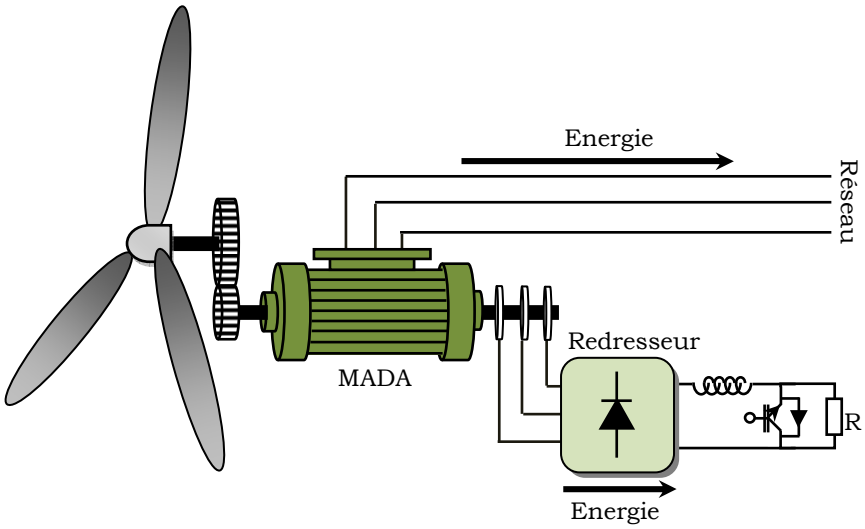


Figure 1-12.MADA avec contrôle de glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance [17].

b. Structure de KRAMER

Cette structure est appelée structure à base de pont à diode et pont à thyristors. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Figure 1.13) [18]. Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

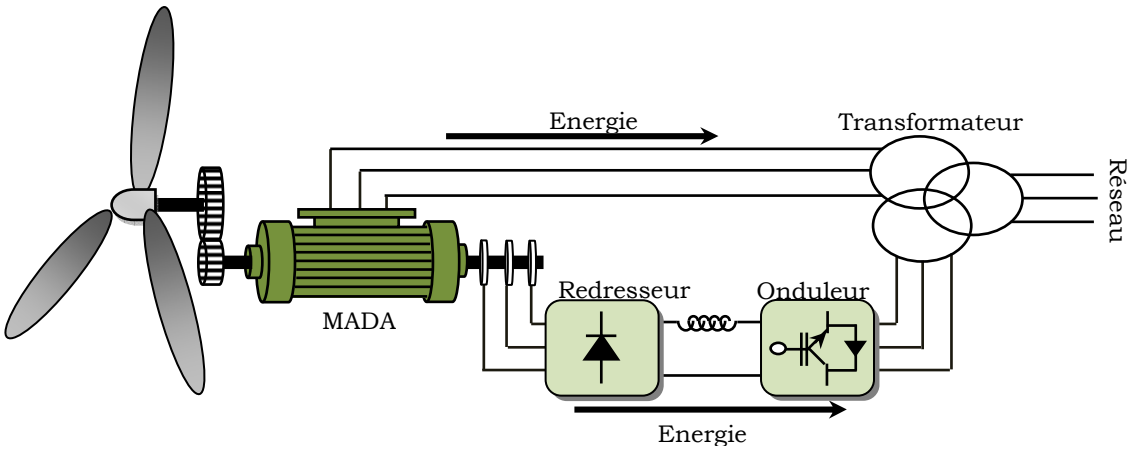


Figure 1-13. Structure de KRAMER pour la MADA

c. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau (Figure 1.14). L'ensemble est alors appelé : structure de SCHERBIUS [16]. Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de SCHERBIUS". Formellement, le principe de SCHERBIUS est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu des convertisseurs de puissance.

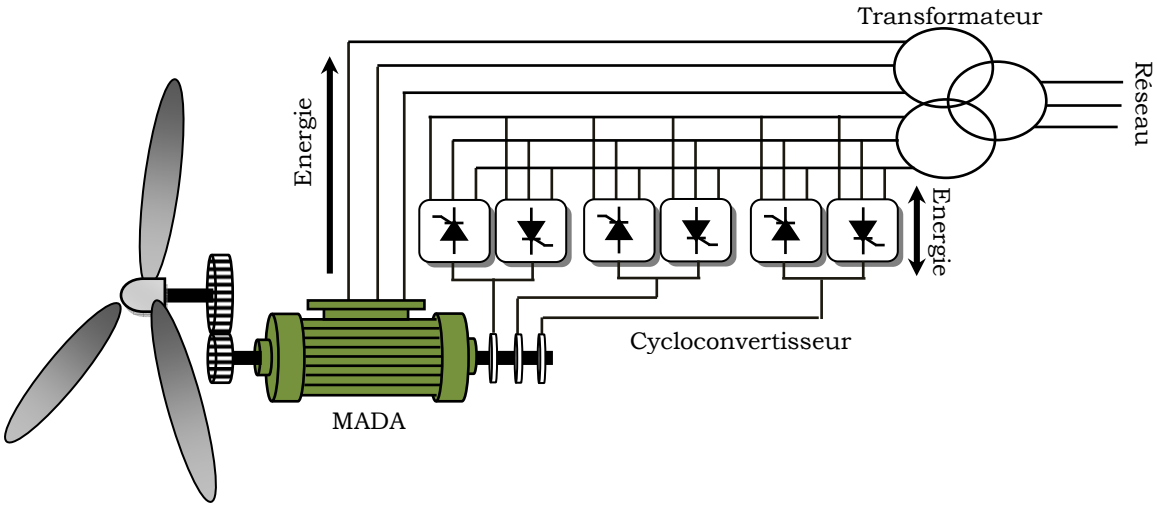


Figure 1-14. Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur.

Dans cette configuration, le principe de SCHERBIUS est reproduit à l'aide d'un cycloconvertisseur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [16].

d. Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante (Figure 1.15) utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [16].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité [16].

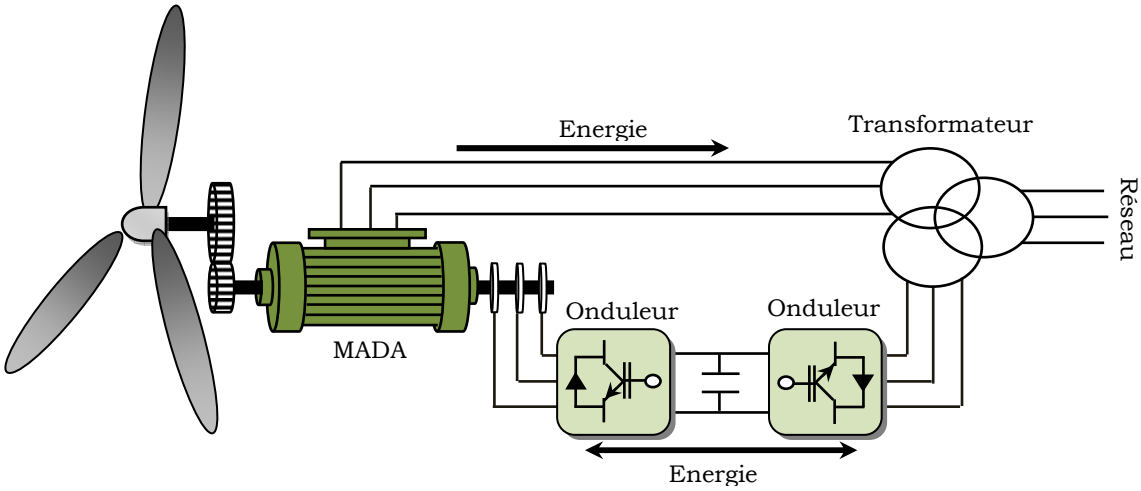


Figure 1-15. Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.

C'est pour cette raison que nous nous sommes particulièrement intéressés à cette dernière configuration de la génératrice asynchrone à double alimentation à cause de ses bonnes caractéristiques intrinsèques telles que :

- Le fonctionnement à vitesse variable ;
- Le convertisseur de puissance de petite dimension ;
- Le niveau bas de fluctuations mécaniques ;
- La possibilité de fonctionnement en hypo et hypersynchronisme, ce qui permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau et aussi du rotor vers le réseau ;
- Le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

1.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

1.8.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- Energie non polluante ;
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires ;
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [19] ;
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et se démontent très facilement ;
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte ;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple ;
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [9].

1.8.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;

– La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées [10] ;

– C'est une source couteuse à rendement faible dans les sites moins ventés [9].

1.9. Dispositifs de stockage de l'énergie éolienne

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme. Il existe différentes possibilités de stockage :

– Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par batterie d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus. Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé.

– Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire [18].

1.10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Après ce rappel et descriptif des notions élémentaires, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations électriques qui sont utilisées dans le domaine éolien. L'évaluation a été faite sur la base des principales exigences d'un système de conversion d'énergie éolienne. Après une étude comparative, on peut dire que la génératrice la plus intéressante est la MADA à cause de ses caractéristiques intrinsèques telles que le fonctionnement à vitesse variable, un convertisseur de puissance de petite dimension, un niveau bas de stress mécanique et enfin le contrôle simultané de la puissance active et réactive.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude et la modélisation du système de conversion éolienne.

Chapitre 02

MODELISATION DU SYSTEME DE CONVERSION EOLIENNE

2.1. Introduction

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maitrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation de la conception. L'étude et la modélisation des systèmes présentent un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques et conduisent à concevoir et à exploiter le matériel au voisinage des limites technologiques [9].

On présentera dans ce chapitre la modélisation du système éolien, constitué d'une turbine et son convertisseur mécanique et la machine asynchrone à double alimentation.

2.2. Modélisation du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

2.2.1. Description du système éolien

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré à la figure 2.1. La turbine, via un multiplicateur, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également à travers des convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transitor) par le rotor. Celui.ci est muni de système bague/balais. Ces convertisseurs côtés MADA et réseaux, sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [7, 20].

On procède maintenant à étudier la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en modélisant les différents éléments de la chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne.

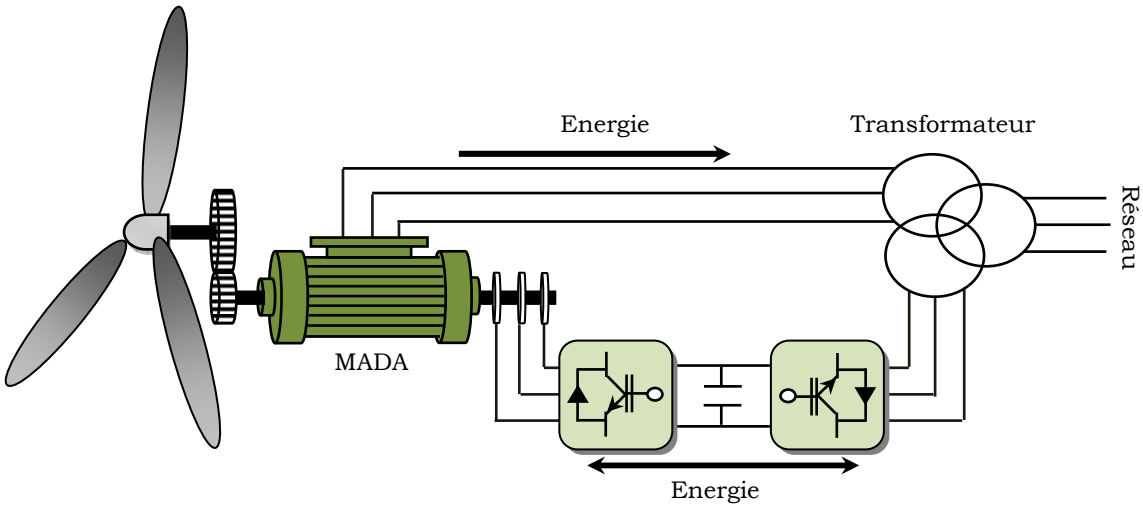


Figure 2-1. Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA

2.2.2. Modélisation du système éolien

Le schéma de l'éolienne basée sur une MADA connectée au réseau, incluant les différentes grandeurs mécaniques et électriques servant à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique, est illustré à la figure 2.2. Dans un premier temps, on présente le modèle aérodynamique de la turbine, puis le modèle mécanique de l'éolienne. Ensuite, on décrit la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Le fonctionnement de la MADA sera alors succinctement décrit, puis la MADA sera modélisée dans le repère de PARK. Pour finir, la connexion du convertisseur au réseau électrique via le filtre RL sera également modélisée dans le repère de PARK [20].

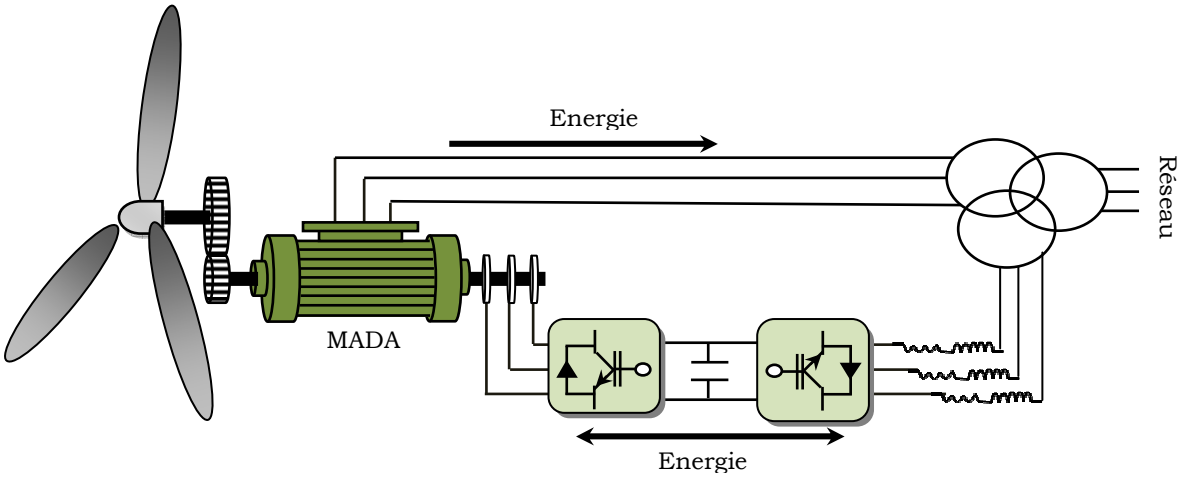


Figure 2-2. Eolienne basée sur une MADA connectée au réseau

2.2.2.1. Modèle de la turbine éolienne

a. Modèle aérodynamique

Le vent de vitesse v , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraine sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine, notée P_t , s'exprimant par [20] :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v^3 \tag{2.1}$$

Où λ est défini par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \tag{2.2}$$

Avec :

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

ρ : La masse volumique de l'air (approximativement 1,225 kg/m^3 à la pression atmosphérique et à 15°C) ;

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle décrit étant défini par la longueur d'une pale ;

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine ;

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de BETZ (voir § l'annexe A).

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i} \right) + C_6 \lambda \tag{2.3}$$

Avec : $C_1 = 0,5176;\ C_2 = 116;\ C_3 = 0,4;\ C_4 = 5;\ C_5 = 21;\ C_6 = 0,0068.$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \tag{2.4}$$

Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, le couple mécanique C_t disponible sur l'arbre lent de la turbine peut donc s'exprimer par [21, 12] :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega} = \frac{\pi}{2\lambda} \rho R^3 v^2 C_p(\lambda, \beta) \tag{2.5}$$

b. Modèle de la partie mécanique

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R. Elles sont fixées sur un arbre d'entrainement tournant à une vitesse de rotation Ω_t, relié à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure 2.3) [20].

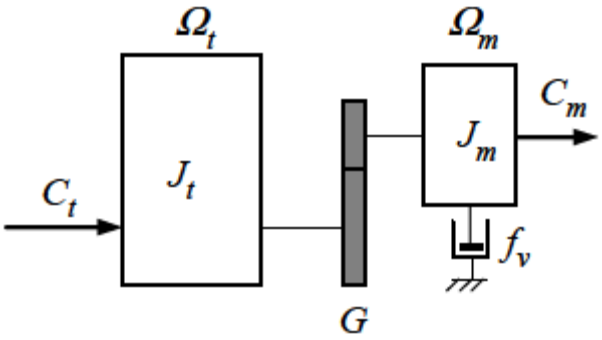


Figure 2-3. Modèle mécanique de la turbine éolienne

En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \tag{2.6}$$

$$\Omega_m = G\,\Omega_t \tag{2.7}$$

D'après la figure 2.3, l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA peut s'écrire comme suit :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right)\frac{d\Omega_m}{dt} + f_v.\Omega_m = C_m - C_{em} \tag{2.8}$$

Avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des trois pales de l'éolienne ;

J_m : Le moment d'inertie de la MADA ;

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la MADA ;

C_m : Le couple mécanique sur l'arbre de la MADA ;

Ω_m : La vitesse de rotation de la MADA ;

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

Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine basé sur ces équations, est donné par la figure 2.4 :

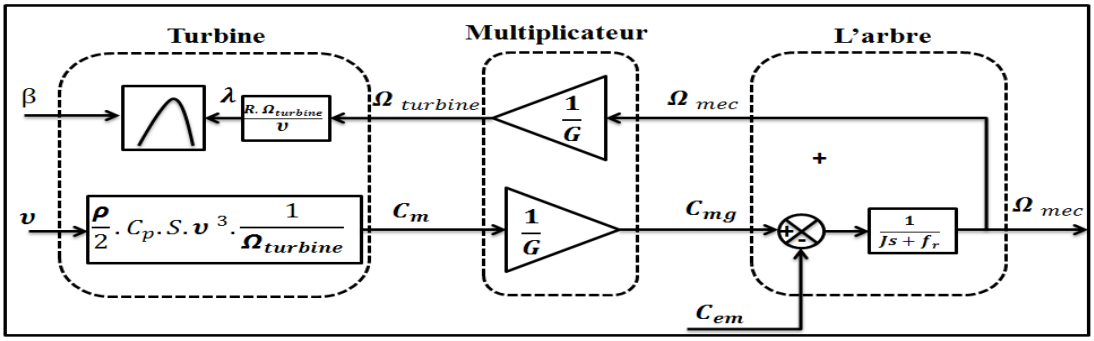


Figure 2-4. Schéma bloc du modèle de la turbine

2.3. Fonctionnement et modélisation de la MADA

2.3.1. Description de la machine

Elle a une dynamique très complexe à cause des interactions stator-rotor, ce qui rend la modélisation basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie du champ tournant insuffisante pour décrire son comportement dynamique.

2.3.2. Structure de la machine

La MADA est une machine triphasée à courant alternatif alimentée par ses deux armatures. Elle a connue depuis 1899 [22 ,18]. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques (Figure 2.5) [9].

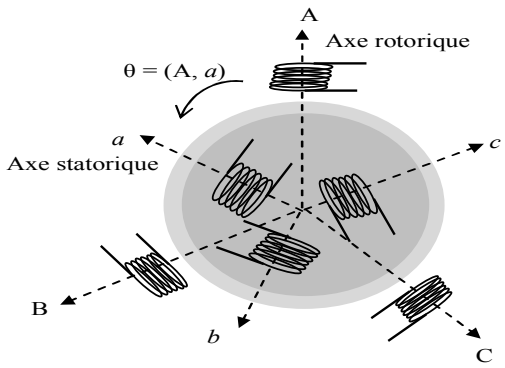


Figure 2-5. Représentation schématique d'une MADA.

Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un onduleur comme montre la figure 2.6.

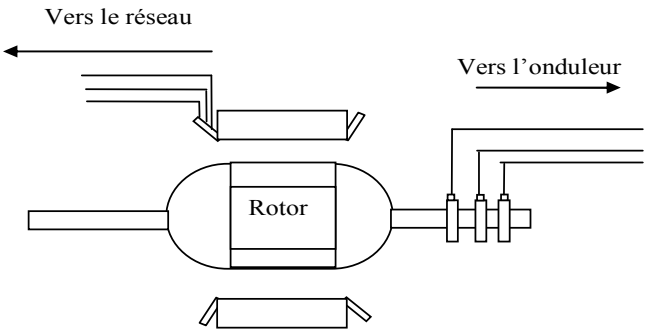


Figure 2-6.MADA connectée à deux réseaux triphasés

2.3.3. Mode de fonctionnement

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchrone aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On va présenter successivement ces différèrent modes de fonctionnement [15].

Les différentes modes de fonctionnent de la MADA dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié à ce dernier par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique (alternatif/alternatif) sont :

- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone ;
- Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone ;
- Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone ;
- Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

2.3.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure 2.7 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

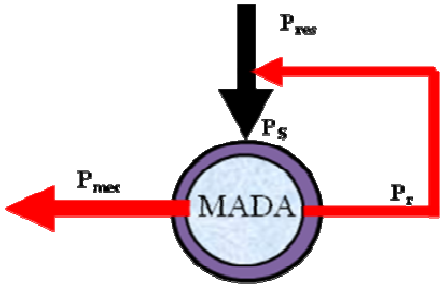


Figure 2-7. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

2.3.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure 2.8 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

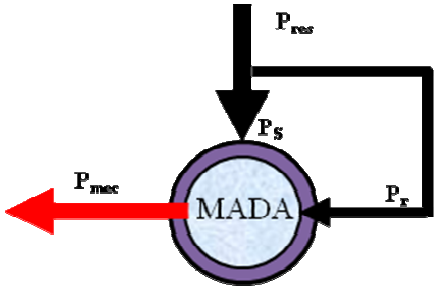


Figure 2-8. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

2.3.3.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure 2.9 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. On a de ce fait un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

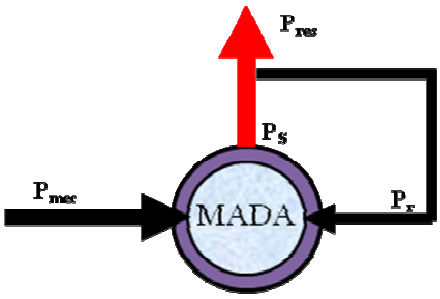


Figure 2-9. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

2.3.3.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure 2.10 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme [23].

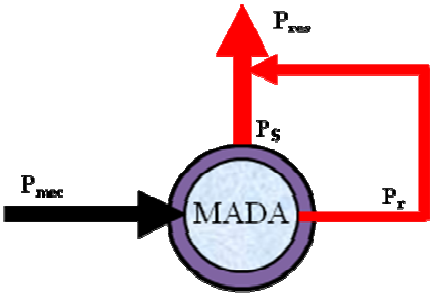


Figure 2-10. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

2.3.4. Alimentation de la MADA

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor. Ce dernier, qui est contrôlé par une technique de modulation de large impulsion (MLI), permet le réglage simultanément de la fréquence et la tension. L'objectif d'utilisation de la commande MLI est de réduire ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants [18].

2.3.4.1. Commande de la MADA par un seul onduleur

C'est la stratégie la plus simple et la plus utilisée dans les applications industrielles. Cette structure est illustrée par la figure 2.11:

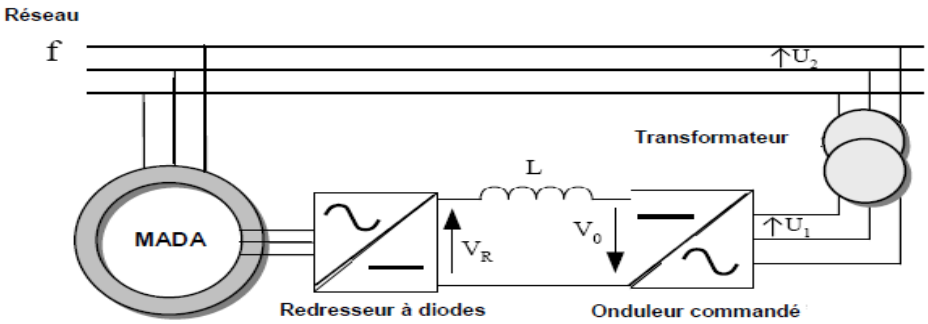


Figure 2-11.MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor.

Dans cette structure de commande, la MADA est alimentée à son stator par le réseau, tandis que le rotor est alimenté à travers un système de conversion qui comporte un redresseur, un filtre et un onduleur. Cette structure est appelée aussi la cascade hypo synchrone. Elle permet de contrôler la puissance active et réactive statorique à la fois en régime permanent et transitoire [24]. Dans ce cas, la

machine peut fonctionner en moteur ou générateur, mais l'application la plus courante est l'utilisation dans les systèmes de production d'énergie électrique notamment les systèmes éoliens et hydrauliques. On va baser l'étude sur cette configuration.

2.3.4.2. Commande de la MADA par deux onduleurs

Cette structure de commande consiste en une MADA alimentée par deux onduleurs, l'un au stator et l'autre au rotor. Elle peut prendre deux formes équivalentes [24, 25, 26] :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs. Dans ce cas c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés.
- Deux onduleurs alimentés en parallèles par un redresseur commun, ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés.

La première forme de cette stratégie de commande est illustrée par la figure 2.12.

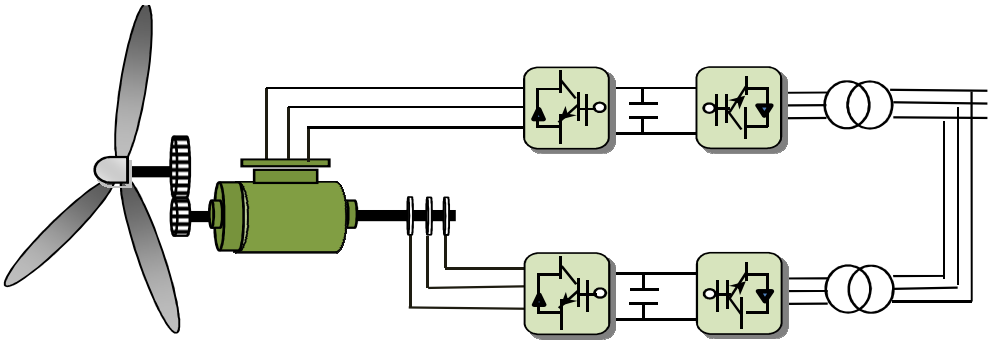


Figure 2-12.MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs.

Cette structure est évidemment la structure la plus générale du système. Les deux redresseurs ont une source d'alimentation commune qui est le réseau triphasé [24].

2.3.4.3. Commande de la MADA par un redresseur alimentant deux onduleurs en parallèle

Sa structure est semblable à la précédente, sauf que les onduleurs sont alimentés par un seul redresseur. Cette structure est représentée par la figure 2.13. Ces deux structures de commande sont utilisées généralement dans le fonctionnement en moteur, pour les applications de traction électrique [24].

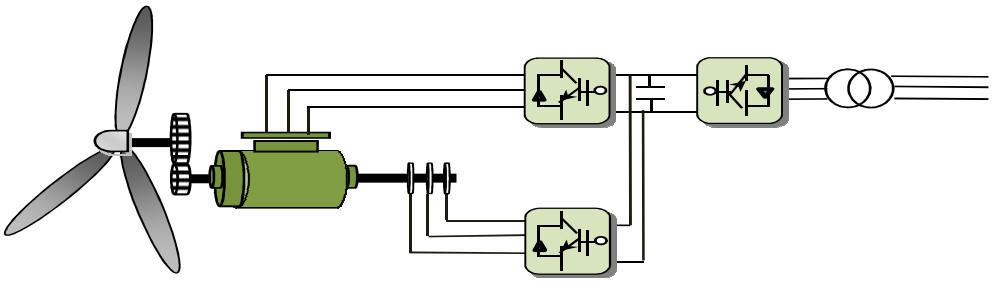


Figure 2-13. Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun

2.3.5. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

De façon à représenter au mieux le comportement d'une MADA en simulation, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis mais suffisamment simple pour que les temps de calcul du simulateur ne soient pas prohibitifs.

2.3.5.1. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la MADA est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- La f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est supposée sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additive des flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques [18].

2.3.5.2. Modèle mathématique de la MADA

En prenant en compte les hypothèses simplificatrices citées précédemment, on peut exprimer le modèle de cette machine en se basant sur les relations suivantes :

- Grandeurs statoriques

$$\begin{cases} [V_s] = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T \\ [I_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T \\ [\varphi_s] = [\varphi_{as} \varphi_{bs} \varphi_{cs}]^T \end{cases} \quad \textbf{(2.9)}$$

- Grandeurs rotoriques

$$\begin{cases} [V_r] = [v_{ar} v_{br} v_{cr}]^T \\ [I_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T \\ [\varphi_r] = [\varphi_{ar} \varphi_{br} \varphi_{cr}]^T \end{cases} \quad \textbf{(2.10)}$$

Les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \dfrac{d[\phi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \dfrac{d[\phi_r]}{dt} \end{cases} \quad \textbf{(2.11)}$$

V_s, V_r : Les tensions statoriques et rotoriques ;

I_s, I_r : Les courants statoriques et rotoriques ;

ϕ_s, ϕ_r : Les flux statoriques et rotorique respectivement ;

R_s, R_r : Les résistances par phase statorique et rotorique.

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad \textbf{(2.12)}$$

Où :

$[R_s], [R_r]$: sont les matrices des résistances statorique et rotorique ;

$[L_s], [L_r]$: sont les matrices des inductances propres statorique et rotorique ;

$[M_{sr}], [M_{rs}]$: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

$[M_{ss}], [M_{rr}]$: sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique ;

Avec :

$$\begin{cases} [R_s] = R_s[ID]_{3*3} \\ [R_r] = R_r[ID]_{3*3} \end{cases} \quad \textbf{(2.13)}$$

$$\begin{cases} [L_s] = L_s[ID]_{3*3} \\ [L_r] = L_r[ID]_{3*3} \end{cases} \quad \textbf{(2.14)}$$

$$[M_{ss}] = M_{ss}\begin{bmatrix} 0 & \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & 0 & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.15)}$$

$$[M_{rr}] = M_{rr}\begin{bmatrix} 0 & \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & 0 & \cos(2\pi/3) \\ \cos(2\pi/3) & \cos(2\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.16)}$$

$$[M_{sr}] = M\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.17)}$$

$$[M_{rs}] = M\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.18)}$$

Où :

$[ID]_{3*3}$: Est la matrice identité d'ordre 3 ;

R_s, R_r : sont les résistances statorique et rotorique par phase ;

L_s, L_r : sont les inductances statorique et rotorique par phase ;

$[M_{ss}], [M_{rr}]$: sont les maximums des inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques respectivement à axes confondus ;

M : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique pour $\theta = 0$.

2.3.5.3. Modèle de la MADA dans le repère de PARK

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel à des modèles plus simples dans des repères à nombre d'axes réduits permettant facilement la traduction mathématique de la machine.

Parmi ces modèles, on cite celui le plus utilisé dit modèle de PARK. Ce modèle a la possibilité de faire une transformation d'un système triphasé (a, b, c) au système équivalent biphasés (d, q) et inversement, ce système tourne à une vitesse qui dépend des grandeurs statoriques ou rotoriques. Pour réaliser cette transformation algébrique, on utilise les matrices de PARK directe et inverse (§ Annexe B).

En appliquant la transformée de PARK, on obtient :

- Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{ds} + \dfrac{d}{dt}(\varphi_{sd}) - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \dfrac{d}{dt}(\varphi_{sq}) + \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad \textbf{(2.19)}$$

– Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \dfrac{d}{dt}(\varphi_{rd}) - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \dfrac{d}{dt}(\varphi_{rq}) + (\omega_s - \omega_r)\varphi_{rd} \end{cases} \quad \textbf{(2.20)}$$

Nous devons tenir compte des équations liant les différents courants $(I_{si}, I_{ri}, i = d, q)$

– Au stator :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \quad \textbf{(2.21)}$$

– Au rotor :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{sq} \end{cases} \quad \textbf{(2.22)}$$

Où :

L_s : Inductance propre cyclique du stator ;

L_r : Inductance propre cyclique du rotor ;

L_m : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor.

a. Equation mécanique

Afin d'obtenir le modèle complet de la machine asynchrone doublement alimentée, il faut qu'on tienne compte de l'équation mécanique, qui est :

$$\frac{J}{p}\frac{d(\omega_r)}{dt} = C_e - C_r - C_f \quad \textbf{(2.23)}$$

Où :

J : Moment d'inertie des parties tournantes ;

C_r : Couple résistant ;

C_f : Couple de frottement.

Le couple de frottement est donné par :

$$C_f = \frac{f_r}{p}\omega_r = f_r \Omega \quad \textbf{(2.24)}$$

Avec f_r : Coefficient de frottement visqueux.

Enfin l'équation mécanique peut être formulée par :

$$J\frac{d\Omega}{dt}=\left(\frac{J}{p}\frac{d\omega_r}{dt}\right)=-\frac{2}{3}p\frac{L_m}{L_s}\left(\varphi_{rd}I_{sq}-\varphi_{rq}I_{sd}\right)-C_r-f_r\Omega \quad \textbf{(2.25)}$$

2.3.5.4. Choix de référentiel

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de PARK pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique [27] :

a. Référentiel lié au stator

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α,β) qui est immobile par rapport au stator $(\omega_\alpha=0)$. Il est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [9, 27].

b. Référentiel lié au rotor

Dans ce cas, le système d'axes (x,y) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $(\omega_\alpha=\omega_r)$. Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [9, 27].

c. Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (d,q), qui est immobile par rapport au champ tournant, c'est-à-dire $(\omega_\alpha=\omega_s)$ [9, 27].

2.3.6. Avantages et inconvénients

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

2.3.6.1. Avantages

Les principaux avantages de la MADA sont :

– L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [28].

– La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [29, 30] ;

– Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [28] ;

– L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur [29] ;

– En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [29] ;

– Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [28] ;

– Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [30].

2.3.6.2. Inconvénients

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

– Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [24] ;

– Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multiconvertisseurs augmente le nombre de convertisseurs, et par conséquent le prix [24] ;

– on utilise un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [30] ;

– Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, c'est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du

stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [28].

2.4. Modélisation de l'alimentation de la MADA

Le fonctionnement avec convertisseur statique est effectué en utilisant un seul convertisseur au rotor composé d'un redresseur à diodes, un bus continu et d'un onduleur à IGBTs alors que le stator est relié directement à la source triphasé. La MLI utilisée est régulière, triangulaire, symétrique. Les IGBTs sont choisis en raison de la simplicité de leur commande et de la rapidité de leur commutation, malgré un coût supérieur des thyristors.

2.4.1. Structure du convertisseur statique (redresseur à MLI.onduleur)

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables par la commande. Après redressement, la tension filtrée V_{dc} est appliquée à l'onduleur. Il est le cœur de l'organe de commande de la MADA et peut être considéré comme un amplificateur de puissance.

Le schéma structurel des onduleurs triphasés à deux niveaux et de ses charges est illustré par la figure 2.14. Chaque IGBT–diode assemblé en parallèle forme un interrupteur bicontrôlable (à l'ouverture et à la fermeture) dont l'état apparaît complémentaire à celui qui lui est associé pour former ainsi un bras de commutation par exemple K_{11} *et* K_{12}.

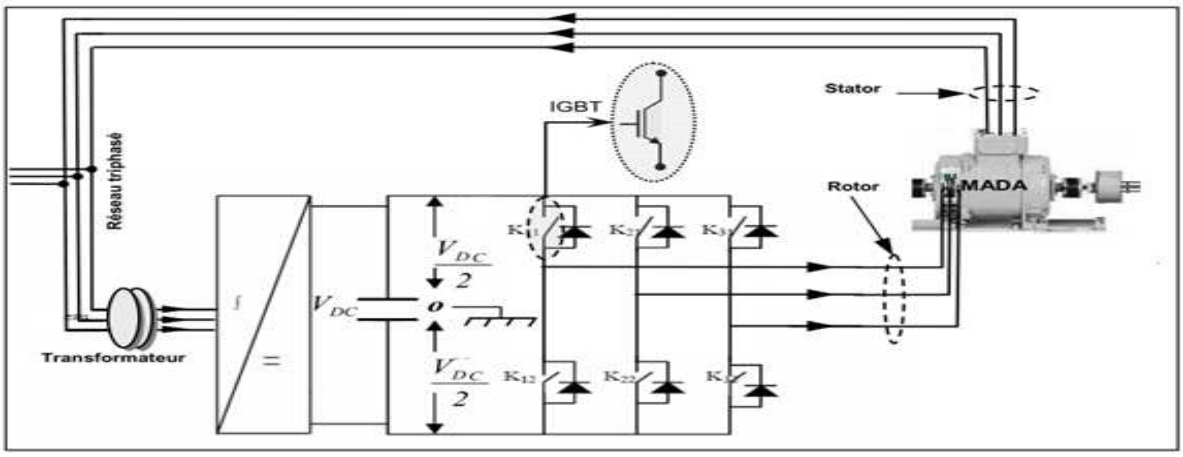


Figure 2-14. Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA

Les couples d'interrupteurs $(K_{11}\ et\ K_{12}), (K_{21}\ et\ K_{22}), (K_{31}\ et\ K_{32})$ doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. Les diodes $\left(D_{i(i=1,2,3,.....,6)}\right)$ sont des diodes à roue libre assurant la protection des IGBTs. L'état des interrupteurs, supposés parfaits peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande $\left(S_{i(i=a,b,c)}\right)$.

- $S_i = 1$, le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$, le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Ainsi, on peut écrire les tensions de phase $V_{ina,b,c}$ en fonction des signaux de commande S_i :

$$V_{ina,b,c} = S_i V_{DC} - \frac{V_{DC}}{2} \tag{2.26}$$

Les trois tensions composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « 0 ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} + V_{0b} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} + V_{0c} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} + V_{0a} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases} \tag{2.27}$$

Soit *n* le point neutre du côté alternatif (MADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \tag{2.28}$$

La charge est considérée équilibrée, il en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{2.29}$$

La substitution de (2.28) dans (2.27) donne :

$$V_{n0} = -\frac{1}{3}\left(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}\right) \tag{2.30}$$

En remplaçant (2.30) dans (2.28), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{aà} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{a0} + \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases} \quad \textbf{(2.31)}$$

L'utilisation de l'expression (2.26) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.32)}$$

Avec V_{a0}, V_{b0} *et* V_{c0} comme les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), et si V_{an}, V_{bn} *et* V_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur, par conséquent, l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert T donnée par :

$$T = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2.33)}$$

2.4.2. Modulation de Largeur d'Impulsion

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur**.** Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont: La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis. L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement [12].

Dans ce travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux figure 2.15.

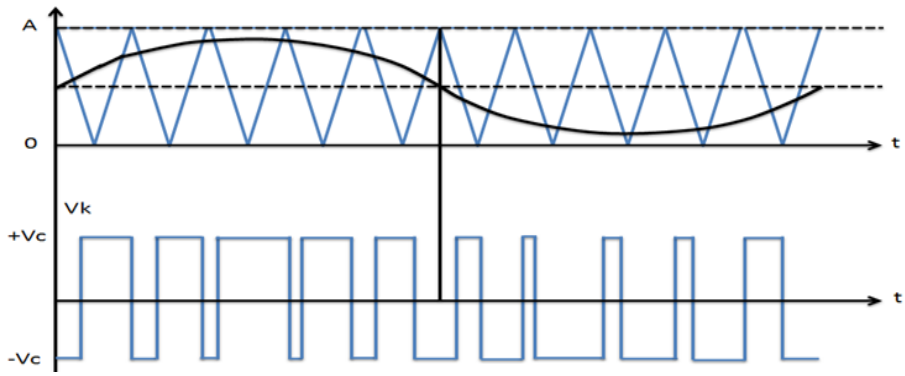


Figure 2-15. Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

– Le premier, c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.

– Le second, qui est appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur d'amplitude V_{mod} :

$$V_{\text{mod}} = \frac{V_m}{V_p} \tag{2.34}$$

V_p : Valeur de crête de la porteuse ;

V_m : Valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi, on peut agir sur l'indice de modulation m :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \tag{2.35}$$

f_p : Fréquence de la porteuse ;

f_m : Fréquence de la modulante.

La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut exactement :

$$V_{i\max} = \frac{V_{DC}}{3} V_{\text{mod}} \tag{2.36}$$

V_{DC} : La tension continue à l'entrée de l'onduleur.

2.4.3. Modélisation du redresseur triphasé à diodes

Le redresseur est un convertisseur « AC/DC ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif et il est représenté par la figure 2.16 :

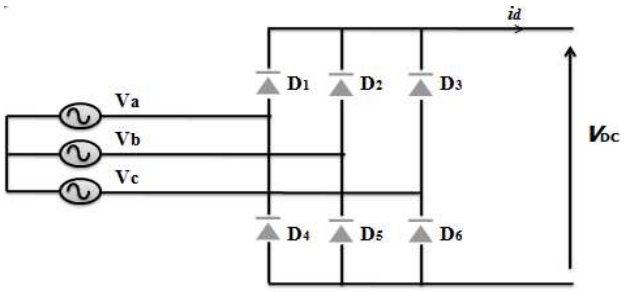


Figure 2-16. Représentation du redresseur triphasé à diodes

Ce redresseur comporte trois diodes (D_1, D_2, D_3) à cathode commune assurant l'allée du courant I_d et trois diodes (D_4, D_5, D_6) à anode commune assurant le retour du courant I_d. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension.

$$\begin{cases} V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \dfrac{2\pi}{3}\right) \\ V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \dfrac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \textbf{(2.37)}$$

Et si on néglige l'effet d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suite :

$$V_{red}(t) = max\left[V_a(t), V_b(t), V_c(t)\right] - min\left[V_a(t), V_b(t), V_c(t)\right] \quad \textbf{(2.38)}$$

2.5. Résultats de simulation

Conditions d'essais :

- Vitesse du vent moyenne est de $16 m/s = 57.6\, km/h.$
- Angle de calage des pales β est de 5°.
- Tension coté rotor est de $225 V$.
- Fréquence de modulation est de $5 kHz.$.

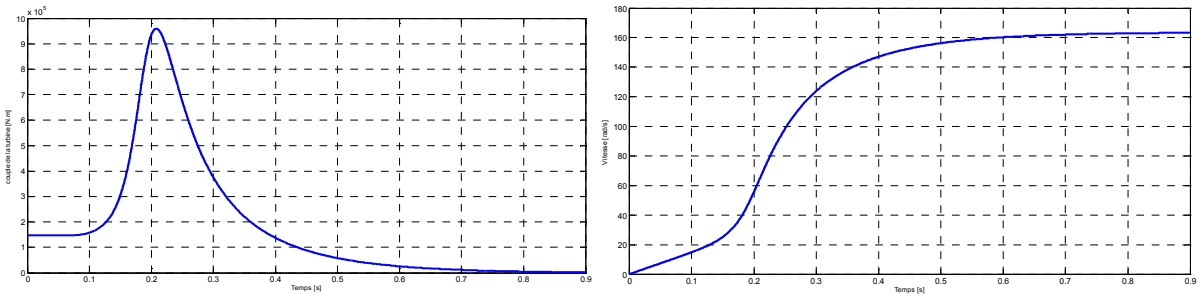


Figure 2-17. Couple de la turbine et la vitesse de rotation

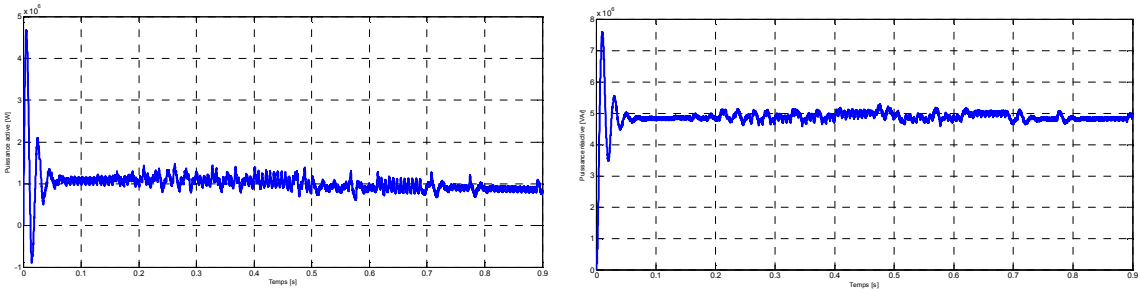


Figure 2-18. Puissances active et réactive statoriques

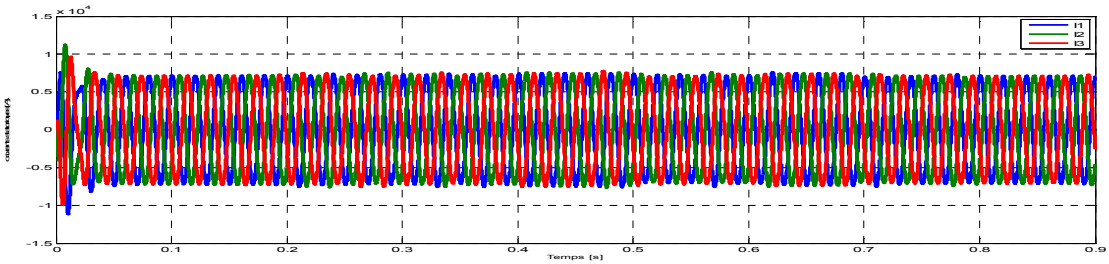


Figure 2-19. Courants statoriques

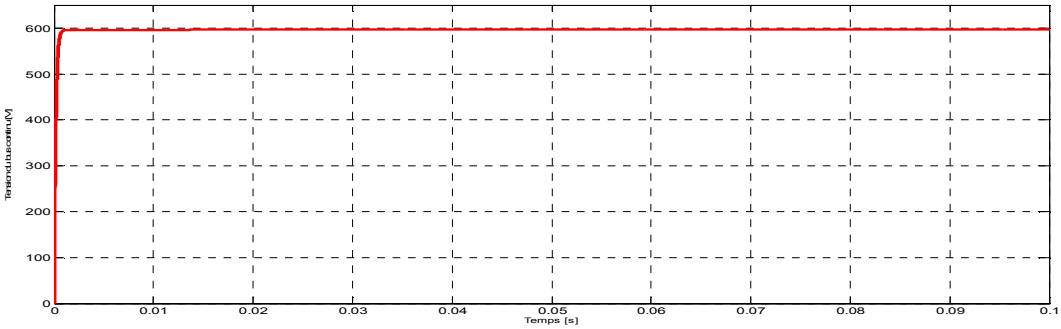


Figure 2-20. Tension du bus continu

Les résultats de simulation obtenus montrent que la réponse dynamique de la vitesse croit rapidement. Cette dernière atteint une valeur légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme (163,5 rad/ s) cela dépend de plusieurs paramètres, principalement, la vitesse du vent, l'angle de calage β et la tension rotorique. Des fluctuations sont présentées au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Notons aussi que la machine génère plus d'énergie réactive que d'énergie active ce qui donne un facteur de puissance non unitaire $(\cos\varphi \neq 1)$ et détériore le facteur de puissance global du réseau. La figure 2.19 représente le déphasage entre la tension et le courant d'une phase statorique.

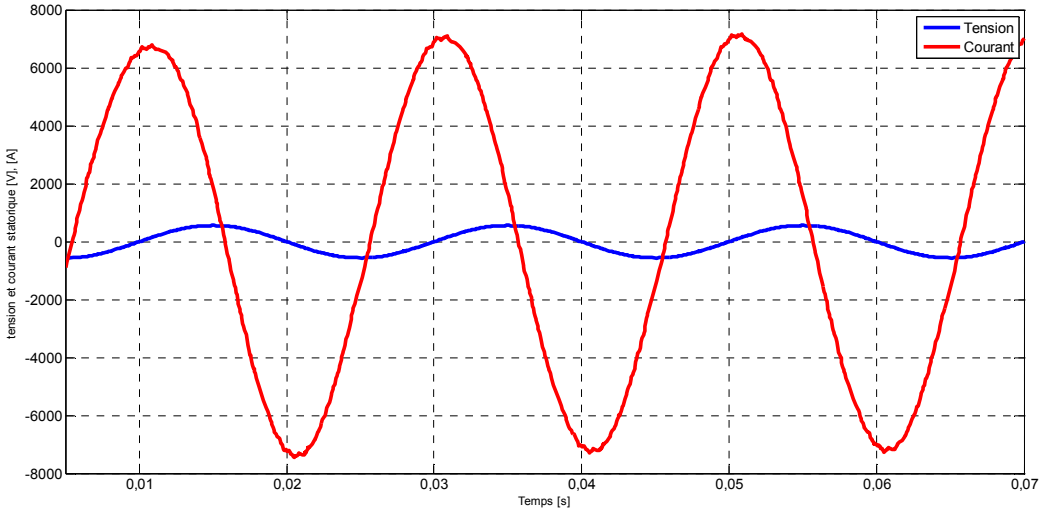


Figure 2-21.Déphasage entre tension et courant d'une phase statorique de la GADA

Comme la MADA sera utilisée comme une génératrice dédiée à une application du type éolien. Notre étude est orientée vers l'échange des puissances actives et réactives. Dans un repère diphasé (d,q) quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}.I_{sd} + V_{sq}.I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}.I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad \textbf{(2.39)}$$

Le couplage entre la puissance active P_s et la puissance réactive Q_s est visiblement remarquée dans l'équation (2.39). Donc, pour éliminer le couplage existant, on a recours à la commande vectorielle qui permet d'avoir un contrôle indépendant de la puissance active et réactive et un contrôle du facteur de puissance.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation des différentes parties d'une chaine de production éolienne a été présentée. La structure d'une machine asynchrone à double alimentation, le principe de fonctionnement et les domaines d'utilisation de cette machine ont été abordés. Pour simplifier le modèle de la machine, un modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d,q) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK a été établi.

Les résultats obtenus en simulation montrent des fluctuations au niveau des puissances dues à la technique MLI à cause de la commutation des interrupteurs. Sachant que le modèle de la MADA est fortement couplé et le facteur de puissance statorique est détérioré. Il est utile de trouver une méthode de commande permettant de rendre le contrôle de la puissance active et réactive indépendant en fonctionnement génératrice et qui permet de faire fonctionner la machine à facteur de puissance unitaire au stator.

Ainsi, le chapitre suivant fera l'objet du découplage des puissances active et réactive par la commande vectorielle directe et indirecte basées sur la technique d'orientation du flux statorique et qui permettent un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

Chapitre 03

COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA

3.1. Introduction

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de BLONDEL sur la théorie de la réaction des deux axes [12]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu MCC à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [31].

Dans ce but, BLASCHKE (1971) et HASSE ont proposé une méthode de contrôle vectoriel de la machine asynchrone. Et dans ce sens, la commande vectorielle dite aussi 'commande à flux orienté' devient d'une importance majeure puisqu'elle résous les problèmes du couplage des variables de la machine [26]. Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment. Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales :

- Méthode directe développée par BLASCHKE.
- Méthode indirecte développée par HASSE.

Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer :

- Suivant la source d'énergie :

- Commande en tension ;
- Commande en courant.

- Suivant l'orientation du repère (d, q) [32]:

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- Le flux de l'entrefer.

- Suivant la détermination de la position du flux :

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

3.2. Définition de la commande vectorielle

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires [33].

Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en contrepartie, elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour toutes les machines à courant alternatif. La technique de la commande appliquée à cette machine est réalisée aux moyens des régulateurs PI pour la puissance active et réactive statoriques et pour les courants rotoriques pour déterminer les rapports cycliques des interrupteurs utilisés pour réaliser une modulation de largeur d'impulsion du convertisseur statique [12].

3.3. Principe de la commande à flux orienté

Dans ce type de commande, la machine est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la figure 3.1. Le courant i_{rd} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant i_{rq} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes i_{rd} et i_{rq} sont mutuellement découplées.

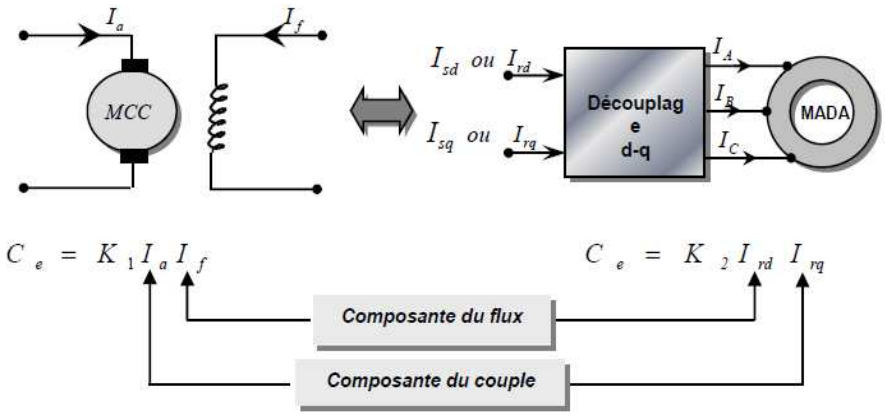


Figure 3-1. Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu

3.3.1. Choix de référentiel

Il existe trois types de commandes de façon que l'axe d soit confondu avec l'axe du flux qui peut être :

- Flux rotorique : $\phi_{rd} = \phi_r$
- Flux statorique : $\phi_{sd} = \phi_s$
- Flux d'entrefer : $\phi_{gd} = \phi_g$

Le flux peut être représenté sous la figure 3.2 :

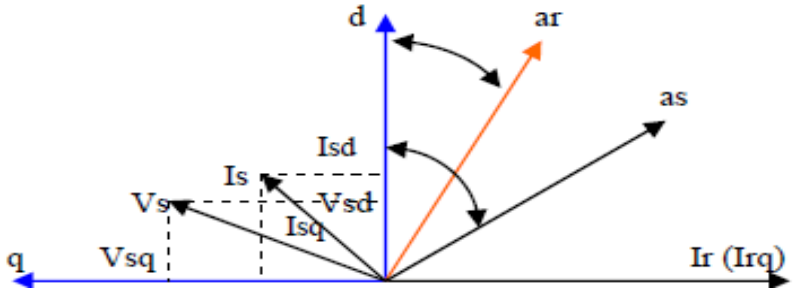


Figure 3-2. Orientation du flux statorique, rotorique et d'entrefer.

3.3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Les tensions liées au flux statorique selon l'axe d et q peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \dfrac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \dfrac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \dfrac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega)\varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \dfrac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega)\varphi_{rd} \end{cases} \tag{3.1}$$

Les équations du flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sdq} = L_s I_{sdq} + L_m I_{rdq} \\ \varphi_{rdq} = L_r I_{rdq} + L_m I_{sdq} \end{cases} \tag{3.2}$$

Le couple mécanique est donné par la relation suivante :

$$\begin{aligned} C_{méc} &= -\frac{3}{2} p\left(\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}\right) = -\frac{3}{2} p\left(\varphi_{rq} I_{rd} - \varphi_{rd} I_{rq}\right) \\ &= C_r + J\frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \end{aligned} \tag{3.3}$$

En explicitant les flux statoriques et rotoriques on vérifie que :

$$\begin{aligned} C_{méc} &= C_e = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s}\left(\varphi_{rd} I_{sd} - \varphi_{rq} I_{sd}\right) \\ &= -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r}\left(\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}\right) \end{aligned} \tag{3.4}$$

On appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine, les équations (3 .1), (3.2) et (3.4) deviennent :

$$C_e = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \left(\varphi_{sd} I_{rq} \right) \tag{3.5}$$

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \varphi_s \end{cases} \tag{3.6}$$

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \end{cases} \tag{3.7}$$

A partir de l'équation (3.7), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = \dfrac{\varphi_s}{L_s} - \dfrac{L_m}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\dfrac{L_m}{L_s} I_{rq} \end{cases} \tag{3.8}$$

3.3.3. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances actives et réactives statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \tag{3.9}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas $(V_{sd} = 0)$ donne :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \tag{3.10}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (3.8) dans l'équation (3.10), on obtient les expressions suivantes pour les puissances actives et réactives :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = V_s \dfrac{\varphi_s}{L_s} - V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \tag{3.11}$$

En tirant $\varphi_s = \dfrac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (3.6), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s L_m}{L_s} I_{rd} \tag{3.12}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante L_m comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe q et la puissance réactive au courant rotorique d'axe d à la constante $\left(V_s^2 / \omega_s L_s\right)$ après imposée par le réseau.

3.3.4. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, en remplaçant dans l'équation (3.2) les valeurs des courants statoriques de l'équation (3.8), et en remplaçant le résultat ainsi obtenu dans l'équation (3.1). Ainsi, nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right)\dfrac{d}{dt} I_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right)\dfrac{d}{dt} I_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + g_s \dfrac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \tag{3.13}$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire [18] :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \dfrac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \tag{3.14}$$

Où g correspond au glissement de la machine asynchrone.

V_{rd} et V_{rq} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les composer.

En revanche, le terme $g\dfrac{L_m V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraine une erreur de trainage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Les équations (3.10), (3.11) et (3.13) permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à réguler (figure 3.3). Les termes de couplage sont désignés par v_2 , v_3 et les f.é.m. par v_1 et v_4 .

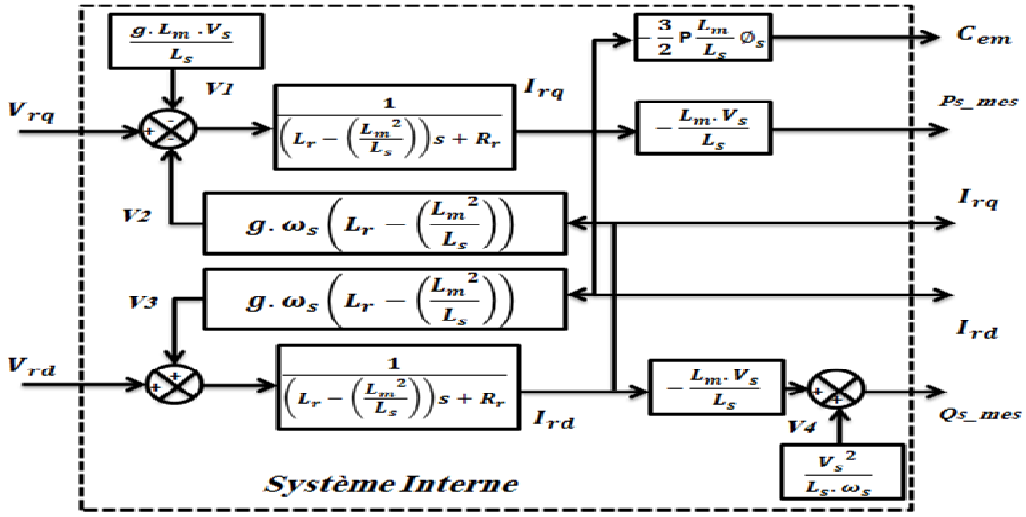


Figure 3-3. Schéma bloc du système à réguler

Dans ce schéma, on a fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique.

La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [15] :

– La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et

réactives. Cette méthode sera appelée « méthode directe » car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

– La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode, appelée méthode indirecte, découle directement des équations (3.11) et (3.13).

L'intérêt, que présente la méthode directe, est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ; ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants ou de rajouter une référence de courant harmonique pour faire fonctionner la MADA en filtre actif, mais elle est complexe à mettre en œuvre [12].

3.3.5. Contrôle indépendant des puissances active et réactive

3.3.5.1. Commande vectorielle directe

a. Définition générale

Cette méthode de commande a été proposée par BLASCHKE. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quel que soit le régime transitoire effectué.

L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères ; telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leurs fréquences varient avec la vitesse, ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [18, 28].

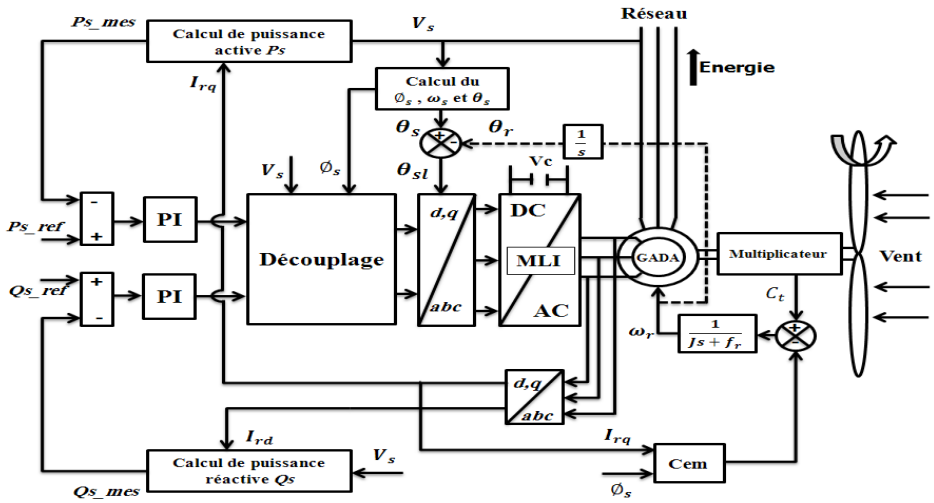


Figure 3-4. Schéma synoptique de la commande vectorielle directe de la GADA.

b. Commande directe en puissance active et réactive de la MADA

Dans cette section, on présente la régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension V_{rq} et d'autre part la puissance réactive et la tension V_{rd}.

Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme $\frac{L_m V_s}{L_s}$. Dans cette étude, on a considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant. On ne placera donc pas des régulateurs entre les courants rotoriques et les puissances.

Pour simplifier la commande de la MADA, on considère que la tension du réseau est stable, ce qui permet d'utiliser une seule boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant. Toutefois, on négligera les termes de couplage entre les deux axes, qui apparaît dans la figure 3.3 à cause du faible glissement, tout en compensant aussi les perturbations ce qui donne le schéma simplifié représenté dans la figure 3.5.

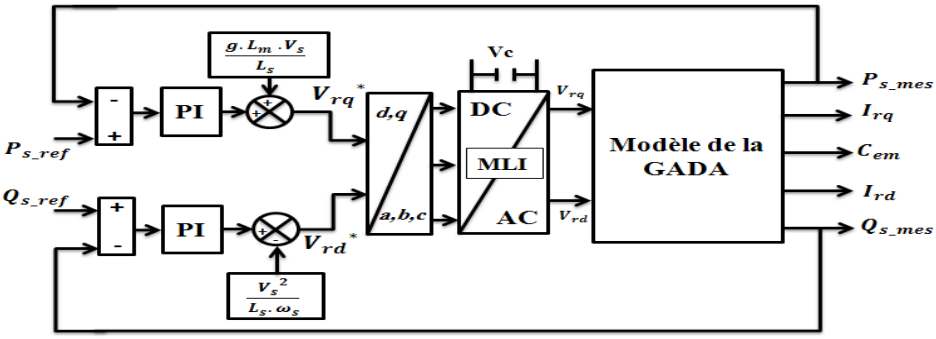


Figure 3-5. Schéma bloc de commande directe des puissances actives et réactives.

3.3.5.2. Commande vectorielle indirecte

a. Définition générale

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux, mais seulement sa position, l'idée est proposée par HASSE. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs. Elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [12, 18].

b. Commande indirecte en puissance active et réactive de la MADA

En se basant sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini dans la modélisation au paragraphe (3.3) ; tout en gardant les mêmes hypothèses. Et en combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, on peut exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courant rotoriques et on trouve :

$$\begin{cases} V_{rd} = \left(g\,\omega_s \dfrac{\left(L_r - \dfrac{L_s^2}{L_s}\right)}{\dfrac{L_m V_s}{L_s}} \right) P_s - \left(\dfrac{R_r + \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right)}{\dfrac{L_m V_s}{L_s}} \right) Q_s + \left(\dfrac{R_r V_s}{\omega_s L_s} + \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right) \dfrac{V_s}{\omega_s L_m} p \right) \\ V_{rq} = -\left(\dfrac{R_r + \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right)}{\dfrac{L_m V_s}{L_s}} p \right) P_s - \left(g\,\omega_s \dfrac{\left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right)}{\dfrac{L_m V_s}{L_s}} \right) Q_s + g\,\omega_s \left(L_r - \dfrac{L_m^2}{L_s}\right) \dfrac{V_s}{\omega_s L_m} \end{cases} \quad \textbf{(3.15)}$$

c. Commande avec boucle du courant

Dans le but d'améliorer la commande directe, on va introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des courants afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. On aboutit au schéma bloc présenté à la figure 3.6 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle.

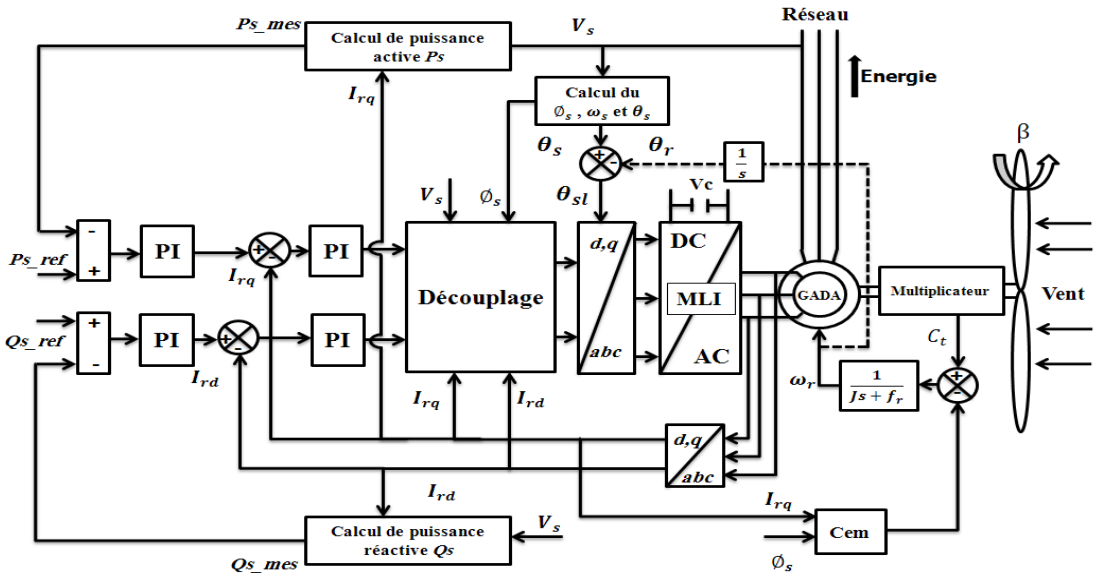


Figure 3-6. Schéma synoptique de la commande indirecte avec boucles des puissances et des courants.

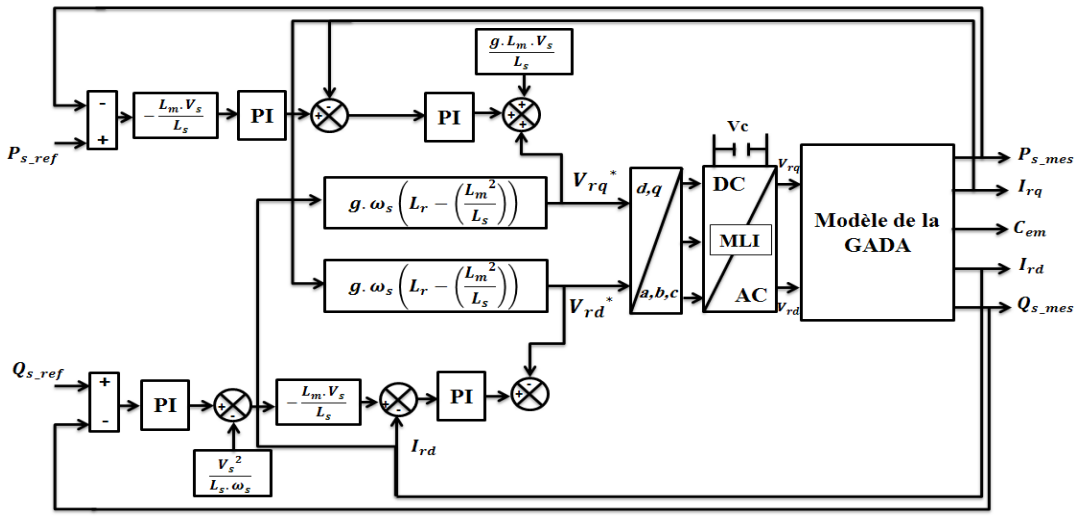


Figure 3-7. Schéma bloc de commande indirecte des puissances et des courants.

3.4. Etude de la régulation pour la commande

Nous avons utilisé des régulateurs de type Proportionnel-Intégral (PI) en raison de leur performance et de leur rapidité de calcul. Leur tâche est non seulement de comparer les valeurs réelles mesurées avec les valeurs de référence, mais aussi de stabiliser le système à réguler. Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs [12]. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donnés la complexité et le nombre important des capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température. Le dispositif de mesure de puissance de référence est constitué d'un transformateur de Park (V, I) et d'un bloc de mesure de puissance (P_s, Q_s).

3.4.1. Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

La synthèse de régulateur Proportionnel-Intégral reste la plus communément utilisée pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriels. Pour rendre possible, dans notre cas, la synthèse d'un régulateur PI classique, nous allons faire un certain nombre d'hypothèses dans le but de linéariser et de simplifier le modèle de la machine, avec une fonction de transfert du premier ordre sur les grandeurs d'entrée de chaque axe représentant l'onduleur de tension.

La première simplification consiste à introduire deux nouvelles perturbations sur les grandeurs de commande $(\varepsilon_d \ et \ \varepsilon_q)$ qui représentent les résidus de découplage et les perturbations. Nous avons

également choisi de mesurer la perturbation v_4 pour améliorer le comportement des régulateurs sur l'axe d. Les deux axes sont ainsi considérés comme découplés [12].

La deuxième simplification considère le terme constant v_4 comme une perturbation qui devra être rejetée par la loi de commande. Finalement, ces hypothèses de travail nous permettent de changer le problème de commande multi-variable en deux problèmes linéaires mono-variables comme indiqué sur la figure 3.8.

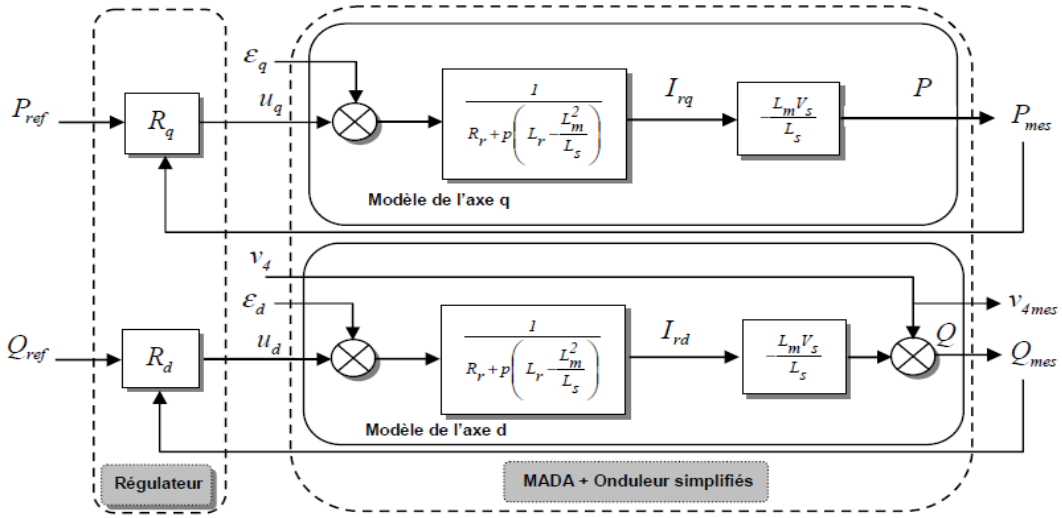


Figure 3-8. Problème de commande simplifié (contrôle directe).

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle simplifié de la figure 3.3.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \dfrac{V_s^2}{L_s \omega_s} - V_s \dfrac{L_m}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad \textbf{(3.16)}$$

3.4.2. Calcul des régulateurs

3.4.2.1. Calcul des paramètres du régulateur PI pour le contrôle des puissances

C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre. La figure 3.9 montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI.

Dans notre cas la fonction de transfert du régulateur est $K_p + \frac{K_i}{p}$ qui correspond aux régulateurs R_q et R_d de la figure 3.8. Les valeurs de A et B sont :

$$\begin{cases} A = R_r + pL_r\left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right) \\ B = \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad \textbf{(3.17)}$$

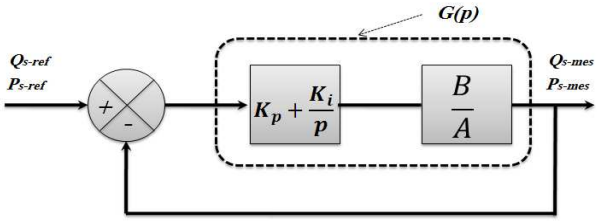


Figure 3-9. Schéma de bloc d'un système régulé par un PI pour les puissances.

On pose que $\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right)$

Pour les axes d et q, la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence des régulateurs est :

$$G(p) = \left(\frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}}\right)\left(\frac{\frac{L_m V_s}{L_r L_s \sigma}}{p + \frac{L_s R_r}{L_r L_s \sigma}}\right) \quad \textbf{(3.18)}$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante:

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{L_r.\sigma} \quad \textbf{(3.19)}$$

Nous notons ici que l'intérêt de la compensation des pôles ne se manifeste uniquement que si les paramètres de la machine sont identifiés avec précision puisque les gains K_p et K_i sont établis en fonction de ces mêmes paramètres. Si les paramètres réels sont différents de ceux utilisés dans la synthèse, la compensation est inefficace.

Si les pôles sont parfaitement compensés, la fonction de transfert en boucle ouverte devient alors:

$$G(p) = \frac{K_p \dfrac{L_m.V_s}{L_r.L_s.\sigma}}{p} \tag{3.20}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$H(p) = \frac{1}{1 + p\tau_r} \tag{3.21}$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{1}{K_p} \frac{L_r.L_s.\sigma}{L_m.V_s} \tag{3.22}$$

Le terme τ_r désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à $1ms$, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de $1,5MW$. Les termes K_i et K_p sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine :

$$\begin{cases} K_p = \dfrac{L_r.L_s.\sigma}{\tau_r.L_m.V_s} \\ K_i = \dfrac{L_s.R_r}{\tau_r.L_m.V_s} \end{cases} \tag{3.23}$$

3.4.2.2. Calcul des paramètres du régulateurs PI pour le control des courants

Les gains de régulateurs PI sont calculés de la même manière qu'à la méthode précédente. Dans ce cas, on déduit la fonction de chaque composante du courant rotorique est calculée à partir de l'équation (3.13) de telle sorte que les termes de couplages soient négligés.

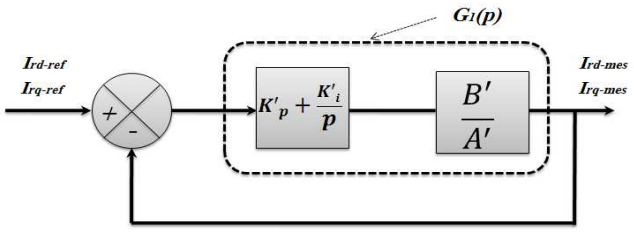


Figure 3-10. Schéma bloc d'un système régulé par un PI pour les courants.

Les valeurs de A' et B' sont :

$$\begin{cases} A' = R_r + p.L_r\left(1 - \dfrac{L_m^2}{L_s L_r}\right) \\ B' = 1 \end{cases} \tag{3.24}$$

Pour les axes d et q , la fonction de transfert en boucle ouverte intégrant la présence du régulateur est :

$$G_1(p) = \left(\frac{p + \dfrac{K_i'}{K_p'}}{\dfrac{p}{K_p'}}\right)\left(\frac{\dfrac{1}{L_r.\sigma}}{p + \dfrac{R_r}{L_r.\sigma}}\right) \tag{3.25}$$

En appliquant la méthode de compensation des pôles à la fonction de transfert (3.25), ce qui se traduit par l'égalité suivante:

$$\frac{K_i'}{K_p'} = \frac{R_r}{L_r.\sigma} \tag{3.26}$$

Après la compensation des pôles, la fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$G_1(p) = \frac{K_p' \dfrac{1}{L_r.\sigma}}{p} \tag{3.27}$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime alors par :

$$H_1(p) = \frac{1}{1 + p.\tau_r} \tag{3.28}$$

Avec :

$$\tau_r = \frac{L_r.\sigma}{K_p'} \tag{3.29}$$

Les termes K_p' et K_i' pour le contrôle des courants rotoriques sont alors exprimés en fonction de temps de réponse τ_r et des paramètres de la machine :

$$\begin{cases} K_p' = \dfrac{L_r.\sigma}{\tau_r} \\ K_i' = \dfrac{R_r}{\tau_r} \end{cases} \tag{3.30}$$

3.5. Résultats de simulation

La simulation de la partie électrique de la machine, et de la commande directe et indirecte a été implantée dans l'environnement Matlab/Simulink afin d'effectuer des tests de régulation. On a donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer son comportement.

3.5.1. Commande vectorielle directe

Les gains des correcteurs sont calculés à partir des équations de la section (3.4.2) et ont été affinés après simulation afin de mieux apprécier les performances des régulateurs PI dans la configuration du système éolien. Dans cet essai, le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé par la technique MLI (naturelle).

Condition d'essais :

- La tension rotorique est de $220\,V$;
- La fréquence de commutation des interrupteurs IGBT de l'onduleur est de $4\,kHz$.

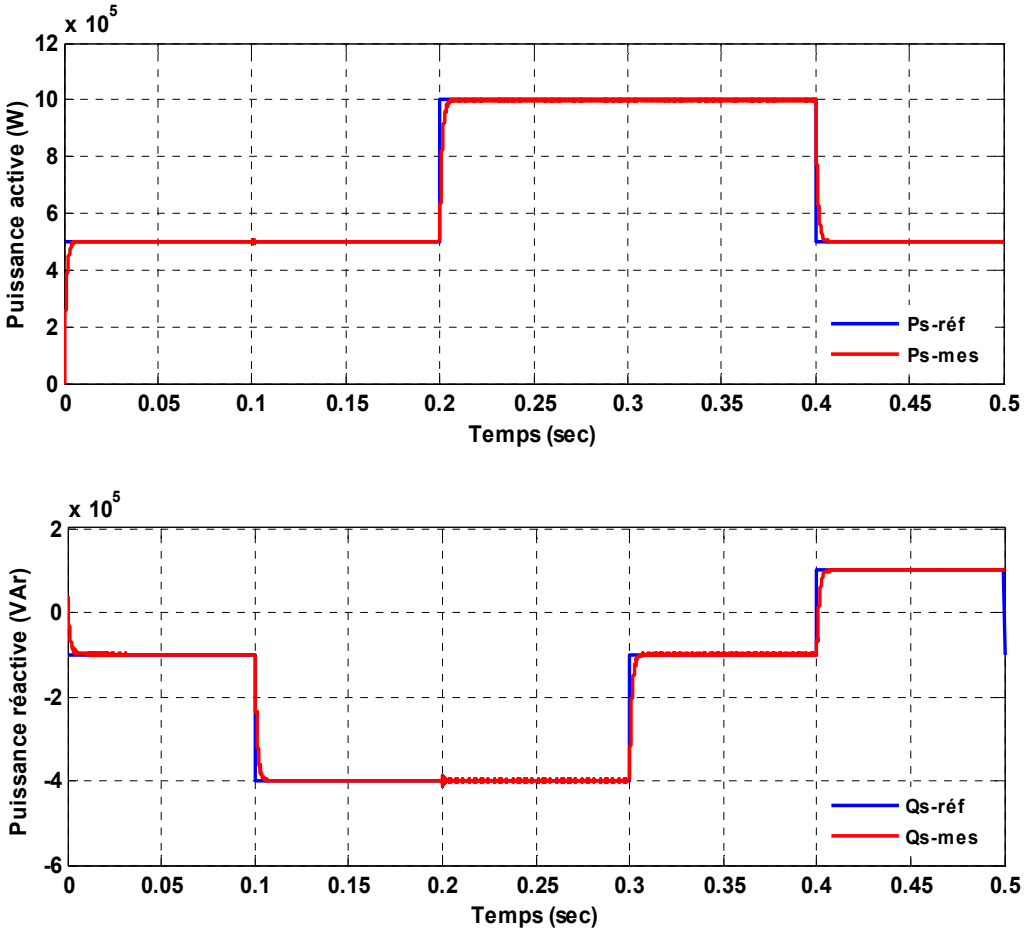


Figure 3-11.Résultats de simulation pour la commande directe

On remarque que les échelons de puissance sont bien suivis les puissances mesurées aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant, on observe l'effet du couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (actives ou réactives) induit de faibles oscillations sur la seconde à cause de la commutation des interrupteurs de l'onduleur.

3.5.2. Commande indirecte

Les gains des correcteurs sont calculés à partir des équations (3.23) et (3.30). On modifie le temps de réponse du système. On garde les mêmes paramètres de l'onduleur utilisé dans la commande directe et les mêmes conditions de simulation précédentes.

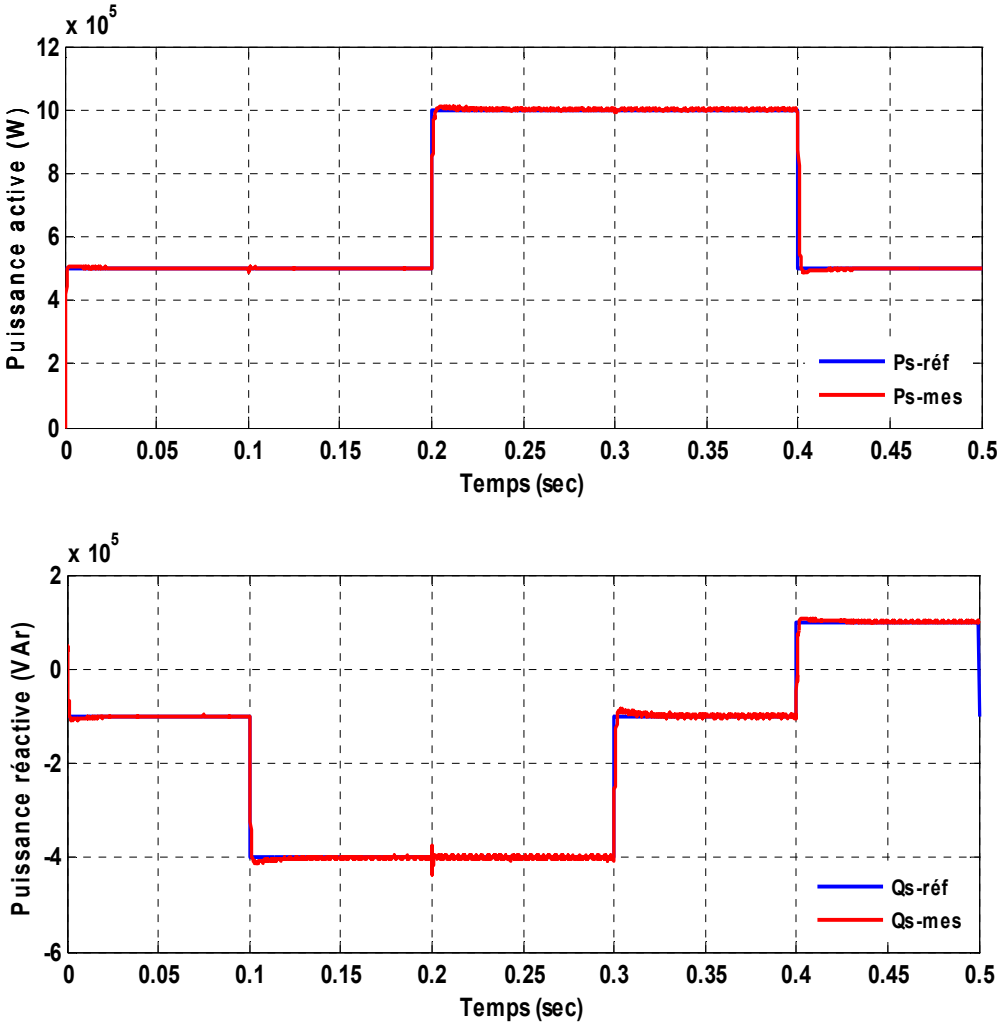


Figure 3-12.Résultats de simulation pour la commande indirecte

On remarque que ce soit pour la puissance active ou réactive, une dynamique qui réagit rapidement. Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible. Il ne devrait pas poser de problème pour la suite de

l'exploitation du modèle de la machine. Aussi sur l'influence de l'onduleur sur la commande sont les mêmes que le cas de la commande directe.

3.5.3. Contrôle de facteur de puissance

Pour remédier au problème posé dans le chapitre précédent concernant la détérioration du facteur de puissance côté réseau, dans cette partie, on bénéficie d'un avantage parmi plusieurs avantages qui nous offre la commande vectorielle de la MADA. Dans ce premier cas, la consigne de puissance réactive statorique sera maintenue nulle $(Q_s - réf = 0\ MVAr)$ et la puissance active garde la valeur précédente, pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal [12].

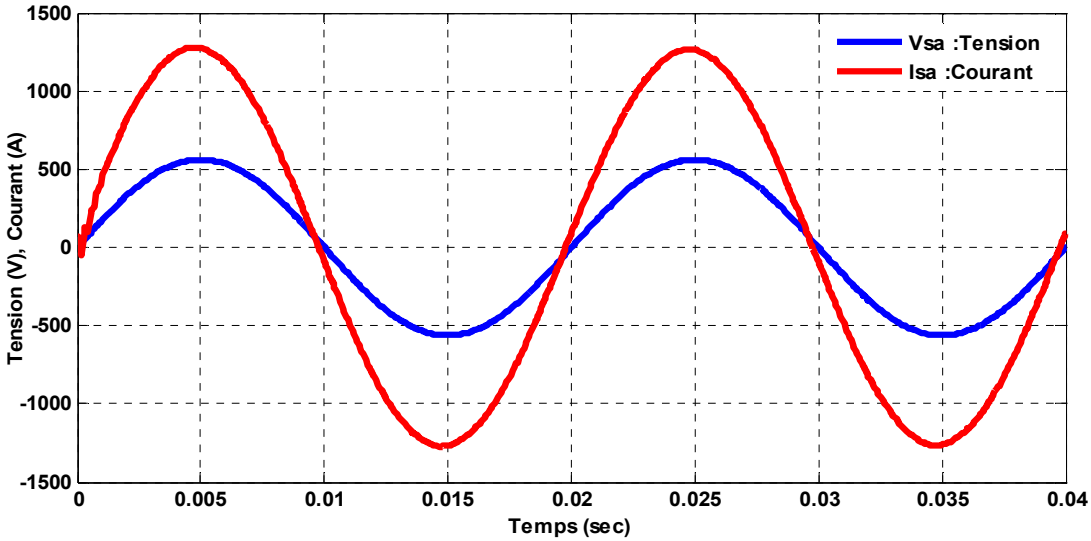


Figure 3-13.Déphasage entre la tension et le courant d'une phase statorique de la MADA.

On peut dire que le contrôle de la puissance active pour la génératrice éolienne est parfaitement réalisé à un facteur de puissance unitaire $(\cos\varphi = 1)$ donc un déphasage nul. La figure présente le déphasage entre la tension et le courant d'une phase statorique avant et après correction. Cette figure prouve l'efficacité de cette méthode pour la correction du facteur de puissance.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a comparé deux méthodes de commande vectorielle à savoir : la commande vectorielle directe et la commande indirecte. Effectivement, on a pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte permet, en association avec le bouclage des puissances, d'avoir un système performant. Elle est certes

plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d'avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

On retiendra donc la commande indirecte pour la suite de nos travaux. En effet, en plus des très bons résultats de simulation, elle offre un avantage pour la réalisation pratique car elle intègre la boucle de régulation du courant rotorique permettant ainsi de protéger la machine en intercalant des limitations du courant, ce que la méthode directe ne permet pas. Effectivement, comme l'on dispose d'une boucle de régulation des courants rotoriques, il est simple de limiter la valeur maximale des courants de référence.

Chapitre 04

POLLUTION HARMONIQUE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE : EFFETS ET SOLUTIONS

4.1. Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Les paramètres caractéristiques de ce réseau sont la fréquence, l'amplitude, la symétrie du système triphasé et la forme d'onde de la tension. Cette dernière doit être sinusoïdale. Cependant, lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau électrique.

Depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance, les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement.

Ce chapitre est entamé par des notions générales des harmoniques. Ensuite, des solutions pour la dépollution harmonique seront présentées, on discutera aussi les techniques de commande utilisées dans le filtrage actif parallèle. Des résultats de simulation sont aussi présentés pour trois méthodes de commande.

4.2. Définition des harmoniques

Dans le système de puissance [34], la définition d'un harmonique peut être énoncée comme suit : une composante sinusoïdale périodique ayant une fréquence multiple entier de la fréquence du fondamental. Ainsi, pour un système, la fréquence fondamentale est de f_0 et la fréquence de $h^{éme}$ harmonique est de hf_0 . Les harmoniques sont souvent utilisées pour définir la distorsion du signal sinusoïdal associé

avec le courant ou la tension de différentes amplitudes et de fréquences ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance [34, 35, 36].

4.3. Interprétation des harmoniques

Le concept d'harmonique est introduit au début du $19^{éme}$ siècle par JOSEPH FOURIER qui démontra que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série de sinusoïdes de fréquences discrètes (multiples) [37].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)\right) \quad \textbf{(4.1)}$$

On note que la composante $\frac{a_0}{2}$ de la série de FOURIER est la composante continue.

a_0, a_n, b_n : sont définis comme suit :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t)\, d(\omega t) \quad \textbf{(4.2)}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t)\cos(n\omega t)\, d(\omega t) \quad \textbf{(4.3)}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(\omega t)\sin(n\omega t)\, d(\omega t) \quad \textbf{(4.4)}$$

Le courant absorbé par la charge non linéaire a pour expression :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(\omega_h t + \varphi_h) \quad \textbf{(4.5)}$$

La première composante de rang 1 $(h = 1)$ est appelée : composante fondamentale. Pour les systèmes raccordés à un réseau électrique stabilisé, la fréquence de la composante fondamentale est considérée comme étant fixe ($50Hz$ en Europe, $60Hz$ aux Etats Unis). Le reste des composantes de la série de FOURIER sont appelées : harmoniques de rang h , où h désigne le numéro de la composante (le rang 2 correspond au deuxième terme de la série de FOURIER qui aura une fréquence double du fondamental).

La figure 4.1 donne l'allure d'un courant contenant un harmonique de rang 3, c'est à dire un courant qui contient une composante de rang 3 élevée en amplitude. Dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont de rangs 5, 7,11 et 13.

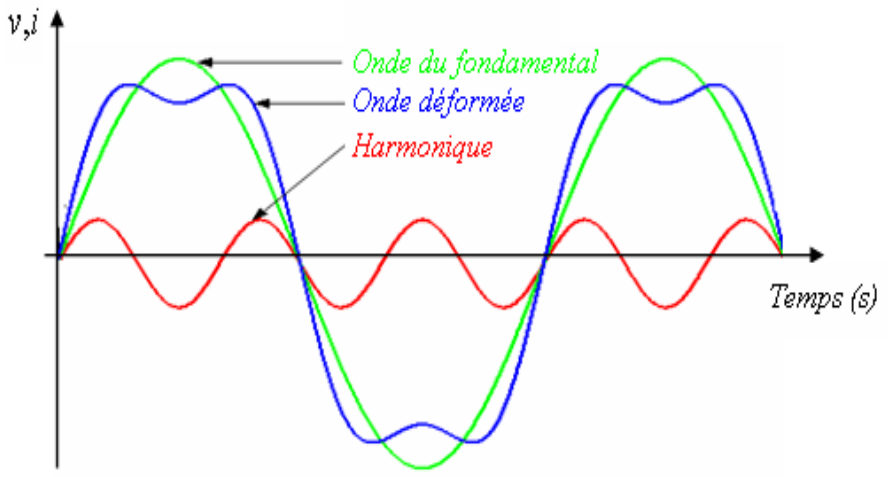


Figure 4-1. Représentation de l'effet d'un harmonique.

4.4. Sources des harmoniques et leurs effets

4.4.1. Sources des harmoniques

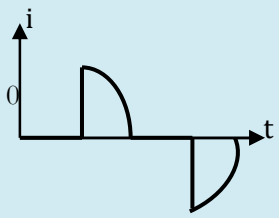
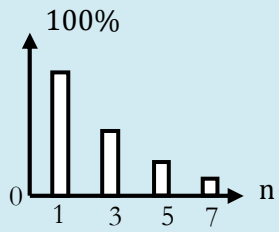
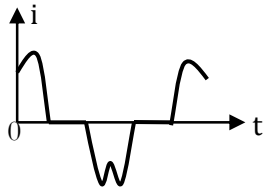
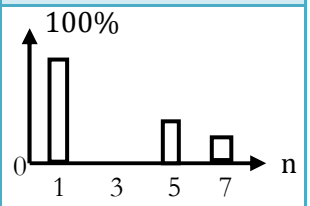
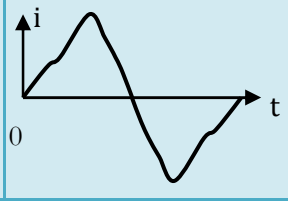
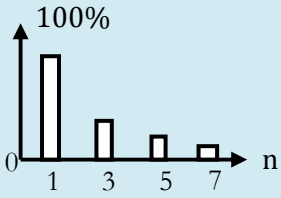
Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

On représente quelques principales charges non linéaires situées dans les réseaux électriques; comme par exemple:

- Gradateur monophasé
- Redresseur triphasé à thyristor
- Moteur asynchrone [38].

Le tableau 4.1 montre l'exemple des charges non linéaires citées ci-dessus:

Tableau 4.1. Principales charges polluantes [35]

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commandé par angle de phase)	Régulation de puissance de fours à résistance Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	Variateurs de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machines à outils Appareils électroménagers		

4.4.2. Effets des harmoniques

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple :

– L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.

– L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.

– Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

– Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

– La dégradation de la précision des appareils de mesure.

– Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment [35].

4.5. Mesures et prévention des harmoniques

4.5.1. Mesures des harmoniques

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, Total Harmonic Distortion, THD) qui est le plus couramment utilisé [36].

L'équation (4.5) peut être écrite sous la forme suivante [38] :

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad \textbf{(4.6)}$$

Avec :

I_1 : Valeur efficace du courant du fondamental;

I_h : Valeur efficace du courant harmonique de rang h ;

φ_1 : Déphasage du courant fondamental ;

φ_h : Déphasage de l'harmonique de rang h.

Le *THD* étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composantes harmoniques $(h \geq 2)$ et le fondamental du courant peut être exprimé en pourcentage et calculé comme suit :

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{I_H}{I_1} \quad \textbf{(4.7)}$$

I : Valeur efficace de $i(t)$.

I_H : Résultante des composantes harmoniques.

4.5.2. Facteur de puissance

En régime périodique, les expressions instantanées de tension et du courant sont données par :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad \textbf{(4.8)}$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \beta_n) \quad \textbf{(4.9)}$$

Le facteur de puissance est défini, dans le cas général, comme étant le rapport de la puissance active sur la puissance apparente.

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} v_n i_n \cos\varphi_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} v_n^2 \sum_{n=1}^{\infty} i_n^2}} \quad \textbf{(4.10)}$$

Avec :

$$\varphi_n = \theta_n - \beta_n \quad \textbf{(4.11)}$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale, l'équation (4.10) devient :

$$Fp = \frac{V_1 I_1 \cos\varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{n+1}^{\infty} I_n^2}} \quad \textbf{(4.12)}$$

Où :

I_1 : Valeur efficace du fondamental du courant ;

φ_1 : est le déphasage entre la tension et le fondamental du courant.

Les puissances active et réactive définies pour la fréquence fondamentale étant respectivement :

$$P = v_1 i_1 \cos\varphi_1 \quad \textbf{(4.13)}$$

$$Q = v_1 i_1 \sin\varphi_1 \quad \textbf{(4.14)}$$

On définit la notion de puissance déformante D permettant de rendre compte des harmoniques :

$$D = v_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2} \quad \textbf{(4.15)}$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2 + Q^2}} \quad \textbf{(4.16)}$$

Ainsi, les harmoniques de courant créent une puissance dite déformante qui dégrade le facteur de puissance. On remarque qu'en régime sinusoïdal la puissance déformante est nulle, et le facteur de puissance d'exprime simplement par [39]:

$$Fp = \cos\varphi_1 \quad \textbf{(4.17)}$$

4.5.3. Normes standards

La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. La CEI est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle.

Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [40].

La CEI a défini une série des normes appelées les normes de la Compatibilité Electromagnétique CEM. La norme IEC 61000 inclut les harmoniques et les inter-harmoniques comme des phénomènes électromagnétiques à basse fréquence [36].

Les distributeurs d'énergie fixent un taux admissible aux points de raccordement de leurs réseaux. En particuliers, en France, EDF impose les limites suivantes [40, 41]:

$$\frac{v_n}{v_1} \leq 1\% \qquad \textbf{Si n est impair} \quad \textbf{(4.18)}$$

$$\frac{v_n}{v_1} \leq 0.6\% \qquad \textbf{Si n est pair} \quad \textbf{(4.19)}$$

$$THD \leq 1.6\% \quad \textbf{(4.20)}$$

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage.

4.6. Solutions pour la dépollution harmonique

Pour faire face aux problèmes de la pollution harmonique, plusieurs solutions ont été proposées et développées. Elles sont scindées principalement en deux grandes classes :

4.6.1. Filtrage passif

Le filtrage passif consiste à placer en parallèle sur le réseau une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant (figure 4.2.b) et le filtre passif amorti ou passe-haut (figure 4.2.a). Le filtre résonant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Figure 4-2.(a) Filtre passif résonant(b) Filtre passif amorti

Ces dispositifs électriques sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau de la charge ;
- Equipements volumineux ;
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

4.6.2. Filtrage actif

Les filtres actifs sont des convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur) associés à un dispositif de contrôle adapté. Ils sont assimilables à des sources de courant ou de tension qui éliminent

directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en oppositions par rapport aux perturbations existantes [40].

4.6.2.1. Filtres actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (4.3), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs, produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [42].

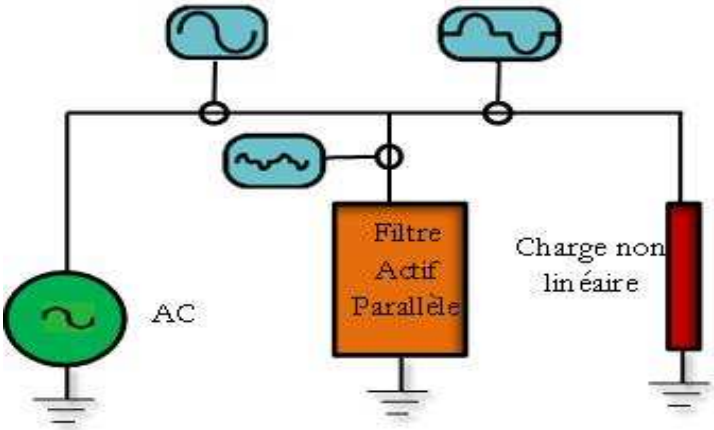


Figure 4-3. Schéma de principe du filtrage actif parallèle

4.6.2.2. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure 4.4, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale [42].

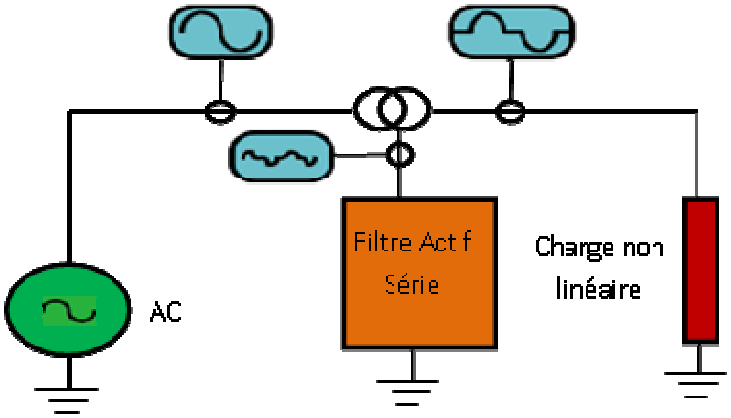


Figure 4-4. Schéma de principe du filtrage actif série

4.6.2.3. Filtrage à structure hybride

Le filtre hybride est l'association de filtre(s) passif(s) avec filtre actif. Les filtres passifs sont chargés pour éliminer les harmoniques de rangs élevés, tandis que le filtre actif s'occupe des autres rangs d'harmonique. On distingue alors plusieurs types d'association de filtres actifs et passifs, les plus étudiées étant :

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

Les figures 4.5 à 4.7 montrent la configuration de chaque un de ces types.

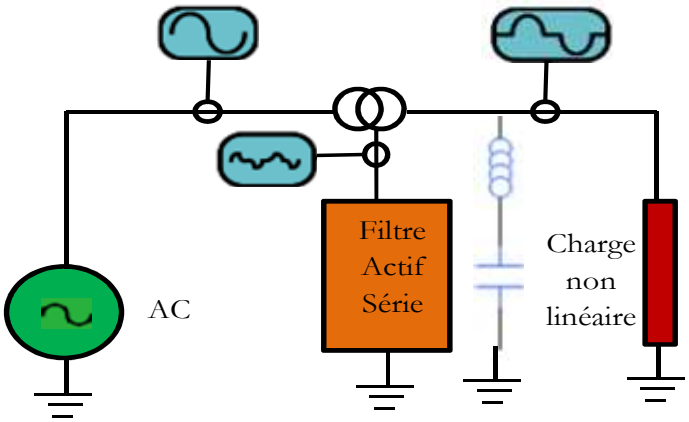


Figure 4-5. Filtre active série et filtre passif parallèle.

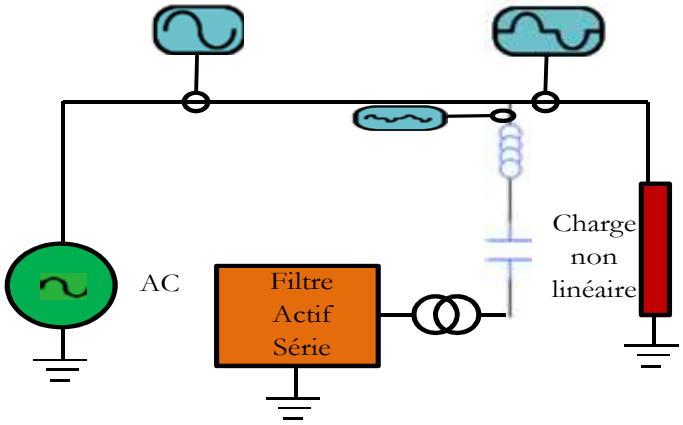


Figure 4-6. Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

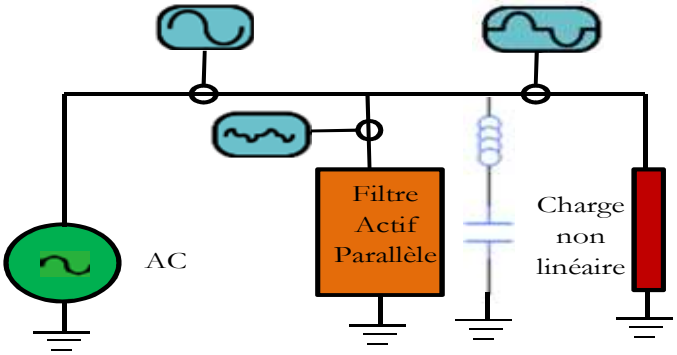


Figure 4-7. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

4.6.2.4. Filtre universel

La combinaison parallèle-série des filtres actifs, aussi appelée, en anglais, Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série profitant des avantages des deux. L'UPQC assure la forme d'onde sinusoïdale pour le courant et de même pour la tension [38].

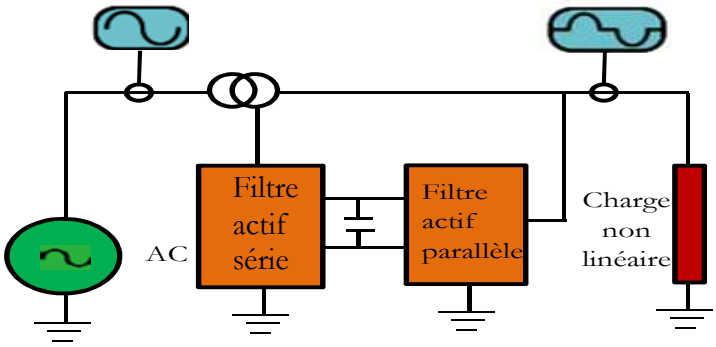


Figure 4-8. Combinaison parallèle-série des filtres actifs

4.7. Techniques de commande utilisées dans le filtrage actif parallèle

Le filtrage actif parallèle de puissance est une application de l'électronique de puissance qui consiste à disposer d'une source de courant monophasée ou triphasée performante pour compenser les harmoniques sur un réseau électrique.

4.7.1. Principe de filtrage actif parallèle

La figure 4.9 présente le principe d'un compensateur actif de type parallèle qui permet de compenser les harmoniques de courant de la charge polluante à l'aide d'une source du courant mise en œuvre [43].

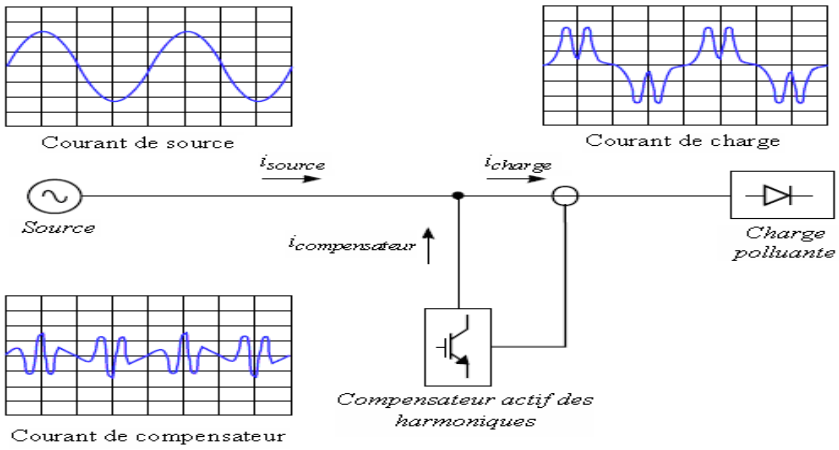


Figure 4-9. Principe de la compensation active des harmoniques.

Le principe est d'injecter un courant en opposition de phase avec les courants de la charge afin d'obtenir un courant le plus sinusoïdal possible au niveau de la source. En général, la présence d'une charge polluante sur le réseau électrique entraîne la circulation de trois composantes de puissance active, réactive et déformante, le filtre actif peut alors compenser la puissance réactive et la puissance déformante mais cela nécessite une commande lui associe.

Dans le paragraphe qui suit nous présenterons les différentes techniques de commande existant dans la littérature qui peuvent être appliquées pour réaliser une fonction de filtrage actif.

4.7.2. Commandes des filtres actifs parallèles

La partie commande du filtre actif est constituée de trois modules distincts réalisant les fonctions suivantes :

- Détermination des courants harmoniques de la charge polluante ;
- Commande de l'onduleur du filtre actif ou poursuite des références de courant ;

– Régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue.

4.7.2.1. Détermination des références harmoniques

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, …). Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi de mettre en œuvre une variante de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées. Elle utilise des filtres FMV au lieu des filtres classiques (FPB et FPH). La méthode classique des puissances instantanées est devenue aujourd'hui très courante dans les applications comme le filtrage actif car elle réalise le meilleur compromis entre performances statique et dynamique [35].

a. Méthode des puissances instantanées et sa variante

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre de méthodes fréquentielles telle que la méthode de FOURIER (Transformées de FOURIER rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. AKAGI [35]. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (repère $\alpha\beta$) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées [29], on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. La figure 4.10 présente le principe de cette méthode.

$\overline{P},\overline{Q}$: Les puissances continues instantanées active et réactive liées à la composante fondamentale du courant ;

$\tilde{P}$, $\tilde{Q}$: Les puissances alternatives instantanées active et réactive liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

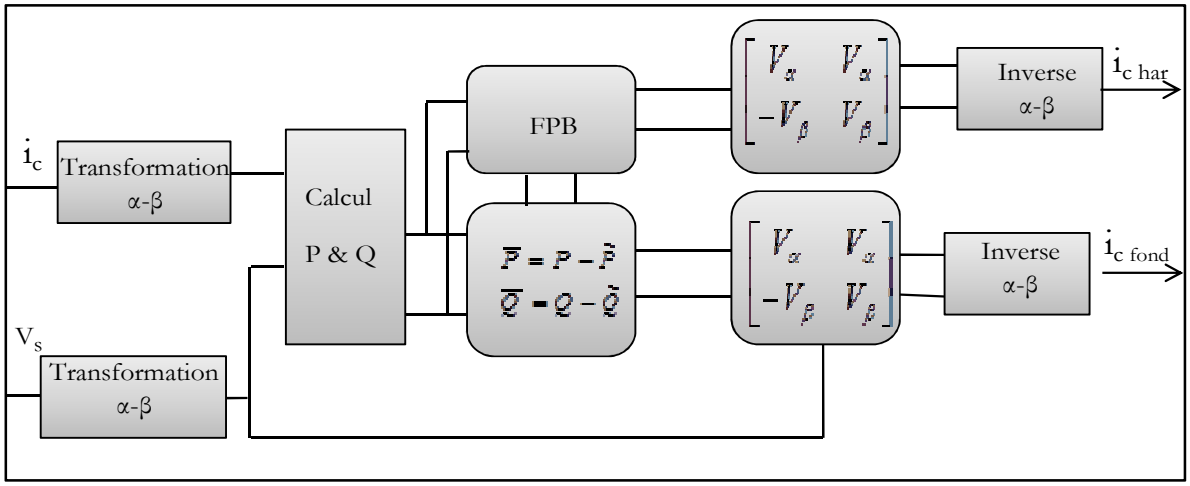


Figure 4-10. Schéma de la méthode classique des puissances active et réactive instantanées

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante :

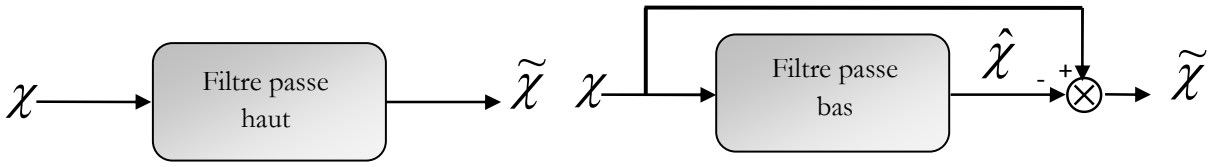


Figure 4-11. Schémas de deux types classiques de filtres.

x : Signal électrique (soit courant ou tension) ;

$\tilde{x}$: Composante harmonique.

$\hat{x}$: Composante fondamentale de x.

Cependant, comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

– Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif de puissance lors de variations rapides de la charge.

– Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

Pour ces raisons, on utilise un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici FMV. Son principe de base s'appuie sur les travaux de SONG HONG-SCOK [35] et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes α, β comme cela est présenté à la figure 4.12.

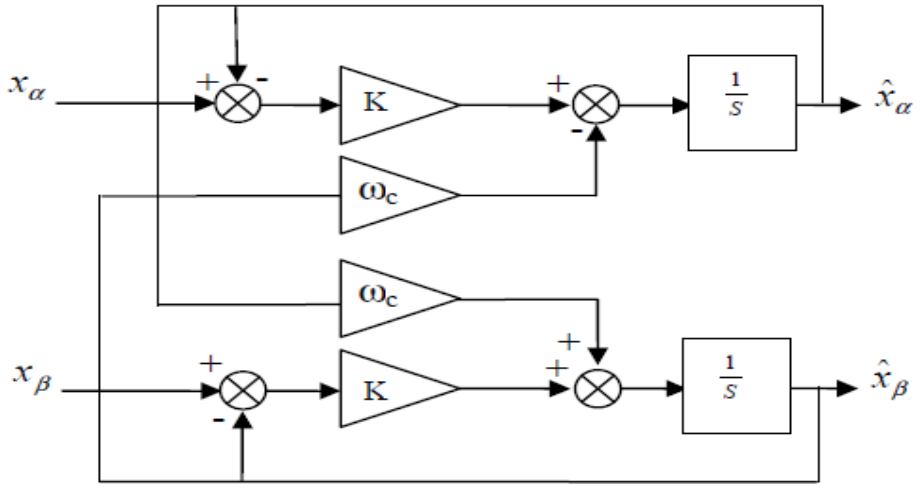


Figure 4-12. Principe du FMV

Selon les axes α, β, les expressions liant les composantes $\hat{x}_{\alpha\beta}$ en sortie du FMV aux composantes d'entrée $x_{\alpha\beta}$ sont les suivantes :

$$\hat{x}_\alpha = \left(\frac{K}{S} \left[x_\alpha(S) - \hat{x}_\alpha(S) \right] - \frac{\omega_c}{S} . \hat{x}_\beta(S) \right) \quad \textbf{(4.21)}$$

$$\hat{x}_\beta = \left(\frac{K}{S} \left[x_\beta(S) - \hat{x}_\beta(S) \right] + \frac{\omega_c}{S} . \hat{x}_\alpha(S) \right) \quad \textbf{(4.22)}$$

Où sont représentés par :

$x_{\alpha\beta}$: Le signal électrique d'entrée selon les axes α, β, de nature tension ou courant ;

$\hat{x}_{\alpha\beta}$: Les composantes fondamentales $x_{\alpha\beta}$;

K : Constante fixe ;

$\omega_c = 2\pi f$: Pulsation fondamentale du réseau.

Ce filtre FMV sera systématiquement mis en œuvre dans ce travail. La figure 4.13 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs.

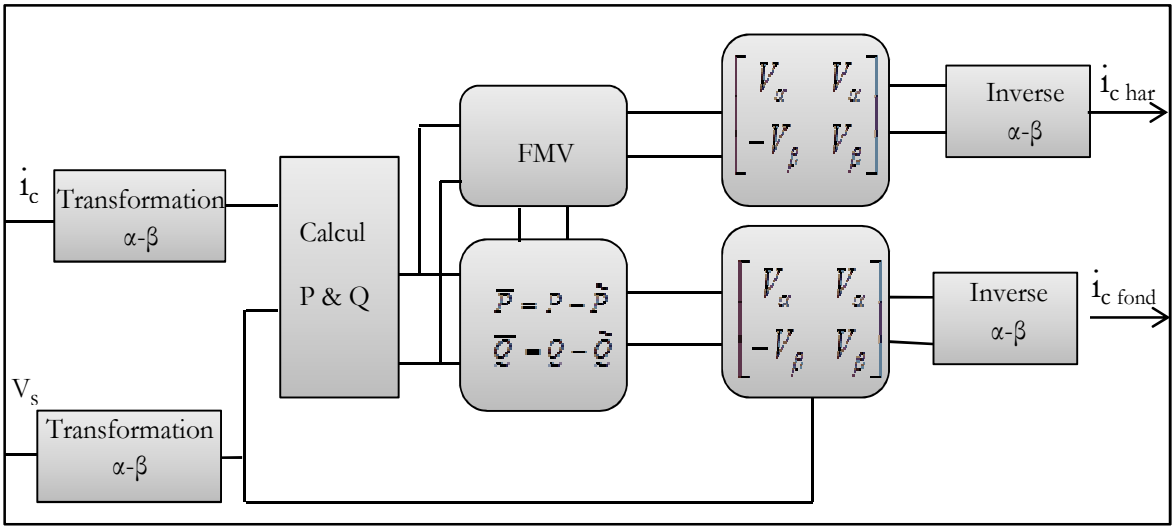


Figure 4-13. Schéma de la méthode des puissances active et réactive instantanées en utilisant FMV [8]

Les étapes suivantes détaillent le calcul des références par cette variante. Dans le cas d'un système triphasé (sans composante homopolaire), caractérisé par ses tensions simples (V_{Sa}, V_{Sb}, V_{Sc}) et ses courants de ligne (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}), la transformation de Concordia permet de ramener ce système à un système diphasé (§ Annexe B).

Le premier FMV, utilisé au niveau des tensions diphasées, permet de filtrer efficacement les composantes harmoniques des tensions d'alimentation, comme nous pourrons le démonter de façon théorique dans la suite de ce chapitre. Ainsi, sa mise en œuvre permet d'améliorer les performances du filtrage. Quant aux courants diphasés d'axes $\alpha\ et\ \beta$, ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_\alpha = \hat{i}_\alpha + \tilde{i}_\alpha \\ i_\beta = \hat{i}_\beta + \tilde{i}_\beta \end{cases} \quad \textbf{(4.23)}$$

Le rôle du FMV est d'extraire les composantes fondamentales du courant de charge à la pulsation ω_c, directement selon les axes $\alpha\ \beta$. Ensuite, les composantes harmoniques du courant selon les axes $\alpha\beta$, notées ici $\tilde{i}_\alpha$ et $\tilde{i}_\beta$, sont obtenues en soustrayant sur chaque axe, la sortie du FMV à son entrée.

Après isolation des composantes fondamentales en tension notée $\hat{V}_{\alpha\beta}$, et des courants harmoniques $\tilde{i}_{\alpha\beta}$, nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle (p) et imaginaire (q) instantanées par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & \hat{V}_\beta \\ -\tilde{V}_\beta & \tilde{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

Avec :

$\tilde{p}, \tilde{q}$: Composantes alternatives de p et q .

Les composantes harmoniques du courants sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & \hat{V}_\beta \\ -\tilde{V}_\beta & \tilde{V}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & \hat{V}_\beta \\ -\tilde{V}_\beta & \tilde{V}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & -\hat{V}_\beta \\ \hat{V}_\beta & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

La transformation de CONCORDIA inverse nous permet alors d'obtenir les références triphasées des courants harmoniques :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

b. Méthode basée sur le principe du courant actif

Le principe de cette méthode est basé sur la décomposition de la puissance absorbée par la charge polluante en puissance active, réactive et déformante. Donc le courant absorbé par la charge non linéaire i_c peut être décomposé en deux parties: le courant actif et le courant non actif. La puissance active p résulte du courant actif i_{cak} qui est proportionnel à la tension V_{sk} si celle-ci n'est pas déformée.

Donc :

$$i_{cak} = \frac{p}{\sum_{k=1}^{3} V_{sk}^2} V_{sk} = G.V_{sk} \tag{4.28}$$

V_{sk} : Tension d'alimentation ;

G : La conductance équivalente par la phase de la charge ;

Le courant non actif i_{cnk} est obtenu par la relation suivante :

$$i_{cnk} = i_c - i_{cak} \tag{4.29}$$

On décompose le courant non actif en deux parties : réactive et déformante. Le courant réactif, en phase avec la tension en quadrature V'_{sk} , s'obtient, à partir de la puissance réactive, par l'expression suivante :

$$i_{crk} = \frac{q}{\sum_{k=1}^{3} V_{sk}^2} V'_{sk} = Y.V'_{sk} \tag{4.30}$$

Y : La susceptance équivalente par phase de la charge.

La composante déformante qui représente la somme de tous les courants harmoniques $i_{ck,h}$ s'obtient en retranchant les courants actifs et réactifs du courant total.

$$\sum_{k=2}^{h} i_{ck,h} = i_c - i_{cak} - i_{crk} \tag{4.31}$$

Chacune des trois composantes du courant absorbé par une charge non-linéaire ou déséquilibrée peut être calculée à partir de la connaissance de la tension au point de raccordement, supposée sinusoïdale, et du courant total.

Et la méthode d'identification se fait comme suit [8] :

- Les courants de la charge i_c ainsi que les tensions V_{sk} sont obtenus par mesure directe.
- En partant de la mesure des V_{sk} **,** on obtient les tensions en quadrature V'_{sk} par un circuit déphaseur.
- On obtient les puissances P et Q par intégration numérique ou en utilisant des filtres passe-bas.

4.7.2.2. Stratégie de commande de l'onduleur du filtre active

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant).

Deux types de commandes rapprochées des convertisseurs statiques sont principalement mis en œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis. Dans ce paragraphe, nous présentons les modes de commande suivants [35] :

- MLI à échantillonnage naturel ;
- Hystérésis conventionnelle ;
- Hystérésis modulée.

a. Contrôle par MLI

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure 4.14. Dans ce cas, la différence entre le courant référence $\overset{*}{i}$ et le courant réel i_f est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance.

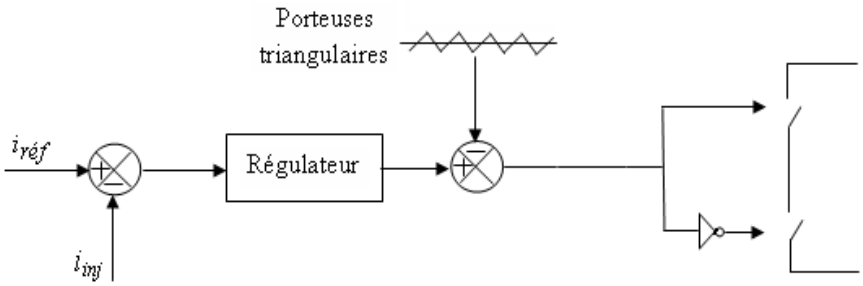


Figure 4-14. Principe de la commande par MLI

b. Contrôle conventionnel par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure 4.15 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence $\overset{*}{i}_f$ et le courant produit par l'onduleur i_f. Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé : bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

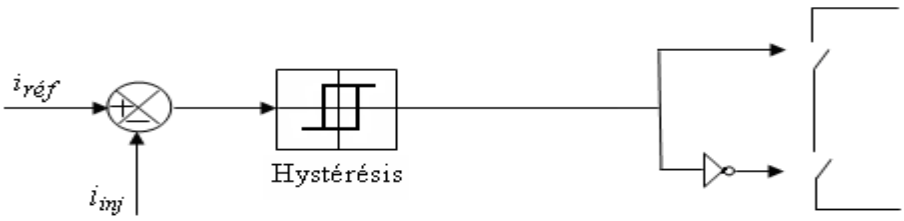


Figure 4-15. Commande conventionnelle par hystérésis

c. Contrôle par hystérésis modulée

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette commande consiste à ajouter au signal d'erreur ε $\left(\varepsilon = \overset{*}{i}_f - i_f\right)$ un signal triangulaire Str de fréquence f_{tr} et d'amplitude A_{tr}. La fréquence f_{tr} doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande $2B_h$ dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure 4.16.

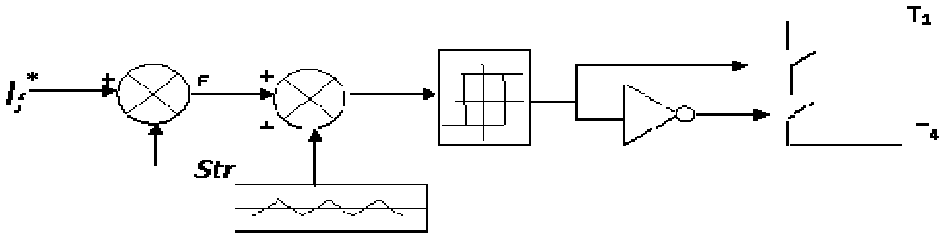


Figure 4-16. Commande par hystérésis modulé

4.8. Fonctionnement de l'ensemble du système éolien avec filtre actif parallèle

Ici, nous associons au point de raccordement de l'éolienne un filtre actif parallèle. Cette configuration est illustrée par la figure 4.17. Le filtre actif parallèle va filtrer les harmoniques produites par les charges alimentées par le réseau. Dans notre cas, nous avons placé un pont redresseur à diodes comme charge polluante ; le filtre compensera les courants harmoniques générés par cette charge.

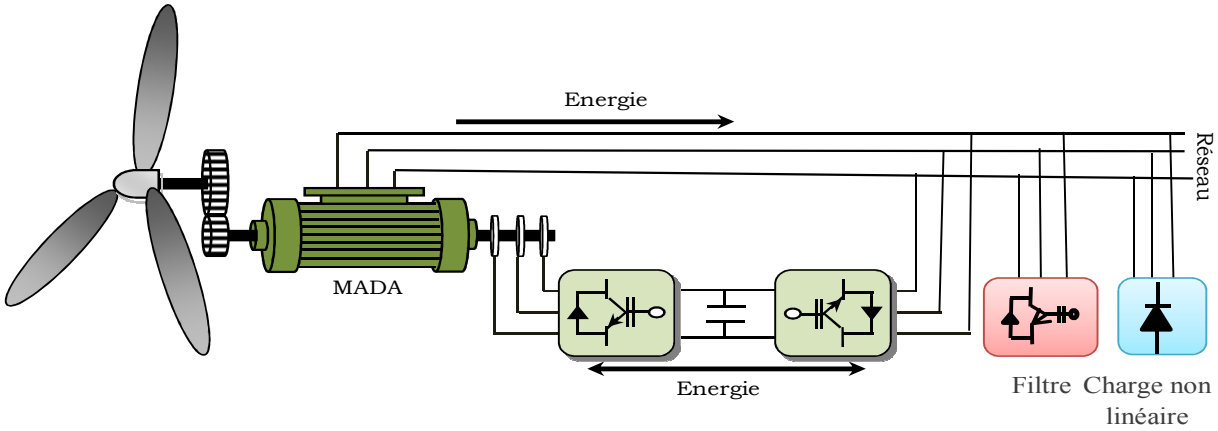


Figure 4-17. Schéma du système avec filtre actif parallèle

4.9. Dimensionnement des paramètres du régulateur PI

Le régulateur utilisé permet la régulation de la tension du bus continu pour que la tension moyenne aux bornes du condensateur soit maintenue à une valeur quasi-constante. Ce dispositif possède deux actions :

4.9.1. Action proportionnelle

Elle est la base de la constitution de la boucle. Elle se traduit par une variation du signal obtenu en sortie du régulateur proportionnellement à l'écart constaté entre la consigne et la mesure. En présence d'une variation brutale de la consigne ou d'une grandeur perturbatrice, elle va dans une boucle bien conçue, ramener le système à un nouvel état d'équilibre [39].

4.9.2. Action intégrale

L'action intégrale du régulateur PI permet d'évoluer le signal issu de la boucle de régulation en tant que la nullité de l'écart n'est pas atteinte (§Annexe C).

4.10. Simulation

Dans un premier temps, nous avons simulé le réseau électrique avec production éolienne et sa charge non linéaire (Figure 4.17), sans y connecter le filtre actif pour voir l'effet des harmoniques sur l'allure du courant absorbé (Figure 4.18). Puisque tous les courants de phase (i_a, i_b, i_c) sont d'allures identiques, nous présentons les résultats de simulation pour une seule phase, en l'occurrence la phase a .

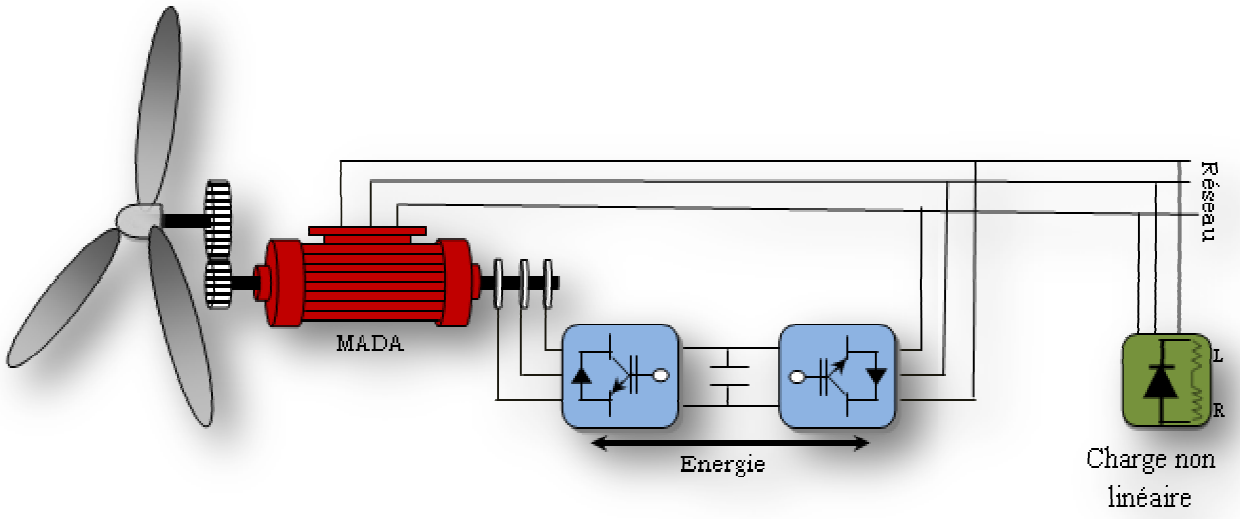


Figure 4-18.Schéma du système étudié

On présente les résultats de simulation obtenus ci-dessous :

Paramètres de la charge non linéaire $R = 10\Omega,\ L = 0.01H$.

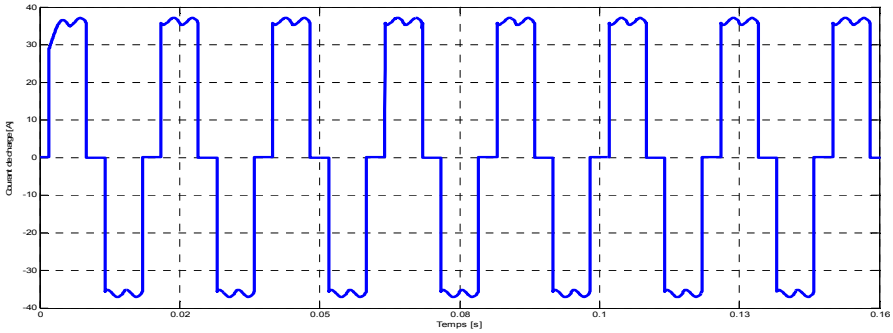


Figure 4-19. Courant de la charge non linéaire i_{ca}.

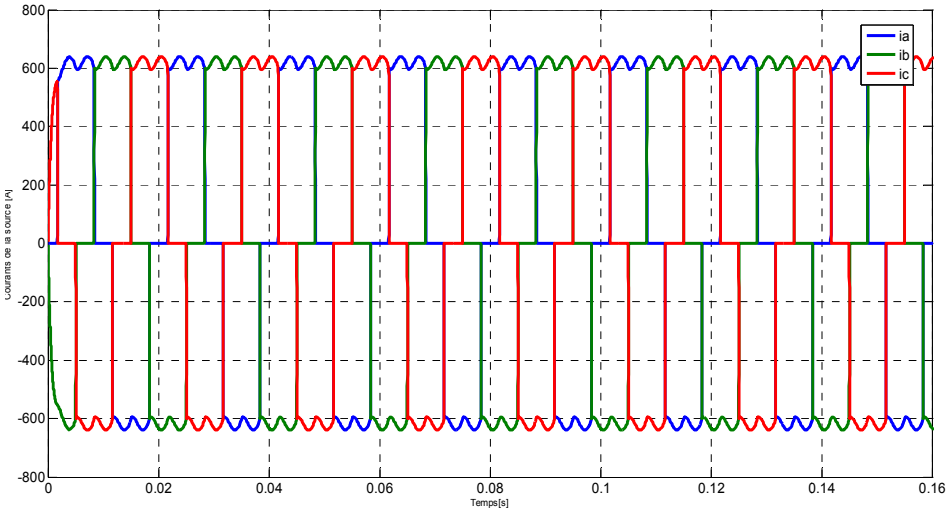


Figure 4-20. Courant de la source avant filtrage.

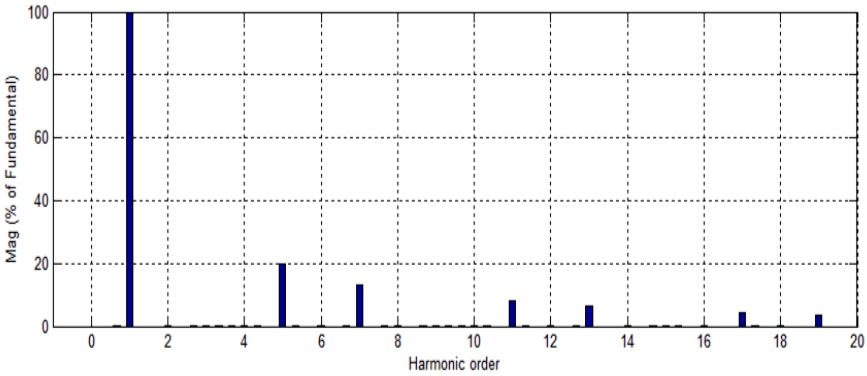


Figure 4-21. Spectre harmonique du courant de la source.

Les figures précédentes présentent le courant absorbé par la charge polluante i_{ca} de la première phase (Figure 4.19) et le courant de la source et son spectre harmonique (figures 4.20, 4.21). Le THD de courant pour cette charge est de 30.93%, on voit que les harmoniques les plus dominants sont ceux des rangs 5, 7 et 11, c'est le cas d'un redresseur triphasé alimentant une charge RL. Ce THD est calculé pour les vingt premiers harmoniques selon la « norme C.E.I ». Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5 %, comme l'impose la norme C.E.I.

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif et pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant. On applique le filtrage sur le redresseur triphasé alimentant une charge R, L.

4.10.1. Résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI

Les figures 4.22, 4.23 et 4.24 illustrent les résultats de simulation obtenus pour la commande par MLI (le courant de source de la phase a et son spectre harmonique et le courant injecté par le filtre). Le THD du courant de source est réduit à $2{,}21\%$ après filtrage. Cette commande est décrite par le schéma de la figure 4.14 pour contrôler notre FAP, plus que cette commande offre une fréquence de commutation constante, elle donne un THD également satisfaisant, on a utilisé pour cela des porteuses triangulaires de fréquence $20kHz$.

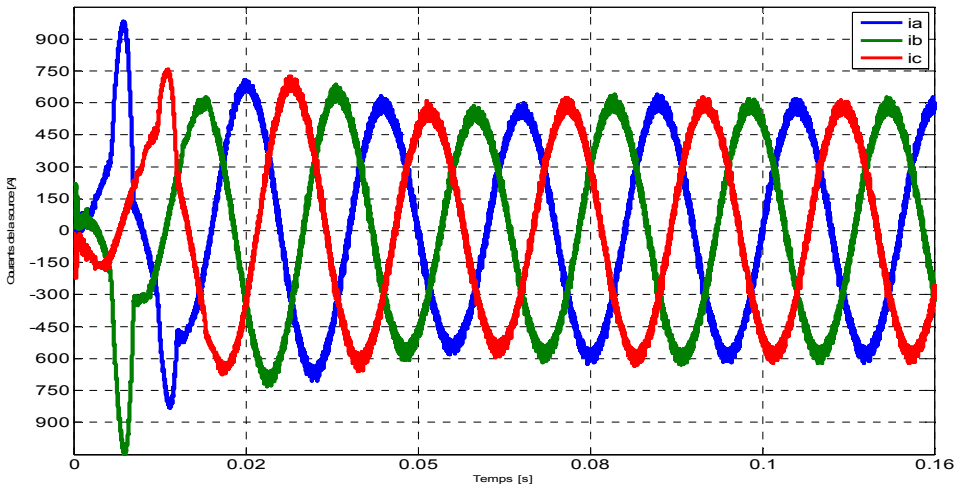


Figure 4-22. Courant de la source après filtrage.

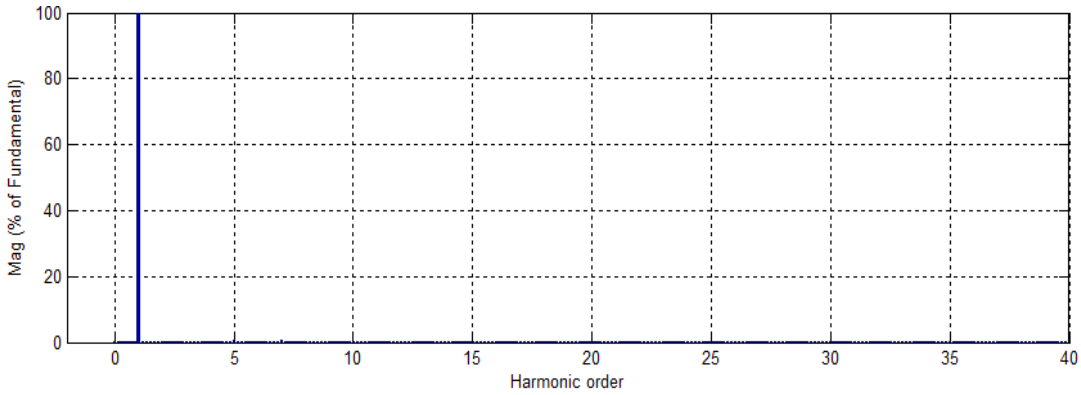


Figure 4-23. Analyse harmonique du courant de source après filtrage

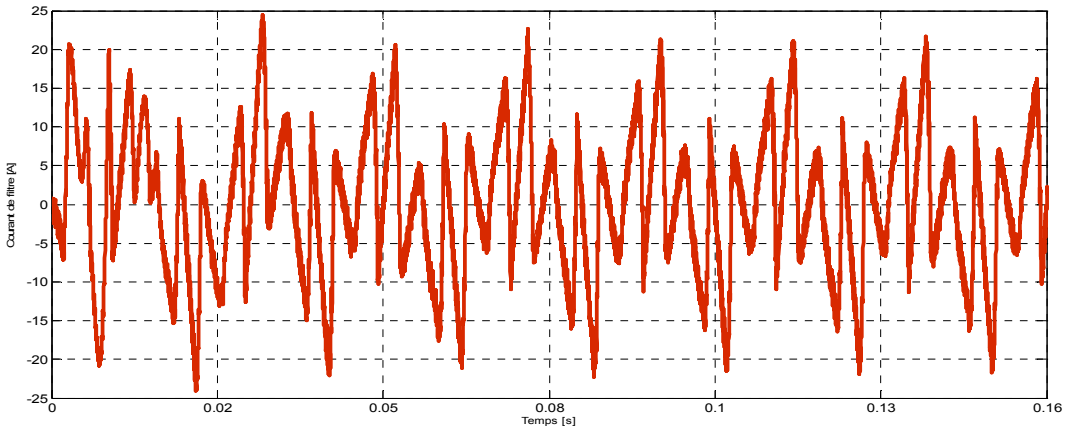


Figure 4-24. Courant injecté par le filtre actif

4.10.2. Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis

Les figures suivantes 4.25, 4.26 et 4.27 illustrent les résultats de simulation obtenus pour la commande par hystérésis (le courant de source de la phase a et son spectre harmonique).

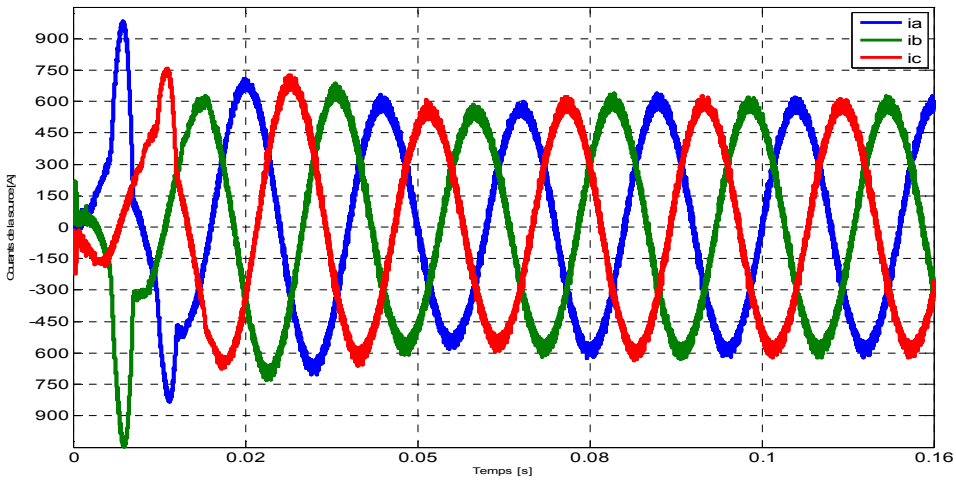


Figure 4-25. Courant de la source après filtrage.

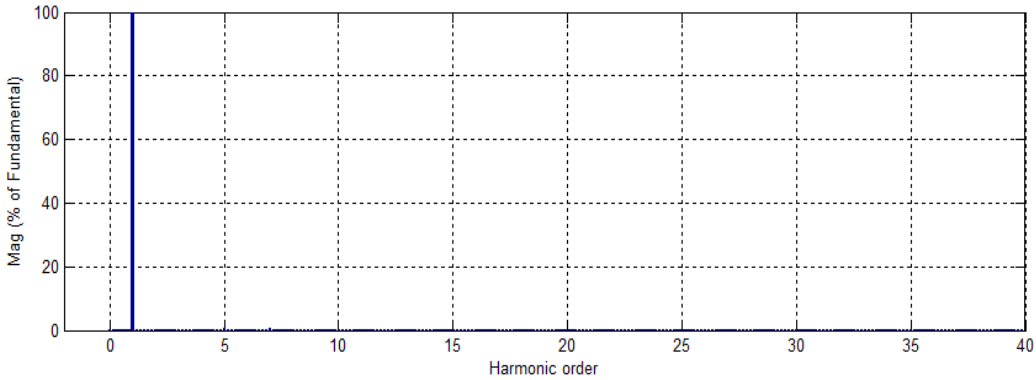


Figure 4-26. Analyse harmonique du courant de source après filtrage

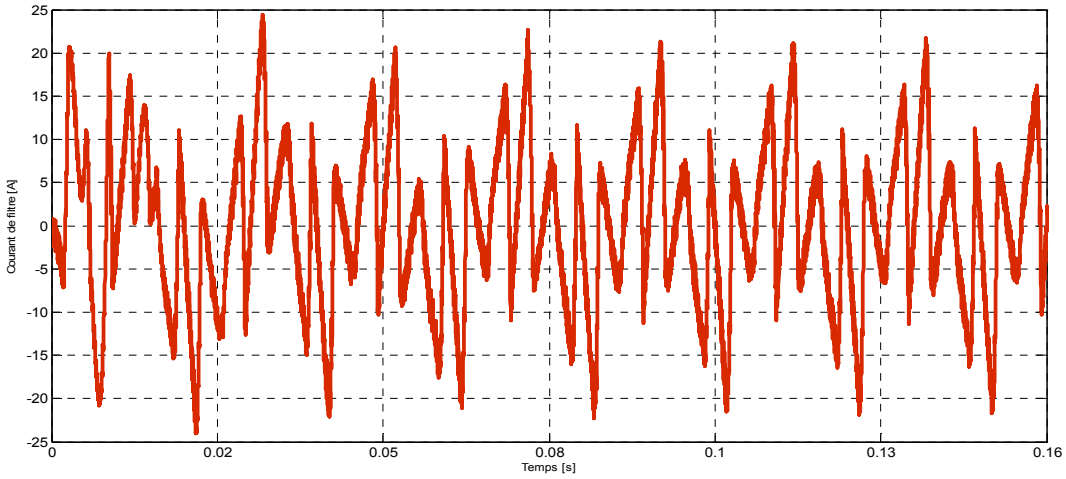


Figure 4-27. Courant injecté par le filtre actif avec un zoom

Le THD du courant de la source est réduit à 2.43% après filtrage. Cependant, pour cette commande, la fréquence de commutation est variable.

On note ici que ce THD est fortement lié à la bande d'hystérésis choisie $(\pm 0.05A)$, bien évidemment que cette bande soit très étroite. En général, une bande plus étroite entraîne une fréquence de commutation maximale plus élevée.

4.10.3. Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis modulé

Les figures 4.28, 4.29 et 4.30 illustrent les résultats de simulation obtenus pour la commande par hystérésis (le courant de source de la phase a et son spectre harmonique). Le THD du courant de la source est réduit à 2.58% après filtrage. Ces résultats sont obtenus avec un signal triangulaire de bande d'hystérésis égale à $(\pm 0.05A)$ et de porteuses triangulaires de fréquence $20kHz$.

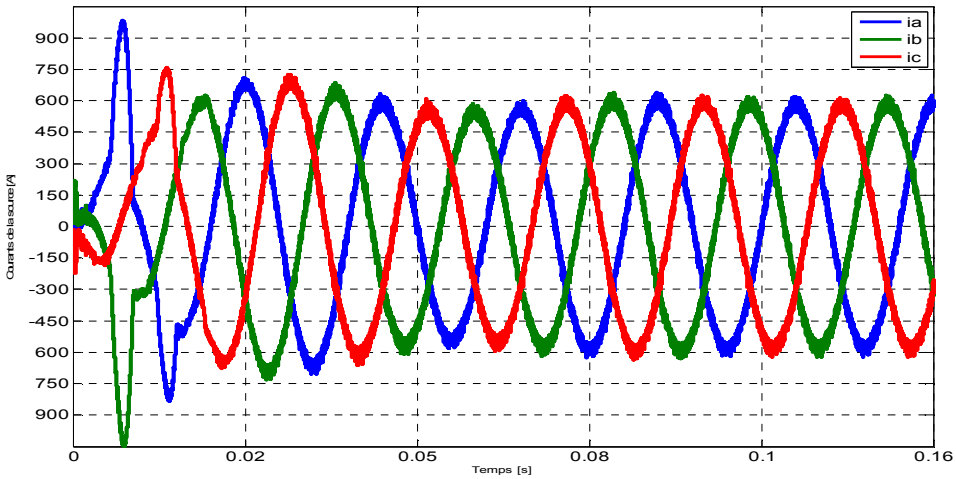


Figure 4-28. Courant de la source après filtrage

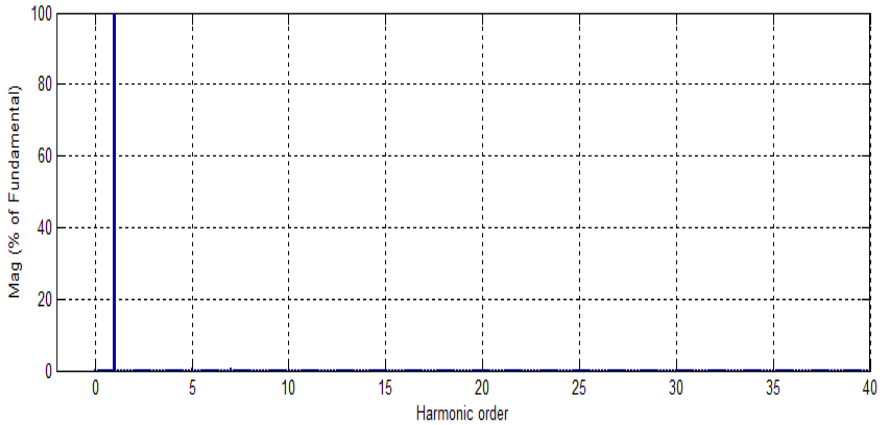


Figure 4-29. Analyse harmonique du courant de source après filtrage

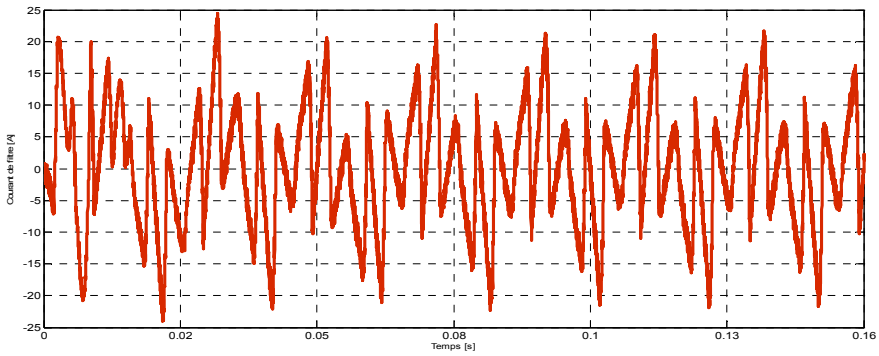


Figure 4-30. Courant injecté par le filtre actif

Les résultats obtenus avec les trois méthodes de commande montrent que la mise en œuvre d'un filtre actif permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source et sur une large plage fréquentielle. Ceci se traduit par la diminution du THD après filtrage bien en dessous de 5%. On constate que le THD obtenu avec la commande MLI est inférieur à celui obtenu avec hystérésis et avec hystérésis modulé. Par contre, l'hystérésis conventionnelle, malgré sa simplicité, présente l'inconvénient

d'une fréquence de commutation variable, La technique MLI, facile à être utilisée, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe et un contenu harmonique parfaitement réduit.

4.11. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les fonctions utiles pour réaliser une application de filtrage actif ensuite, nous avons étudié le filtre actif shunt, connecté en parallèle sur le réseau où se trouve l'éolienne afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires. Ensuite, nous avons présenté trois types de contrôle du courant du filtre actif : le contrôle par modulation de largeurs d'impulsions ou MLI, le contrôle par hystérésis conventionnelle et finalement l'hystérésis modulée.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Le but de ce mémoire est de faire une analyse harmonique d'un réseau électrique avec une production éolienne. On a effectué d'abord la modélisation des différents composants de la production décentralisée de l'énergie éolienne et l'étude des différents systèmes de contrôle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui est la plus utilisée pour ce mode de production d'énergie électrique, ensuite on a réalisé le filtrage par un filtre actif parallèle.

Dans le contexte d'énergie éolienne, un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite, on a présenté des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien dans le premier chapitre.

Il est noté que l'utilisation de la MADA dans les éoliennes connaît une évolution très rapide à cause de ses performances vis-à-vis des autres machines, et aussi grâce aux progrès technologiques. Ainsi, la majeure partie des éoliennes modernes industrielles est constituées de génératrices asynchrones à double alimentation car elles apportent non seulement des solutions aux variations incessantes du vent, mais aussi permettent un transfert optimal de la puissance au réseau.

Le deuxième chapitre est axé sur la modélisation d'une éolienne de 1,5 MW de puissance fonctionnant à vitesse variable à base d'une MADA pilotée par le rotor par un onduleur MLI. Pour simplifier le modèle de la machine nous avons établi, le modèle de la machine dans un système d'axe biphasé (d, q) lié au stator à l'aide de la transformation de PARK. Les résultats de simulation de la génératrice asynchrone couplée à la turbine éolienne montrent un fort couplage entre la puissance active et la puissance réactive.

Le troisième chapitre a décrit la commande vectorielle qui permet de découpler le modèle de la MADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes sont envisagées: la commande directe et la commande indirecte. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI pour la commande.

Le dernier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le

développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux.

Une étude du filtre actif parallèle à structure tension a été réalisée. Nous avons présenté une étude théorique de la compensation des harmoniques de courant circulant dans un réseau électrique avec une production éolienne. Dans ce chapitre, ces travaux ont été validés par simulation sous environnement Matlab/Simulink.

Nous avons étudié trois types de contrôleurs de courant : hystérésis classique, hystérésis modulée et MLI. Les résultats de simulation obtenus pour ces trois contrôleurs ont été discutés. Ils nous ont permis de démontrer les performances et l'efficacité du filtre actif parallèle pour les commandes proposées. Nous avons également conclu que le MLI était alors le contrôleur le plus adapté.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble des chaînes de conversion d'éolienne, dans le but est d'envoyer une énergie propre non polluante au réseau électrique, parmi les perspectives envisageables :

- Utiliser la MADA de la chaine de conversion comme filtre actif au lieu d'ajouter un filtre actif parallèle.
- Utiliser les réseaux de neurones pour l'identification des harmoniques existant sur le réseau où est intégrée la génératrice éolienne.
- Réaliser pratiquement ce travail.
- Interconnexion avec d'autres sources d'énergies renouvelables (photovoltaïques).

Annexe A. Lois de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (A.1) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

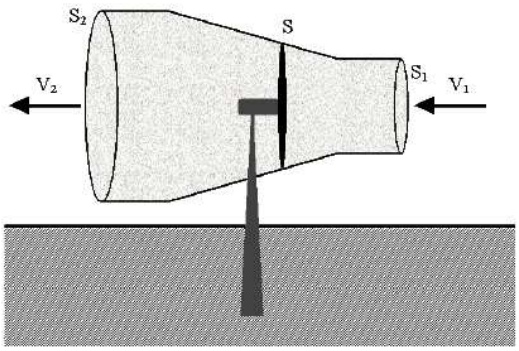


Figure A.1 Tube de courant autour d'une éolienne.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2, soit $\frac{V_1+V_2}{2}$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \qquad \textbf{(A.32)}$$

V_1 : vitesse du vent à l'avant de l'éolienne;

V_2 : vitesse du vent après passage à travers le rotor ;

S : Surface des pales.

La puissance P_m, est donnée par la loi de NEWTON qui s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent:

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \qquad \textbf{(A.33)}$$

En remplaçant m par son expression dans (A.1) :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad \textbf{(A.34)}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1, la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad \textbf{(A.35)}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad \textbf{(A.36)}$$

La figure A.2 représente la caractéristique correspondante à l'équation (A.5). On constate que le ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé ; aussi coefficient de puissance C_p, présente une limite égale à 0,59. Cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

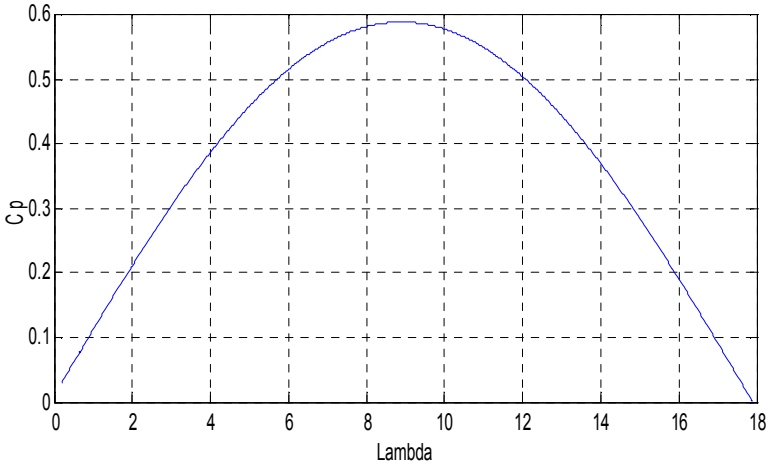


Figure4.2. Coefficient de puissance

Annexe B. Transformation de CONCORDIA et de PARK

Tableau B.1 Transformation de PARK.

Transformation directe de PARK	Transformation inverse de PARK
Passage du système triphasé *(a, b, c)* vers le système diphasé *(d, q)*	**Passage du système diphasé *(d, q)*vers le système triphasé *(a, b, c)***
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{P(\theta)} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix}$ **c.à.d** $\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(\theta)[x_{abc}]^T$ **Avec :** $P(\theta) = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \xrightarrow{P^{-1}(\theta)} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$ **c.à.d** $\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1}[x_{dq}]^T$ **Avec :** $P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$

Tableau B.2 Transformation de CONCORDIA.

Transformation directe de PARK	Transformation inverse de PARK
Passage du système triphasé *(a, b, c)*vers le système diphasé *(α, β)*	**Passage du système diphasé *(α, β)*vers le système triphasé *(a, b, c)***
$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \xrightarrow{C} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}$ **c.à.d** $\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = C[x_{abc}]^T$ **Avec :** $C = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} C^{-1}_{\alpha} \\ x_\beta \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$ **c.à.d** $\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = C^{-1}[x_{\alpha\beta}]^T$ **Avec :** $C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

Annexe C Calcul des régulateurs

Le régulateur utilisé est représenté sur la figure (C.1)

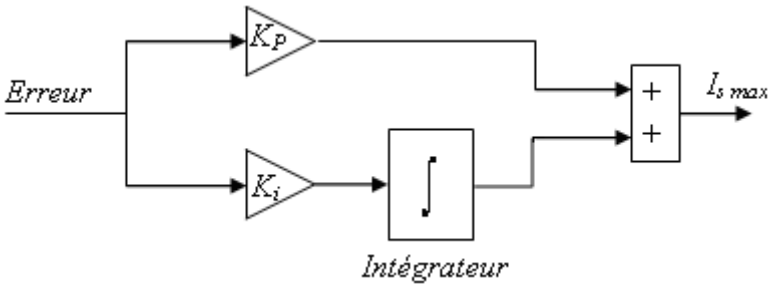


Figure C.1. Régulateur PI.

Ce régulateur est intégré dans une boucle comme montre la figure (C.2).

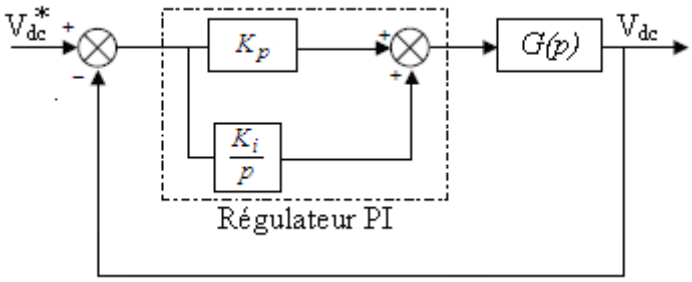


Figure C.2. Boucle de tension.

La relation suivante donne l'expression générale (fonction de transfert) du régulateur PI utilisé dans notre étude :

$$FT(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \qquad \textbf{(C.1)}$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel du régulateur ;

K_i : Gain intégral du régulateur ;

La fonction de transfert du condensateur :

$$G(p) = \frac{1}{C_{dc}\, p} \qquad \textbf{(C.2)}$$

On peut maintenant calculer la fonction de transfert de la chaîne directe :

$$FT(p) * G(p) = \frac{1 + \tau p}{\frac{C_{dc}}{K_i} p^2} \tag{C.3}$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure (C.1) est :

$$FT_{BF}(p) = \frac{1 + \tau p}{1 + \tau p + \frac{C_{dc}}{K_i} p^2} \tag{C.4}$$

On admet pour un système du second ordre la fonction de transfert générale donnée par l'expression suivante :

$$S(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2} \tag{C.5}$$

Par analogie des dernières expressions on peut déterminer les paramètres de notre régulateur, on tire ainsi :

$$K_i = C_{dc}\omega_0^2; \quad K_p = 2\xi C_{dc}\omega_0 \tag{C.6}$$

En effet, le régulateur PI décrit souvent l'état permanent, parce qu'il est utilisé pour réduire l'erreur à l'état permanent dans la réponse du système grâce à l'action intégrale.

Annexe D : Paramètres du système éolien

Désignation	Valeur numérique
Puissance nominale P	$1.5\ MW$
Rayon de l'éolienne R	$35.25m$
Gain du multiplicateur de vitesse G	90
Tension nominale statorique V_s	$220V$
Fréquence nominale statorique f	$50Hz$
Tension nominale rotorique V_r	$225/389V$
Fréquence nominale rotorique f_2	$14Hz$
Résistance statorique R_s	$0.012\ \Omega$
Résistance R_r	$0.021\ \Omega$
Inductance statorique L_s	$0.0137\ H$
Inductance rotorique L_r	$0.0136\ H$
Inductance mutuelle L_m	$0.0135\ H$
Inertie de l'arbre J	$1000\ kg.m^3$
Coefficient de frottement visqueux de la MADA fr	$0.0024\ N.m.s^{1}$
Glissement g	0.03
Nombre de paires de pôles p	2

Références Bibliographiques

[1] M. Lopez, "Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée". Thèse de doctorat, Université Paris Sud-11, France.

[2] T. Abedinzadeh, H. Afsharirad, M. Nazaraliloo, S. Masoumi, "Modelling and performance analysis of Doubly-Fed Induction Wind Turbines using PSCAD/EMTTDC ". Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, vol 3, No.1, 2012.

[3] M. Adjoudj, M. Abid, A. Aissaoui, Y. Ramdani, H. Bounoua ; "Commande par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation montée dans une éolienne ", Revue Nature et Technologie, N°2, pp_27-34,2010.

[4] B. Babypriya, R. Anita, "Modelling, simulation and analysis of doubly fed induction generator for wind turbines". Journal of Electrical Engineering, vol. 60, N°2, pp_79-85, 2009.

[5] A. Aboubou, E. Zouzoue S.E. Sneddon, "contribution à la compensation de la pollution harmonique en utilisant un filtre actif parallèle commandé par logique floue". Courrier du Savoir N°3, pp_59-63, Janvier 2003.

[6] B. Bouaziz, F. Bacha, M. Gasmi ; ' Modeling and control of a variable speed wind energy conversion system based on an induction machine'. Proc. International Renewable Energy Congress (IREC), Sousse, Tunisia, 2010.

[7] A. MIRECKI, "Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance". Thèse de doctorat, 2005, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[8] M. Benamsili, M. Taouriri, "Filtrage actif par l'éolienne". Projet de fin d'études, 2009, Ecole nationale supérieure polytechnique, Algérie.

[9] B. Toual, "Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable". Mémoire de magister, 2009, Université de Batna, Algérie.

[10] N. Boudrahem, "Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable". Mémoire de magister, 2007, Université de Bejaia, Algérie.

[11] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique". Thèse de doctorat, 2007, Ecole nationale polytechnique, Lille, France.

[12] B. Hamane, "Contrôle robuste d'aérogénérateur". Mémoire de magister, 2012, Université d'Oran, Algérie.

[13] S. El.Aimani, " Modélisation de différentes technologie d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyen tension". Thèse de doctorat, université de Lille, France ; 2004,.

[14] S. Belakehal, "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables". Thèse de doctorat, 2010, Université de Constantine, Algérie.

[15] A. Boyette, "Contrôle. commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne". Thèse de doctorat, 2006, Université de Henri Poincaré, Nancy I, France.

[16] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade". Mémoire de magister, 2009, Université de Sétif, Algérie.

[17] I. Griche, "Etude de la stabilité transitoire des systèmes électriques en présence des fermes éoliennes". Mémoire de magister, 2008, Université de Sétif, Algérie.

[18] Y. Djeriri, "Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien". Mémoire de magister,

2009, Université de Sidi Bel.Abbés, Algérie.

[19] A. Davigny, "Participation aux services système de formes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie ". Thèse de doctorat, 2007, Université des sciences et technologies de Lille, France.

[20] A. Gaillard, "Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité d'énergie électrique et de la continuité de service". Thèse de doctorat, 2010, Université de Henri Poincaré, Nancy.I, France.

[21] M. Azouz, A. Shaltout, M. A. L. Elshafei, 'Fuzzy logic control of wind energy systems '. 14éme Conférence Internationale Du Système De Puissance, Université de Cairo, Egypt, 19.21 Décembre 2010.

[22] F. Merrahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) '. Mémoire de magister, 2007, Ecole Nationale Polytechnique (ENP) d'Alger, Algérie.

[23] L. Abdelhamid, "Contribution à l'étude des performances des générateurs électromagnétiques utilisés dans les systèmes éoliens". Mémoire de magister, 2008, Université de Batna, Algérie.

[24] P. E. Vidal, "Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation". Thèse de doctorat, 2004, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[25] F. Bonnet, "Contribution à l'optimisation de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation utilisée en mode moteur". Thèse de doctorat, 2008, Université de Toulouse, France.

[26] S. Khojet El Khil, "Commande Vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)". Thèse de doctorat, 2006, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[27] M. Grine, "Etude d'éolienne à vitesse variable basée sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA)". Mémoire de magister, 2011, Université de Mostaganem, Algérie.

[28] Y. Albia, "Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté". Mémoire de magister, 2009, université de Batna, Algérie.

[29] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne". Thèse de doctorat, 2003, Université de Nantes, France.

[30] G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation". Thèse de doctorat, 2007, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[31] N. Akkari, "Contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation". Thèse de doctorat, 2010, Université de Batna, Algérie.

[32] L. Benalia, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentés". Thèse de doctorat, 2010, Université de Batna, Algérie.

[33] L. Baghli, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", Cours, UFM de Lorraine-UHP université Henri Poincaré Nancy1, France, 2005.

[34] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales". Thèse de doctorat, 2008, Université Henri Poincaré, Nancy France.

[35] T. Ghennam, "Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP". Mémoire de magister, 2003, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie.

[36] J. Arrilaga, N. R. Watson, "Power system harmonics", 2éme édition, John Wiley & Sons, 2003.

[37] Luc Lasne, J.C. Gianduzzo, "Electrotechnique : Rappels fondamentaux puissances électriques, Systèmes triphasés, Circuit magnétique, Transformateurs, Harmoniques, Régimes transitoires, Réseaux électriques". 2007, Université de Bordeaux.

[38] M. Ferhat, "Commande en temps réel d'un filtre actif de puissance". Mémoire de magister, 2012, Université de Sétif, Algérie.

[39] I. Etxeberria.otadui, "Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique.application à la qualité de l'énergie électrique". Thèse de doctorat, 2003, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

[40] CEI, 61000.1.1: Electromagnetic compability (EMC), Part 1: General, section 1: application and interpretation of fundemantal definitions and terms, 2001.

[41] Y. Abdelli, "Etude et commande de convertisseurs statiques multifonction en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique". Thèse de doctorat, 2005, Université de Nantes, France.

[42] M. A. E. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension". Thèse de doctorat, 2002, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, France.

[43] Bettega et J. Fiorina, "Cahier technique 183 : Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs", Rapport technique, 2000, Schneider Electric.

ملخص:

أدى الاستخدام المتزايد للأجهزة الالكترونية في أنظمة الطاقة للمشاكل المتزايدة كالتشوه التوافقي أو تعطل شبكات الكهرباء .ينتج هذا التشوه من وجود الحمولة غير الخطية المرتبطة بالشبكة حيث تستهلك تيارات غير جيبية . في هذا العمل سلطنا الضوء على دراسة المرشح الكهربائي النشيط لمحاربة ظاهرة التلوث التوافقي وإصلاح الشبكات الكهربائية باستعمال الماتلاب.

ولقد استخدمنا ثلاثة أنماط من التحكم: التباطؤ الكلاسيكي، التباطؤ المعدل والتباطؤ بتعديل عرض النبضة.و المحاكاة أدت إلى نتائج مرضية للغاية من حيث قيمة THD.

كلمـات مفتاحيـــة :مولد غير متزامن مزدوج التغذية (م,غ,م,ت), التوافقيات, المرشح الكهربائي

Résumé :

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Ce manuscrit est consacré à la dépollution des réseaux électriques par les filtres actifs qui sont étudiés par simulation sous environnement Matlab. Ce filtre permet d'offrir la minimisation des courants harmoniques présents sur le réseau avec une éolienne connectée. Trois types de contrôleurs de courant sont envisagés : hystérésis classique, hystérésis modulée et MLI. Les simulations ont conduit à des résultats très satisfaisants en termes de THD.

Mots Clés : Machine asynchrone à double alimentation (MADA), harmoniques, filtre actif parallèle.

Abstract:

The increasing use of controlled systems based on power electronics in industry causes more and more problems as deterioration of the power systems voltage and current waveforms. The circulation of deformed currents causes harmonics and voltage imbalances. Several solutions have been proposed in the literature to clean up the harmonic pollution; among them 'The parallel active filter'. In this thesis, and with the aim to improve the power quality, we have studied active power filter. The modeling and simulation of a parallel active filter with three types of current controllers (MLI, classical hysteresis and modulated hysteresis) are studied under Matlab environment.

Key Words: Double-fed induction machine (DFIM), harmonics, parallel active filter.