

République Algérienne Démocratique Et Populaire
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen
Faculté de Technologie



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER

Filière : *Electrotechnique*

Spécialité : *Réseaux Electriques Et Réseaux Electriques Intelligents*

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par

Soumia AHMED BRAHIM & Sanaa Yakout BOBOT

Intitulé du Mémoire

Elimination des perturbations générées par une éolienne dans un réseau électrique

Soutenu publiquement le 29 Juin 2017 devant les membres de jury composé de :

S. M. MELIANI	Président	MCA	U.A.B - Tlemcen
M. A. BRIKCI NIGASSA	Encadrant	MAA	U.A.B - Tlemcen
M. C. BENHABIB	Examinateur	MCA	U.A.B - Tlemcen
A. GORINE	Examinateur	MCB	U.A.B – Tlemcen

Année Universitaire : 2016 – 2017

Dédicace

*A la mémoire de mon grand-père **Maamar MENAD**, vous êtes toujours dans mon esprit, et vous resterez dans mon cœur, aujourd'hui je suis en train de réaliser ton rêve, je vous dédie ma réussite, que dieu vous accueille dans son éternel paradis.*

Je dédie ce travail

*À ma **Chère Mère***

Cette brave femme qui s'est toujours dévouée à ses enfants. Toute ta vie durant ,tu n'as ménagé aucun effort pour le bonheur et la réussite de tes enfants. Ce travail est avant tout le fruit de tes sacrifices consentis, de ta grande compréhension et de l'amour que tu nous as donné qui comme par miracle efface toutes nos peines.

Pour cela, chère mère, je te dis un grand merci et prie Dieu pour qu'il t'accorde une longue vie afin que tu puisses profiter pleinement des fruits que tu as semés.

*À ma chère **Grande Mère**, en lui exprimant mon amour, mon respect pour ses sacrifices tous les longs des années, qu'Allah la protège.*

*Et à mon **Cher Père** Tu es l'exemple d'un bon idole tu as contribué largement à ma réussite .Merci beaucoup papa*

*A mes oncles **Mustafa** et **Bachir** et mes tantes **Mimouna** , **Nadia**, Merci pour tout, ainsi qu'à ma chère sœur **Kaouthar** et mon petit frère **Ilyes** .*

*A mes meilleures amis : **Khansaa** , **Bouchra** , **Nawel** , **Manel**, **Azzedine** et **Ali** qui ont toujours été présents pour moi.*

*Enfin, je le dédie à mon binôme **Soumia et sa famille** et toute la promo de master 2 Option **REFEI 2016-2017***

Yakout Sanaa

Dédicace

Merci Allah, de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

*Je voudrais remercier ma famille qui , depuis de si longues années, m'a encouragé et soutenu dans la poursuite de mes études .Merci cher **PAPA** et adorable **MAMAN** pour le meilleur cadre familial qu'ils ont su créer, pour l'affection qu'ils m'ont témoigné et pour le bonheur qu'ils savent si bien engendrer autour d'eux merci pour le soutien moral et financier J'espère que mon travail sera le témoignage de ma gratitude et mon respect le plus profond.*

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

*A mon mari **DJAWED** qui m'a toujours encouragé et soutenue Moralement et a mon fils que j'attends avec impatience.*

*A mes adorables sœurs **ASMA** et son mari **ISMAIL, SARA** et **MALAK**.*

*A mes nièces **YASMINE** et **ZINEB**,*

*A tous mes amis spécialement **AMINA** et **NIHEL**,*

*A mon binôme **SANAA** et sa famille.*

Soumia .

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

*Nous sommes honorés que **Monsieur Sidi Mohamed MELIANI**, Maître de conférences à l'Université Abou Bekr-Belkaïd, ait accepté de présider et d'honorer de sa présence le jury de soutenance du présent mémoire de Master. Qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.*

*Notre remerciements vont également aux membres du jury **Monsieur Mohammed Choukri BENHABIB** Maître de conférence à la faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen et **Monsieur Ali GORINE** Maître de conférence à la faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen pour l'honneur qu'ils nous ont fait en participant à l'évaluation de ce travail.*

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA, Maître - Assistant à la faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaid de Tlemcen pour avoir proposé, suivi et dirigé ce travail. Nous le remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience ainsi que ses orientations constructives et ses encouragements qui nous ont été précieux, et nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier Monsieur Abdelkarim CHEMIDI pour ses précieux conseils et son aide durant la période du travail.

Enfin, nous ne pourrions terminer ce remerciement sans une pensée à l'ensemble de nos enseignants qui sont à l'origine de tout notre savoir.

Sanaa Yakout BOBOT
Soumia AHMED BRAHIM

Tlemcen 29 Juin , 2017

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les éoliennes	
I.1	Introduction..... 4
I.2	Définition de l'énergie éolienne..... 4
I.3	Avantages et Inconvénients 4
I.4	Principales composantes d'une éolienne..... 6
I.5	Types d'aérogénérateurs 7
I.5.1.	Aérogénérateurs à axe horizontal 7
I.5.2	Aérogénérateurs à axe vertical 11
I.6	Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 13
I.6.1	Loi de betz..... 13
I.6.2	Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique..... 17
I.6.2.1	Fonctionnement a vitesse fixe 17
I.6.2.2	Fonctionnement a vitesse variable..... 18
I.7	Conclusion..... 19
CHAPITRE II : Modalisation de la machine asynchrone à double alimentation	
II .1	introduction..... 21
II .2	structure de la MADA..... 21
II.3	Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation..... 22
II.3.1	Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone..... 22
II.3.2	Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone 23
II.4	Transformation de Park 24
II .5	Modèle de la MADA lié au champ tournant 25
II .6	Modèle De La MADA A Flux Statorique Oriente..... 27
II..6.1	Choix du référentiel pour le modèle diphasé 27
II.7	Commande vectorielle 30

II.7.1	Commande vectorielle directe	30
II.7.2	Commande vectorielle indirecte	30
II.8	les avantages et les inconvénients de la MADA.....	32
II.9	principe de la commande de la MADA	32
II.10	Simulation et interprétation	33
II.11	Conclusion.....	37
CHAPITRE III : les perturbations électriques dans le réseau		
PARTIE a :	Qualité de l'énergie.....	39
III.1	Introduction	39
III.2	Dégradation de la qualité de l'énergie électrique.....	39
III.2.1	Creux et coupure de tension.....	40
III.2.2	Variation des fréquences.....	40
III.2.3	Fluctuation de tension.....	40
III.2.4	Déséquilibres de système triphasé de tension.....	41
III.2.5	Conséquence des phénomènes perturbateurs.....	41
III.3	Caractéristique de la pollution harmonique.....	42
III.3.1	Taux harmonique de rang h.....	42
III.3.2	Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	42
III.3.3	Taux de distorsion.....	42
III.3.4	Le facteur de puissance.....	43
III.4	Normes standards pour limiter les harmoniques.....	44
III.5	Solutions aux perturbations harmoniques.....	45
III.5.1	Solutions traditionnelles de Dépollution.....	45
III.5.2	Solutions modernes de dépollution.....	46
PARTIE b :	Etude d'un filtre actif parallèle.....	46
III.6	Introduction.....	46
III.7	Filtres actifs de puissance.....	47
III.8	Principe de filtre actif parallèle.....	47
III.9	Topologie du filtre actif parallèle.....	49
III.9.1	Stratégie de commande directe.....	49

III.9.2	Théorie dite du référentiel lie au synchronisme.....	50
PARTIE c :	Résultats de simulation.....	53
III.10	Introduction.....	53
III.11	Présentation du système a simulé.....	53
III.11.1	Simulation de La MADA pour un système équilibré en présence d'harmonique de tension généré par la source avec une charge linéaire ..	55
III.11.2	Simulation de La MADA pour un système équilibré en présence d'harmonique de tension généré par la source avec une charge linéaire et un filtre actif parallèle ..	57
III.11.3	Interprétation des résultats.....	58
III.12	Conclusion.....	58
	Conclusion générale.....	59
	Bibliographie	
	Annexes	
	Résumé	

Chapitre I

Figure I.1	Principales composantes d'une éolienne.....	1
Figure I.2	Aérogénérateur à axe horizontal	6
Figure I.3	configuration à axe horizontal	8
Figure I.4	Éléments constituant une éolienne	9
Figure I.5	Eoliennes à axe vertical	11
Figure I.6	principe de la trainée différentielle	11
Figure I.7	principe de l'incidence variable	11
Figure I.8	Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....	13
Figure I.9	Coefficient de puissance	16
Figure I.10	Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs.....	16
Figure I.11	Aérogénérateur à vitesse fixe	17
Figure I.12	Aérogénérateur à vitesse variable.....	18

Chapitre II

Figure II.1	Structure du rotor de la MADA.....	21
Figure II.2	Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....	23
Figure II.3	Fonctionnement en mode hyper synchrone.....	23
Figure II.4	Représentation de la MADA dans le repère de Park.....	24
Figure II.5	Schéma bloc de la commande vectorielle directe.....	30
Figure II.6	Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte.....	31
Figure II.7	Schéma de principe pour la commande de la MADA.....	33
Figure II.8	variation Puissance active statorique P (watt) avec régulateur PI..	34
Figure II.9	variation de la Puissance réactive statorique $Q(VAR)$ avec régulateur PI.....	34
Figure II.10	variation du Courant statorique I_s avec régulateur PI.....	35
Figure II.11	La puissance active avec regulateur de puissance.....	35

<i>FigureII.12</i>	<i>Le courat isq avec regulateur de courant.....</i>	<i>35</i>
<i>FigureII.13</i>	<i>La puissance réative avec regulateur de puissance.....</i>	<i>36</i>
<i>FigureII.14</i>	<i>Le courat isd avec regulateur de courant.....</i>	<i>36</i>
<i>Chapitre III</i>		
<i>Figure III.1</i>	<i>Digramme de Fresnel des puissances.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure III.2</i>	<i>structure du filtre actif parallèle.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III.3</i>	<i>Principe de branchement d'un filtre actif parallèle.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.4</i>	<i>schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III.5</i>	<i>Commande directe d'un filtre actif de puissance.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.6</i>	<i>Représentation vectoriel de passage de repère abc ver le repère (dq).....</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.7</i>	<i>Principe de la méthode (dq).....</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.8</i>	<i>Schémas du réseau avec FAP étudié.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.9</i>	<i>Le courant injecté par le filtre $i_{fl}=f(t)$.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.10</i>	<i>Représentation des caractéristiques : (a) courants de charge $i_{chl}=f(t)$ (c) courants de source $i_{sl}=f(t)$ (b)et(d) FFT du courant de charge et source THD.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.11</i>	<i>Schémas du réseau avec MADA et charge linéaire.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III.12</i>	<i>Schéma Bloc de la MADA.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure III.13</i>	<i>Le courant de la source (is1) et son FFT.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure III.14</i>	<i>Schéma bloc de La MADA avec une charge linéaire et un filtre actif parallèle.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.15</i>	<i>Représentation des caractéristiques : (i) courants de source $i_{sl}=f(t)$ (h)et FFT du courant de source THD.....</i>	<i>57</i>

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

<i>Tableau I.1</i>	<i>Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....</i>	5
<i>Tableau I.2</i>	<i>Principales composantes d'une éolienne.....</i>	6
<i>Tableau I.3</i>	<i>Eléments constituant une éolienne à axe horizontal.....</i>	10
<i>Tableau I.4</i>	<i>Avantages et inconvénients d'une éolienne à axe vertical.....</i>	13
<i>Tableau I.5</i>	<i>Avantages et inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe...</i>	18
<i>Tableau I.6</i>	<i>Avantages et inconvénients du fonctionnement à vitesse variable.....</i>	19

Chapitre II

<i>Tableau II. 1</i>	<i>les avantages et les inconvénients de la MADA.....</i>	32
----------------------	---	----

Chapitre III

<i>Tableau III.1</i>	<i>Types de perturbation.....</i>	41
<i>Tableau III.2</i>	<i>paramètres de simulation.....</i>	53

Notations

V_0	Vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne
Ω	Vitesse angulaire de rotation des pales
U	Vecteur unitaire tangent de la pale
$\Omega_{turbine}$	Vitesse de rotation de la turbine
V	La vitesse du vent
ρ	La masse volumique de l'air ($\rho \simeq 1.225 \text{ Kg/m}^3$)
R	Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.
C_p	Coefficient du rendement aérodynamique de la turbin
CC M	Commande du Convertisseur Côté Machine
CCR	Commande du Convertisseur Côté Réseau
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
d,q	Composantes de Park (lié au rotor) directe et quadrature
f.m.m	Force magnétomotrice
F	Coefficient de frottement visqueux (Nm/Rad/s)
f	Fréquence du réseau
R_s	Résistance d'une phase due stator
R_r	Résistance d'une phase du rotor
L_s	Inductance propre d'une phase du stator
L_r	Inductance propre d'une phase du rotor
M	Inductance mutuelle maximale
n_p	Nombre de paires des pôles
$V_{sd}; V_{sq}$	Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q
$V_{rd}; V_{rq}$	Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$I_{sd}; I_{sq}$	Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q
$I_{rd}; I_{rq}$	Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$\Phi_{sd}; \Phi_{sq}$	Composantes du flux statorique respectivement suivant l'axe d et q
$\Phi_{rd}; \Phi_{rq}$	Composantes du flux rotorique respectivement suivant l'axe d et q

$[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})]$	Matrice de transformation directe de PARK
$[\mathbf{P}(\boldsymbol{\theta})]^{-1}$	Matrice de transformation inverse de PARK
\mathbf{V}_{abc-s}	Tensions simples du stator de la MADA
ω_s	Vitesse électrique du champ tournant
ω_r	Vitesse électrique du rotor
ω_{gl}	Vitesse angulaire du glissement
g	Glissement
\mathbf{C}_{em}	Couple électromagnétique
Ω_r	Vitesse de rotation de la machine
\mathbf{R}_f	Résistance du filtre entre CCR et le réseau
\mathbf{L}_f	Inductance du filtre entre CCR et le réseau
\mathbf{P}_{ref-s}	Puissance active de référence statorique
\mathbf{Q}_{ref-s}	Puissance réactive de référence statorique
$\mathbf{V}_{fdq} ; \mathbf{I}_{fdq}$	Les tensions et les courants du réseau dans le repère (d, q)
$\mathbf{V}_{f1.2.3} ; \mathbf{I}_{f1.2.3}$	Les tensions et les courants du réseau
\mathbf{P}_f	La puissance transitant dans le filtre RL
\mathbf{K}_p	Gain proportionnelle du régulateur
\mathbf{K}_i	Gain intégrale du régulateur
PI	Régulateur proportionnel intégral
\mathbf{V}_s	Tension de la source
Vdc	Tension aux bornes du condensateur de l'onduleur
D	La puissance déformante
FAP	Filtre actif parallèle
F.P	Facteur de puissance
THD	EN ANGLAIS total harmonic distortion
PLL	En anglais Phase locked loop

Introduction générale

La demande sur l'énergie électrique ne cesse de croître et les sources d'énergie fossile sont de moins en moins abondantes du principalement à une industrialisation croissante en plus de l'augmentation démographique et à la quête de l'humanité au confort énergivore.

Avec cette crise énergétique éminente, les énergies renouvelables se sont naturellement apparues comme l'une des solutions énergétiques propres et sans danger.

*« Quand le vent du changement se lève les uns construisent des murs,
les autres des moulins à vent ».*

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre travail qui s'intéresse à l'une des formes des énergies renouvelables qui exploite le vent à savoir l'énergie éolienne.

Les éoliennes sont étroitement dépendantes de l'énergie cinétique produite par le vent, et par conséquent la maîtrise de la vitesse de rotation des aérogénérateurs nécessite des commandes adaptées.

Notre mémoire de fin d'étude se propose d'effectuer une étude avec simulation l'utilisation d'un filtre actif parallèle pour éliminer les perturbations électriques de types courants générés par la présence de charges alimentées par un aérogénérateur connecté au réseau électrique. Pour cela, nous présentons notre travail sous forme de trois chapitres, tel que :

Le Chapitre 1 est consacré aux rappels sur l'énergie éolienne, le principe de la théorie de BETZ, les modes de fonctionnement d'une MADA ainsi que ses avantages et inconvénients.

Le Chapitre 2 est consacré à la validation de notre modèle de génératrice asynchrone à double alimentation d'une puissance de 1.5 MW. Notre choix s'est porté sur l'utilisation d'une commande indirecte, ainsi que l'intégration de deux boucles de régulation en puissance et en courant.

Du fait que de plus en plus d'équipements intégrant des dispositifs à base d'électronique de puissance, sont interconnecté aux réseaux électrique, la qualité des signaux électriques se voie détériorée. D'où, l'intérêt du **Chapitre 3** qui est dédié à l'intégration d'un filtre actif parallèle à notre système pour éliminer les perturbations de type courants générées par ses équipement interconnectés. Ce dispositif devra aboutir à ce que les signaux courant coté source reste sinusoïdaux.

***Chapitre I
Généralités sur
les systèmes éoliens***

I.1 Introduction

Ces dernières années, on constate un intérêt de plus en plus croissant envers les énergies renouvelables considérées comme respectueuses de l'environnement. Parmi ces énergies, on citera l'énergie éolienne exploitée par les aérogénérateurs qui transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ces aérogénérateurs peuvent être à base de machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces génératrices 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 leur rentabilité.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur. Cette énergie est renouvelable. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Un aérogénérateur, est un dispositif qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ce processus représente un champ d'interaction de nombreuses disciplines scientifiques et du savoir-faire de la météorologie à l'écologie.

I.3 Avantages et Inconvénients

Les avantages et les inconvénients de cette énergie peuvent être résumés dans le tableau I.1 suivant :

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.	La puissance électrique produite par lesaérogénérateurs n'est pas constante. Cependant, le bruit a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor[2].
L'énergie éolienne ne produit pas de déchets radioactifs.	
Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement auxprocédés continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.	
Les parcs éoliens se démontent très facilement en comparaison avec les centrales traditionnelles.	L'impact sur les oiseaux :certaines études[2][4]disent que les sites éoliens ne doivent pas êtreimplantés sur les parcours migratoires des oiseaux.
C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux (de proximité) en énergie. Ainsi, lespertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.	
Cette source d'énergie peut stimuler l'économie locale, notamment dans les zones Rurales	L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif[2]
Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie dedéveloppement. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativementsimple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales auxénergies plus traditionnelles.	
Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.	
La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts).	

I.4 Principales composantes d'un aérogénérateur

Nous nous limiterons à présenter les aérogénérateurs à axe vertical :

Tableau I.2 : Principales composantes d'un aérogénérateur.

Eléments	Définitions
La nacelle	Contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent. Elle est liée à la tour par une liaison de type pivot motorisée permettant de choisir son orientation et éventuellement de positionner l'éolienne vis-à-vis du vent.
Le rotor	Permet de transférer une partie de la puissance du vent à l'arbre lent de l'éolienne. Son diamètre détermine la puissance qui pourra être récupérée. Il est composé d'un moyeu auquel sont accouplées des pales. Les matériaux entrants dans la composition des pales sont essentiellement à base de composites comme la fibre de verre et la fibre de carbone.
Les pales	Peuvent être articulées sur leur axe totalement ou partiellement, ou encore être conçues afin de décrocher aérodynamiquement sous des vitesses de vent excessives.
La tour	Plusieurs types de tour existent suivant la puissance de l'éolienne, cependant, la plupart des éoliennes de forte puissance sont conçues avec une tour autoporteuse en structure acier solidement ancrée à une fondation en béton ferrailé.

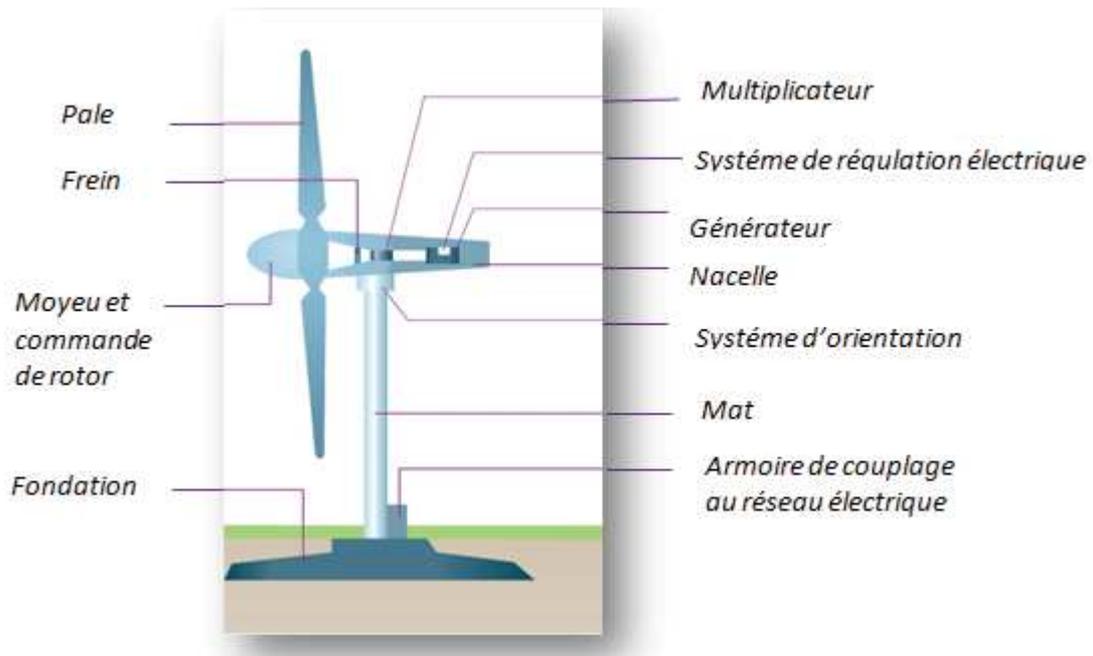


Figure I.1 : Principales composantes d'une éolienne.

I.5.Types d'aérogénérateurs

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe de capture d'énergie à savoir la structure de la turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal

I.5.1Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal *Figure I.2* sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisqu'elles présentent un coût moins important. De plus, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [10]. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance[11].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.



Figure I.2 : Aérogénérateur à axe horizontal.

Deux types de configuration peuvent être rencontrés :

- **Amont** : Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable *Figure I.3*.

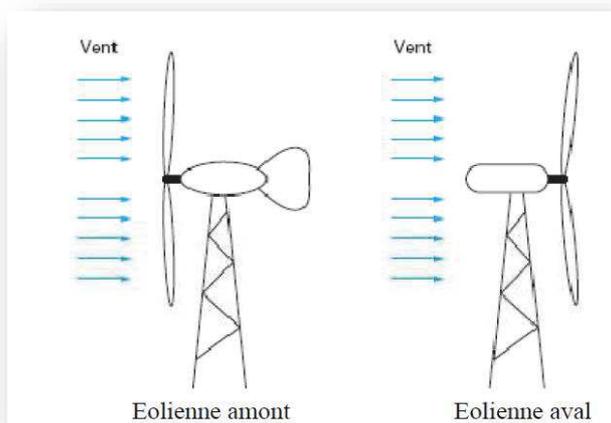


Figure I.3 : configuration à axe horizontal.

l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour.

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : l'amont requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que l'aval autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « Amont »,

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure *Figure I.4* :

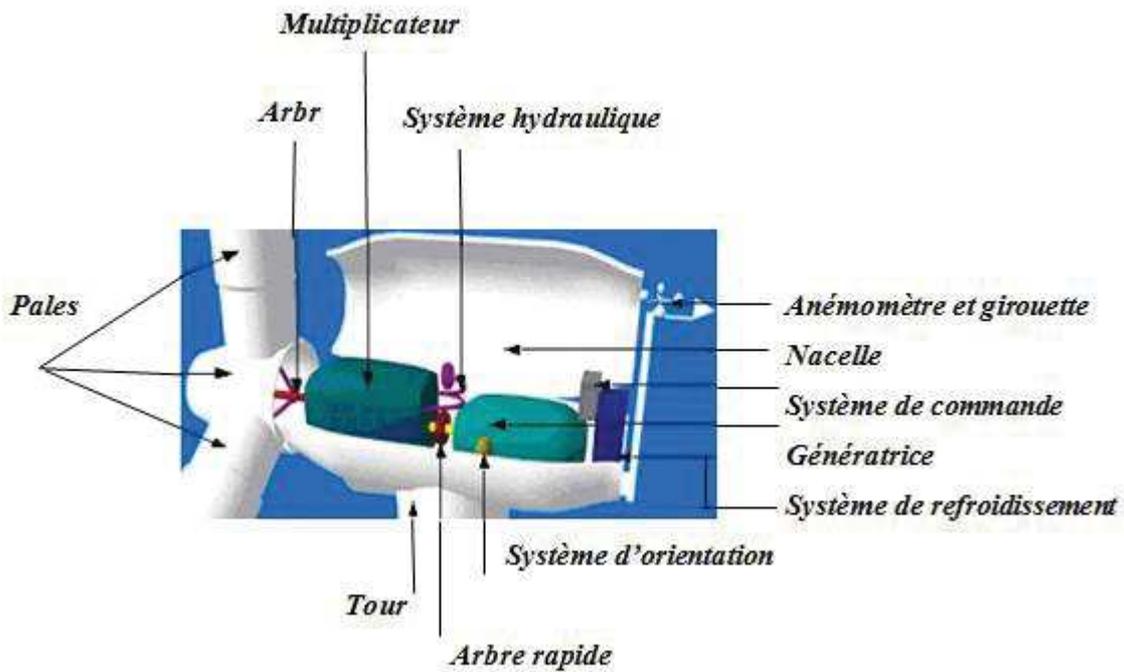


Figure I.4 : Eléments constituant une éolienne [12].

Tableau I.3: Eléments constituant une éolienne à axe horizontal

Eléments	Définitions
Le mat ou la tour	C'est un tube en acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum d'énergie cinétique du vent et éviter ainsi les perturbations près du sol. Ausommet du mat se trouve la nacelle.
La nacelle	Regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératriceélectrique à l'arbre de l'éolienne.
Le multiplicateur	Sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératriceélectrique, avec un rapport de transformation.
Le système de refroidissement	Se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
La génératrice électrique	C'est l'élément principal de la conversion mécano-électriquequi est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW [13].
Le système de commande	Contrôle en permanence le bon fonctionnement del'éolienne et intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
L'arbre	Relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique Permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
Le système d'orientation des pâles	Sert à la régulation de la puissance (réglageaérodynamique).
La turbine	Est munie des pâles fixes ou orientables qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

I.5.2 Aérogénérateurs à axe vertical

Ce type d'éolienne présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs.

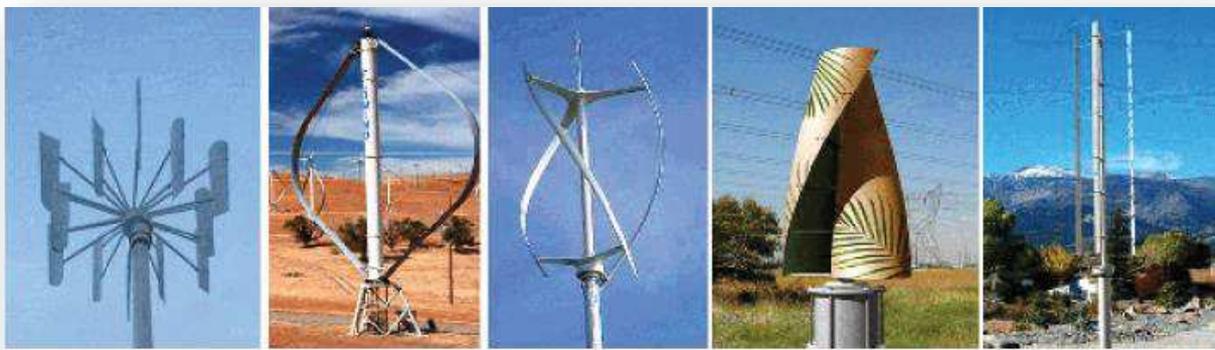


Figure I.5 : Eoliennes à axe vertical

Les turbines à axe vertical présentent l'avantage majeur de ne pas être sensibles aux changements de direction du vent, et d'être beaucoup moins perturbées par les turbulences.

- **Principes d'une éolienne à axe vertical:** Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la trainée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

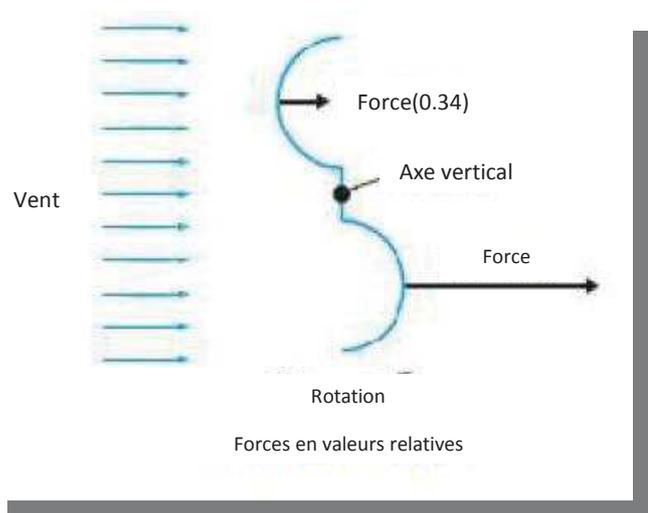


Figure I.6: principe de la trainée différentielle [5]

Trainée différentielle : Le principe de mise en mouvement de ce type de machines tel qu'il est schématisé dans la *Figure I.6* est identique à celui d'un anémomètre : l'éolienne est munie de deux pales de forme creuse, sur lesquelles des efforts d'intensités différentes et de sens opposés sont exercés par le vent. Il en résulte donc un couple moteur qui fait tourner le rotor de l'éolienne. [5]

Variation cyclique d'incidence : Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de direction variables *Figure I.7*

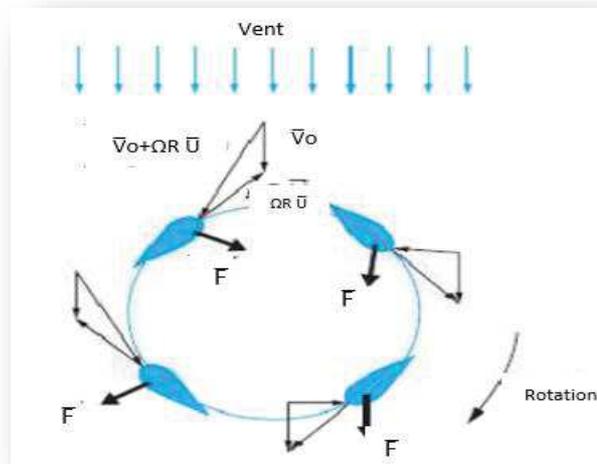


Figure I.7 : principe de l'incidence variable [5]

Avec:

V_0 : Vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne,

Ω : Vitesse angulaire de rotation des pales,

R : rayon de la pale,

U : vecteur unitaire tangent de la pale

La combinaison de ces forces génère un couple moteur. Cependant le fonctionnement fait appel à la rotation des pales, ce qui implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire [5].

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, elle fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

- **Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical**

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients d'une éolienne à axe vertical.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien[14]. • La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction[14]. • Construction souvent simple[15]. • Faible bruit [15]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible rendement et fluctuations importantes de puissance [14]. • Faible vitesse du vent à proximité du sol [14]. • L'éolienne ne démarre pas automatiquement (Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s)[15].

I.6 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.6.1 Loi de Betz

Considérons le cas d'une éolienne à axe horizontal placée dans un tube d'air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et d'une section S_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 et d'une section S_2 . On désigne par S la surface balayée par l'hélice et V la vitesse du vent au niveau des pales. Selon le principe d'incompressibilité de l'air et la continuité d'écoulement *Figure I.8*. on peut écrire que :

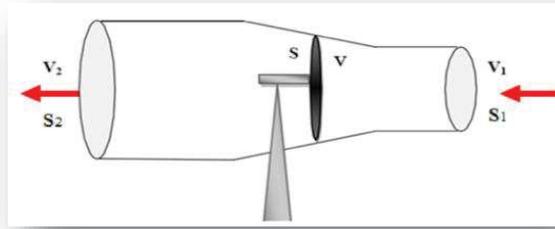


Figure I.8 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

$$S_1 V_1 = SV = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, la force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par :

$$F = \rho \cdot SV \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot SV^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur et aussi égale à la variation de l'énergie cinétique E_C de la masse d'air qui le traverse d'où :

$$\frac{\Delta E_C}{\Delta t} = P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \cdot SV \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.4)$$

On en déduit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (1.2) et (1.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \rho \cdot S (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

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

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.8)$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraire du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (I.9)$$

Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59. C'est 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 [8].

C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine, Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pale β).

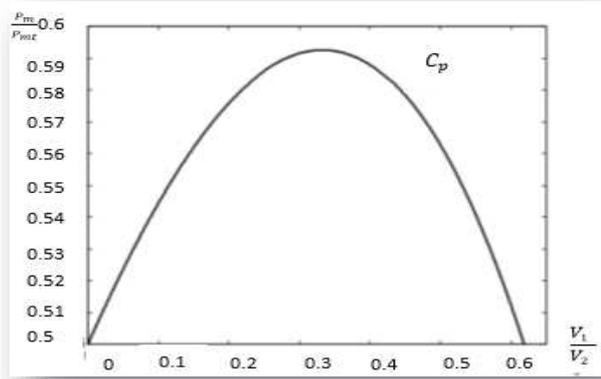


Figure I.9 coefficient de puissance

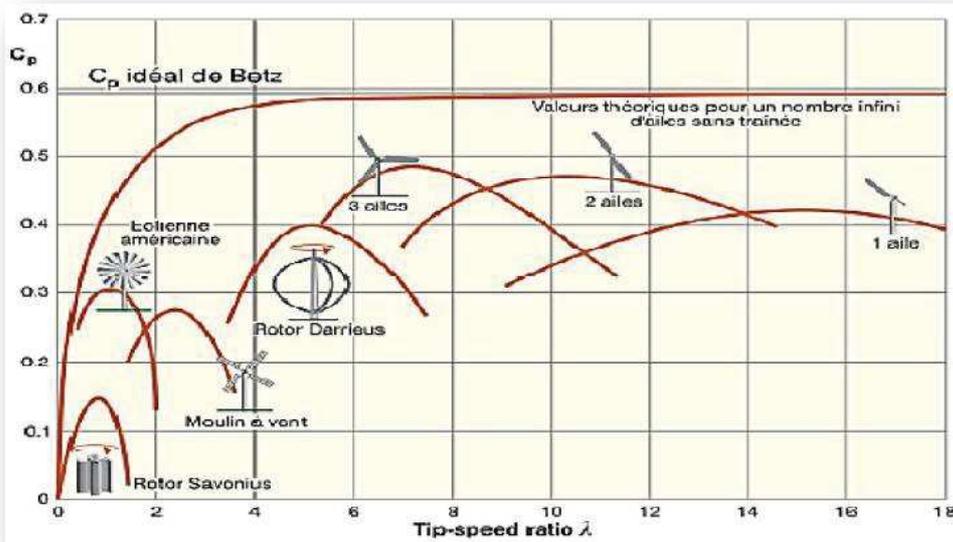


Figure I.10 : Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateurs.

En combinant les équations (I.8) et (I.9), la puissance mécanique P_{aero} disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}} \right) P_{mt} = C_p(\lambda) P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_1} \quad (I.11)$$

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine

V : Vitesse du vent.

ρ : Masse volumique de l'air ($\rho \approx 1.225 \text{ Kg/m}^3$)

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

C_p : Coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine

I.6.2. Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

I.6.2.1 Fonctionnement a vitesse fixe

La génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil)[14] est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance *Figure I.11*, sa vitesse mécanique est fixe et imposée par la fréquence de travail du réseau et/ou par le nombre de pair de pôles de la génératrice.

Il nous faut alors un système d'orientation des pales de l'aérogénérateur pour avoir un fonctionnement au voisinage du synchronisme et aussi un multiplicateur de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

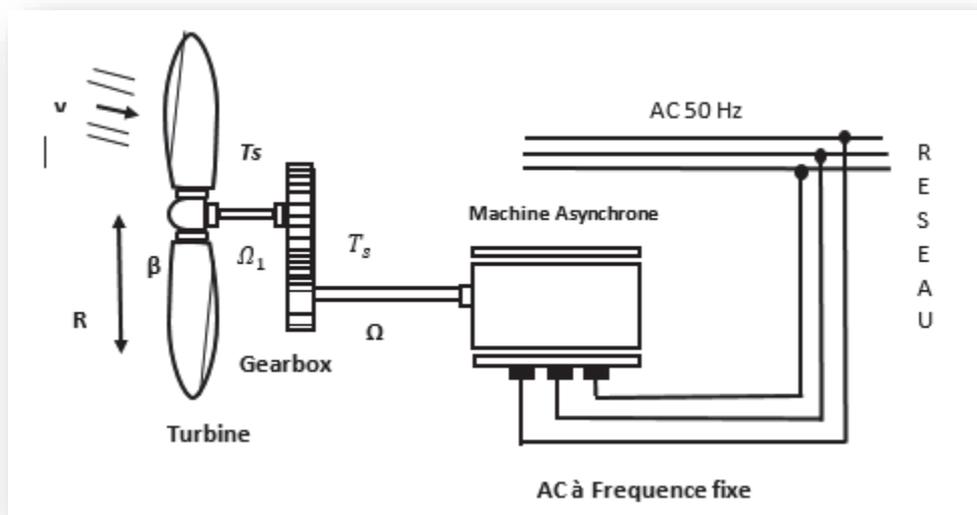


Figure I.11: Aérogénérateur à vitesse fixe.

- *Avantages et Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe*

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Système électrique plus simple. • Moins cher. • Pas besoin de système électronique. • Plus fiable (moins d'entretien) [15]. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'énergie captée n'est pas forcément optimale. • Difficulté de contrôler la puissance transmise au réseau. • Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance [15].

I.6.2.2 Fonctionnement a vitesse variable

Vu les contraintes posées par le fonctionnement à vitesse variable (Systèmes d'orientation, maintenance périodique, rendement médiocre, ...), il est nécessaire d'exploité de façon optimale la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent. Pour cela, il est nécessaire d'ajuster enpermanence la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent par des commandes sur la turbine, que ce soit sur le générateur électrique lui-même et/ou sur les paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance *Figure I.12* [9].

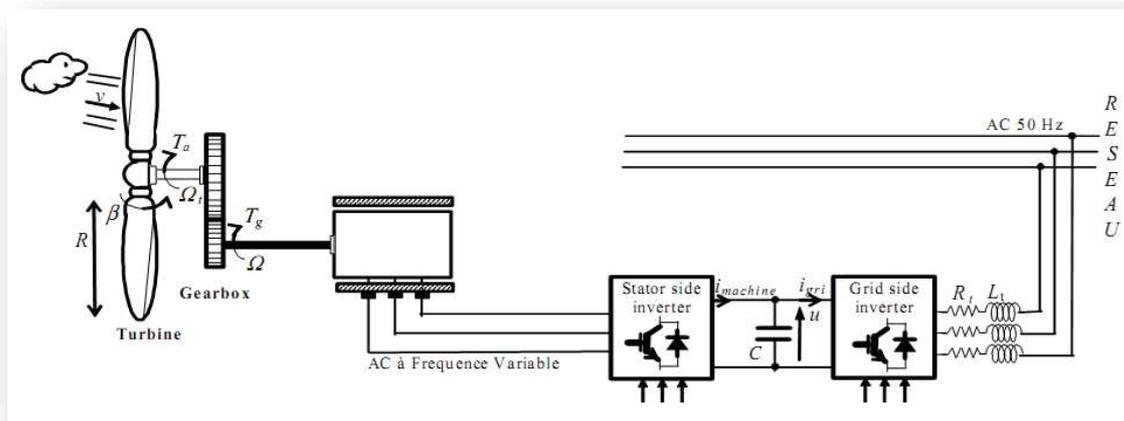


Figure I.12: Aérogénérateur à vitesse variable.

- *Avantages et Inconvénients du fonctionnement à vitesse variable*

Tableau I. 6 : Avantages et inconvénients du fonctionnement à vitesse variable.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor. • Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau. • Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité. • Réduction des bruits acoustiques[15]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de machines spéciales. • Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,..). • Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

I.7 Conclusion

A travers ce premier chapitre nous avons présenté l'état de l'art des systèmes de conversion éolien à travers les différentes structures existantes : les éoliennes à axe vertical, à axe horizontal ainsi que le fonctionnement à vitesse fixe et variable avec leurs avantages et inconvénients.

Nous avons présenté le développement théorique des systèmes éoliens connu par la théorie de BETZ qui donne les performances d'un système éolien avec une valeur maximal du coefficient théorique de 0.59 qui reste inatteignable pour les éoliennes industrielles actuelles.

Notre choix de travail s'est porté sur l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentations, pour ce faire nous allons dans le chapitre suivant chercher à valider la modélisation et simulation de ce type de machine.

Chapitre II
Modalisation de la Machine
Asynchrone à Double Alimentation

II.1 introduction

Dans ce chapitre, on se propose de modéliser la chaîne de conversion éolienne de puissance de 1.5 MW, Cette modélisation est établies termes d'équations différentielles et est basée essentiellement sur la transformation de Park. Puisque les machines asynchrones dans les systèmes industriels ne sont pas directement alimentées par le réseau électrique, un onduleur de tension est prévu[28].Un nombre conséquent d'aérogénérateurs sont dotés de génératrices de type MADA, consistant à raccorder le stator de cette machine directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques triphasés réversibles "*back to back mode*"), l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur [23].

II .2 Structure de la MADA

La structure de la MADA possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique ou d'une machine synchrone. La différence réside dans le rotor composé d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais *Figure. II.1*, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques[14].

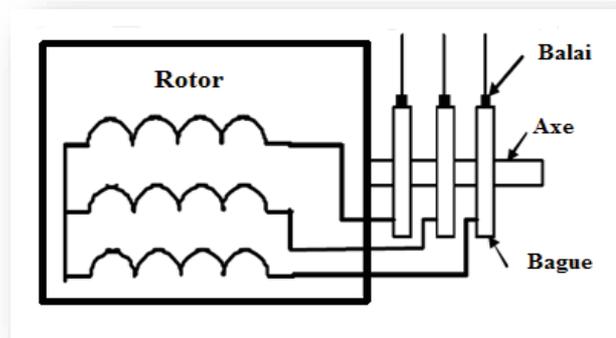


Figure. II.1 :Structure du rotor de la MADA.

II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre et du moment que le vecteur résultant de la fmm des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω_r . Pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des fmm des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que [19] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s g \quad (\text{II.1})$$

où :

g : est le glissement

ω_{gl} : est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés. [19]

Pour que la rotation du vecteur résultant des fmm par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence, définie à partir de $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$; c'est à dire :

$$f_{ro} = f^* g \quad (\text{II.2})$$

II.3.1 Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance est fournie au réseau par le stator de même pour la puissance de glissement ($g > 0$), une partie de la puissance est absorbé par le rotor *Figure. II.2.* [22]

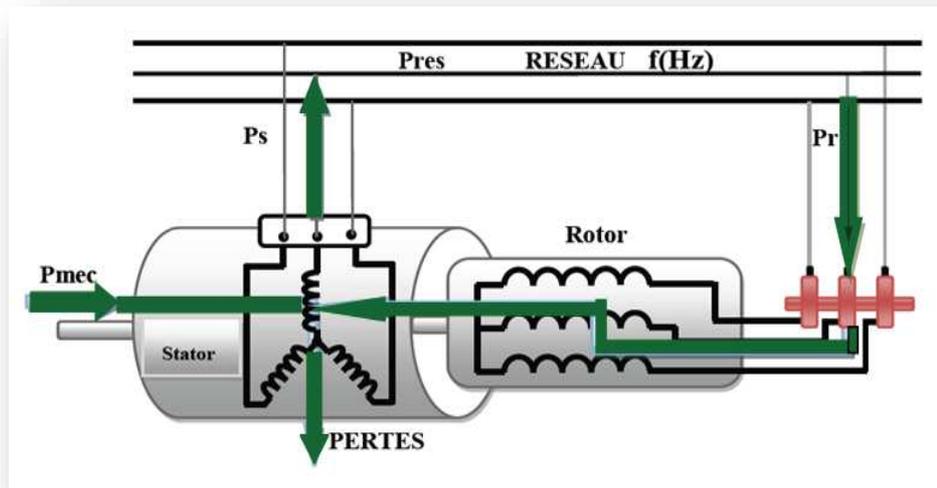


Figure. II.2 : fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.

II.3.2 Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau, comme illustré dans la Figure. II.3, la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réinjectée par le rotor ($g < 0$). [22]

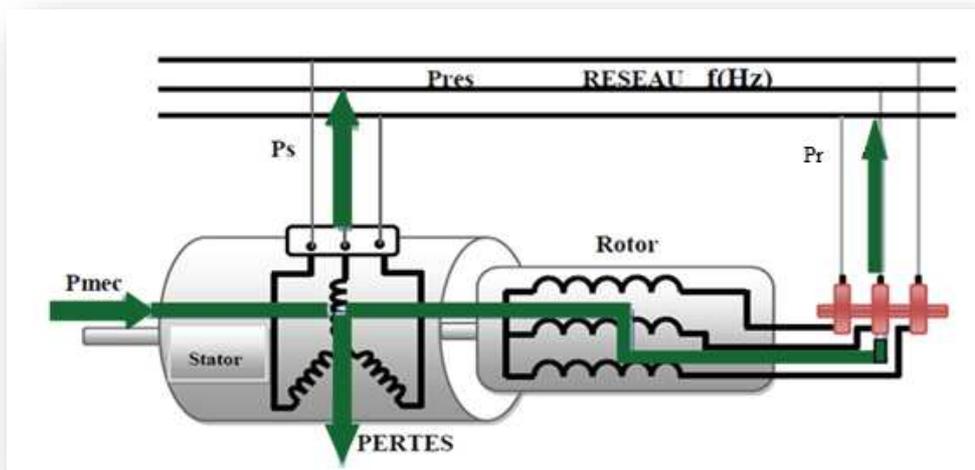


Figure. II.3 : Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.

Avec :

P_S : Puissance de stator

P_r :Puissance de rotor

P_{mec} :Puissance mécanique

P_{res} :Puissance de réseau

II.4.Transformation de Park

Toujours dans le but de rendre compte au mieux de la réalité, il est utile de travailler avec la transformation de Park ,il est possible de passer du repère fixe (α, β) à un repère tournant (d, q) dit *de Park*, qui peut ensuite être associé soit au stator, rotor ou au champ tournant[16]. Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature, *Figure. II.4* [29].

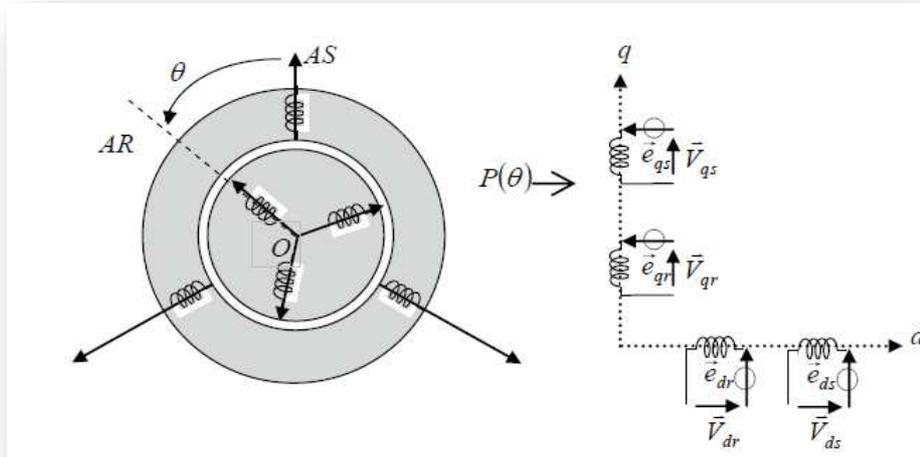


Figure. II.4. Représentation de la MADA dans le repère de Park.

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (II.3):

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Avec x : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- o : indice de l'axe homopolaire.
- d : indice de l'axe direct.
- q : indice de l'axe en quadrature.

Pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

II.5 Modèle de la MADA lié au champ tournant

On exprime les tensions statoriques et rotoriques par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases}$$

Les flux statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases}$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont définies comme suit :

$$\begin{cases} P_{ds} = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_{qs} = V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{cases} P_{dr} = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_{qr} = V_{qr} I_{dr} + V_{dr} I_{qr} \end{cases}$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = -\frac{M}{L_s} p \varphi_{ds} \cdot I_{qr} \quad (\text{II.10})$$

La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotoriques est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - p \Omega \quad (\text{II.11})$$

Les angles θ_s et θ_r sont obtenus respectivement par intégration de ω_s et ω_r .

$$\theta_s = \int_0^t \omega_s dt \quad (\text{II.12})$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt$$

Où ω_s représente la pulsation des courants statoriques en rad/s.

II .6. Modèle De La MADA A Flux Statorique Oriente

Dans ce qui suit, nous allons supposer que l'axe du repère de Park est orienté suivant le flux statorique. Ce choix n'est pas au hasard mais il se justifie par le fait que la machine est souvent couplée à un réseau puissant de tension et de fréquence constante, ce qui entraîne un flux constant au stator de la machine [29].

Rappelant le système d'équations différentielles ((II.7) décrivant la machine asynchrone dans un repère lié au champ tournant est donné par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases}$$

II .6.1.Choix du référentiel pour le modèle diphasé

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

Nous nous proposons de développer la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique. Cette commande se décompose de deux parties :

- Le contrôle des courants rotoriques.
- Le découplage ou compensation.

Avec un flux statorique constant et orienté $\varphi_{ds} = \varphi_s$, $\varphi_{qs} = 0$, $R_s = 0$, ces équations

peuvent se simplifier sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_s \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}(\varphi_{dr}) - \omega_r \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}(\varphi_{qr}) + \omega_r \varphi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.13})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{ds} = \varphi_s = -L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = -L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} - M I_{ds} \\ \varphi_{ds} = L_r I_{qr} - M I_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

Partir de l'équation de flux, nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ds} = \frac{M}{L_s} I_{dr} - \frac{\varphi_s}{L_s} \\ I_{qs} = \frac{M}{L_s} I_{qr} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé, les puissances actives et réactive statoriques d'une machinea synchrone s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ds} = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_{qs} = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{array} \right. \quad (\text{II.16})$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$(\text{II.17})$$

$$\begin{cases} P_{ds} = V_{qs} I_{qs} \\ Q_{qs} = V_{qs} I_{ds} \end{cases}$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve. :

$$P_{ds} = -V_s \frac{M I_{qr}}{L_s} \quad (\text{II.18})$$

$$Q_{qs} = V_s \left(\frac{\varphi_s - M I_{dr}}{L_s} \right)$$

Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

A partir du système d'équation (II.14) et on en remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions tension statoriques diphasées de l'équation (II.13). Nous obtenons alors :

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d I_{dr}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + \frac{M v_s}{L_s \omega_s} - (\omega_s - \omega) \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \quad (\text{II.20})$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d I_{qr}}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + (\omega_s - \omega) \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + (\omega_s - \omega) \frac{M v_s}{L_s \omega_s}$$

II.7 Commande vectorielle

Commande vectorielle à flux rotorique orienté est dite directe ou indirecte selon la méthode d'estimation du vecteur flux rotorique

II.7.1 Commande vectorielle directe

Cette 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. Le schéma bloc de cette commande est présenté dans la *Figure. II.5.*[18]

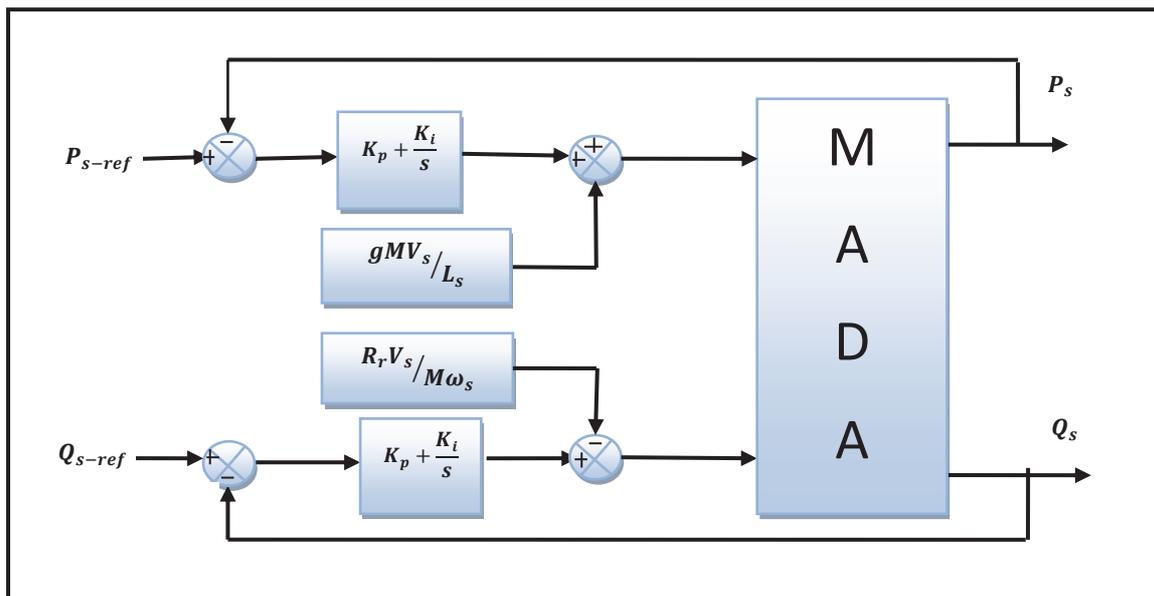


Figure. II.5 : Schéma bloc de la commande vectorielle directe.

II.7.2 Commande vectorielle indirecte

Pour régler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégrale pour chacune, une boucle pour la puissance et une autre pour le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et découplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur *Figure. II.6.* Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée.[24]

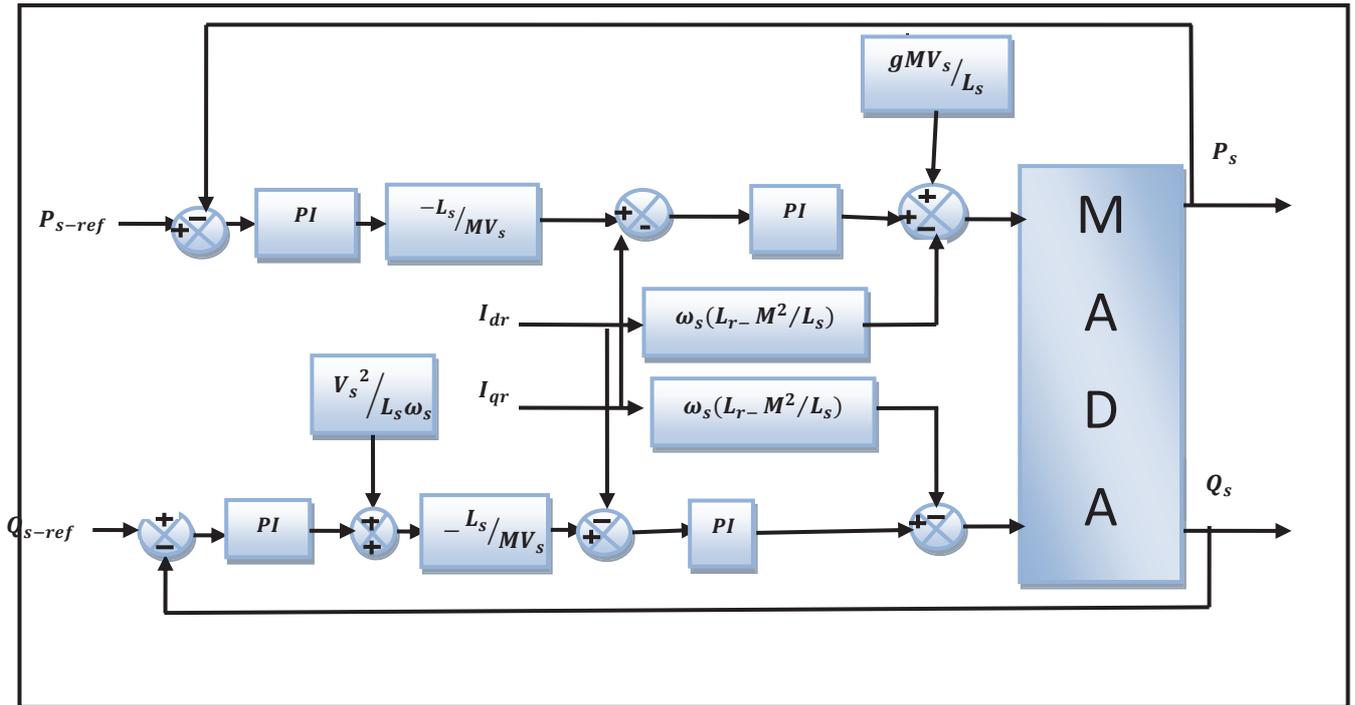


Figure. II.6 : Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte.

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Toute fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. [30]

Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l'utilisation en génératrice de la MADA. De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs sur un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers.

La synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée [30]. Le dimensionnement du régulateur PI est présentée dans l'annexe A.

II.8. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous pouvons introduire quelques avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation MADA lors de son fonctionnement à vitesse variable dans le tableau suivant[26] :

Tableau II. 1 : Avantages et inconvénients de la MADA.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • grande flexibilité et précision au contrôle du flux et découple électromagnétique lors de mesure des courants. • Le partage des fréquences entre le stator et le rotor • Réduire les pertes fer et augmenter le rendement. En alimentant avec deux convertisseurs, la machine permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge. • La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances. • La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale. 	<ul style="list-style-type: none"> • Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais. • utilisation 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). • Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage

II .9. Principe de la commande de la MADA

Sur le schéma suivant, nous pouvons voir deux convertisseur l'un est nommé CCM (convertisseur coté machine) et l'autre CCR (convertisseur coté réseaux)

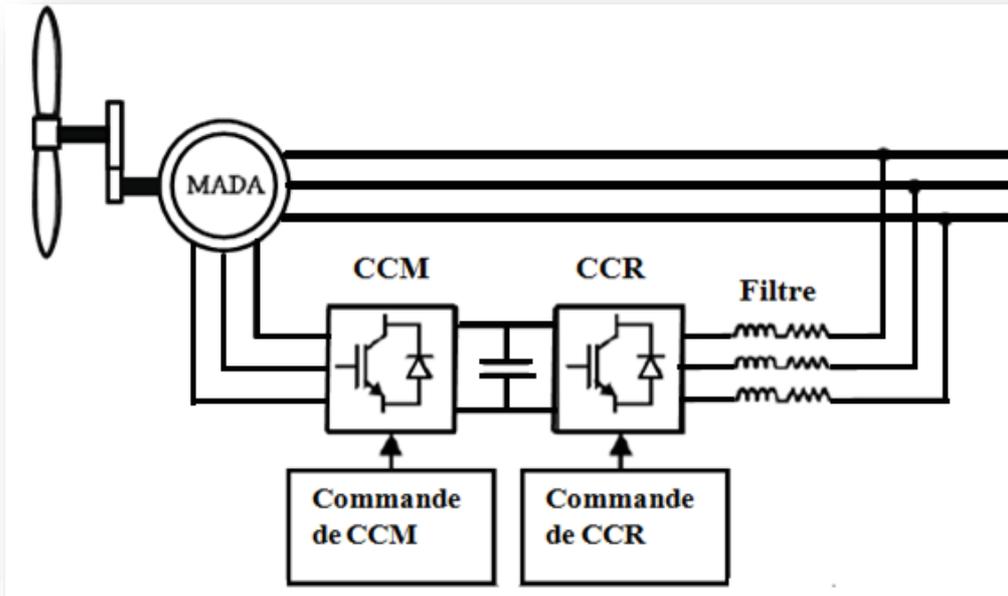


Figure. II.7: Schéma de principe pour la commande de la MADA.

On a utilisé la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance [27] pour contrôler le convertisseur coté machine

Une fois commandé le CCM va nous permettre de commander :

- le couple électromagnétique,
- la puissance active et réactive statorique de la MADA

Le convertisseur coté réseau CCR est situé entre le bus continu et le réseau. Il est connecté à ce dernier via un filtre RL. Ce convertisseur permet de réguler la tension du bus continu et d'avoir une puissance réactive nulle échangée entre le CCR et le réseau.

Cette commande assure donc deux fonctions suivantes [17] :

- la puissance réactive échangées avec le réseau
- le contrôle de la tension du bus continu

II.10 Simulation et interprétation

On essaie de valider maintenant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation décrite par les équations trouvées avec la transformation de Park liée au

champ tournant citées auparavant. Les paramètres de la MADA utilisée sont énoncés dans l'annexe B.

Les résultats de simulations montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtemus par le modele d'une MADA de puissance 1.5 MW.

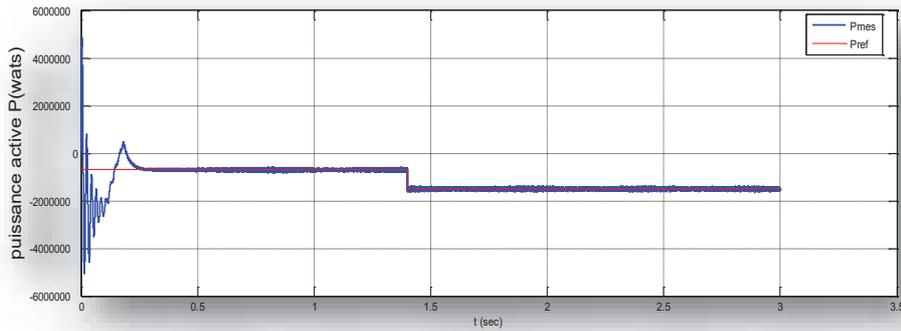


Figure II.8. Puissance active statorique P (watt).

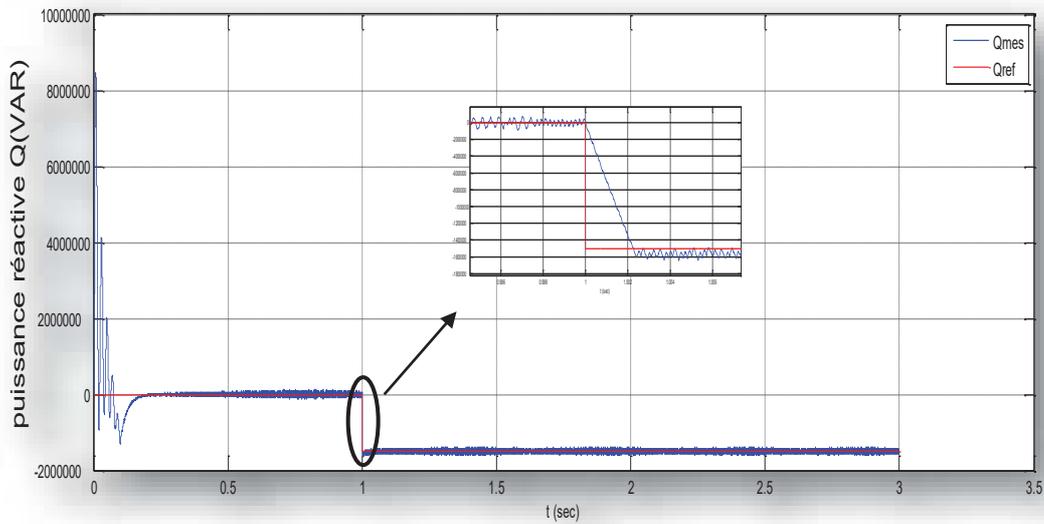


Figure II.9 Puissance réactive statorique Q (VAR).

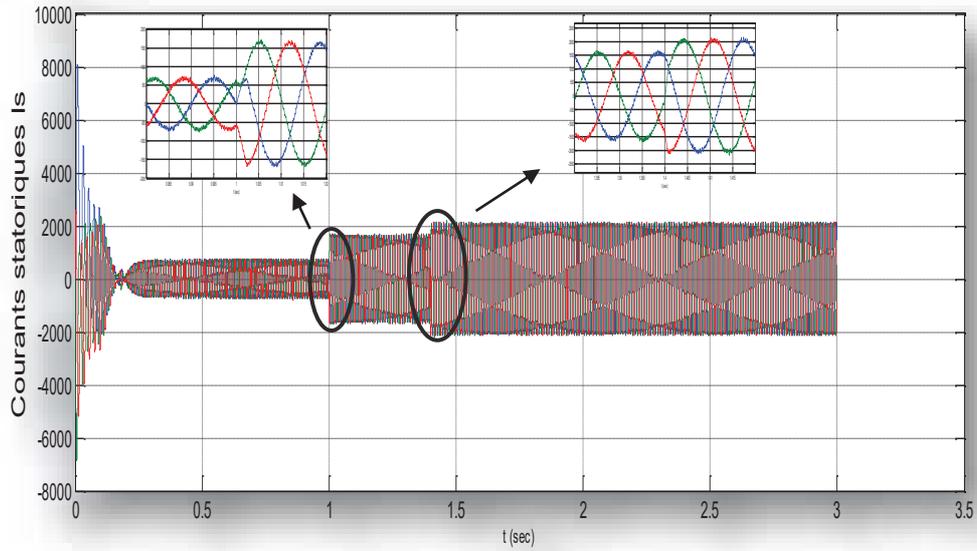


Figure II.10 Courant statorique I_s .

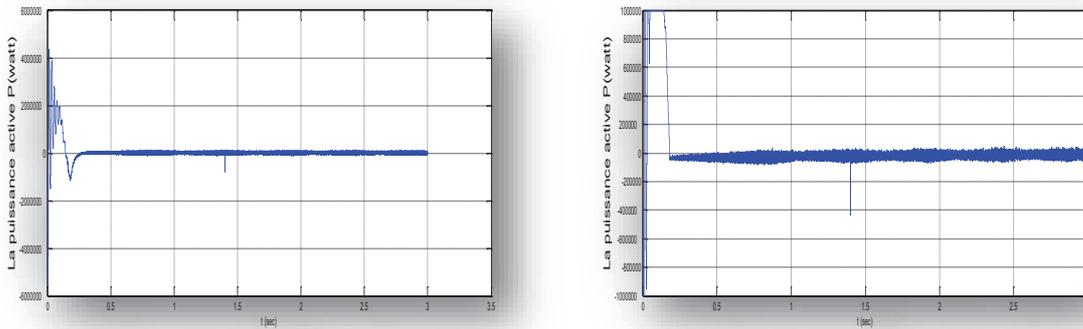


Figure II.11 Puissance active.

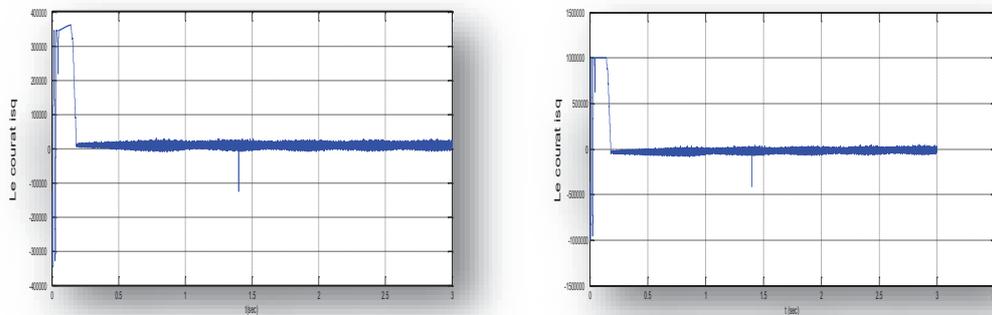


Figure II.12 : Courant i_{sq} avec regulateur de courant.

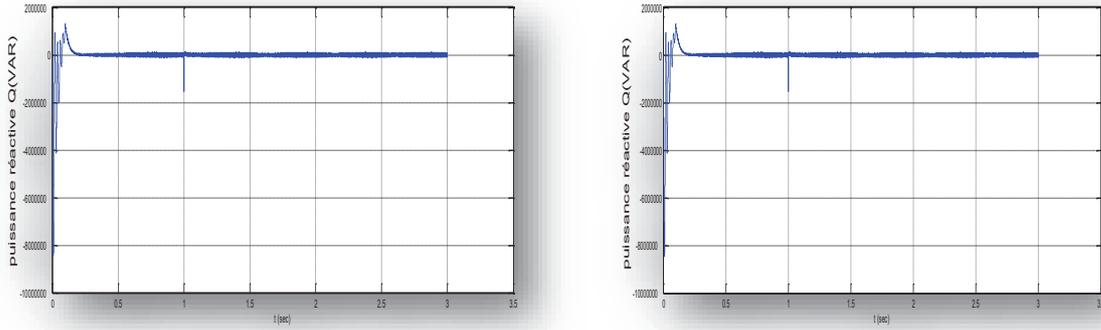


Figure II.13 Puissance réactive avec régulateur de puissance.

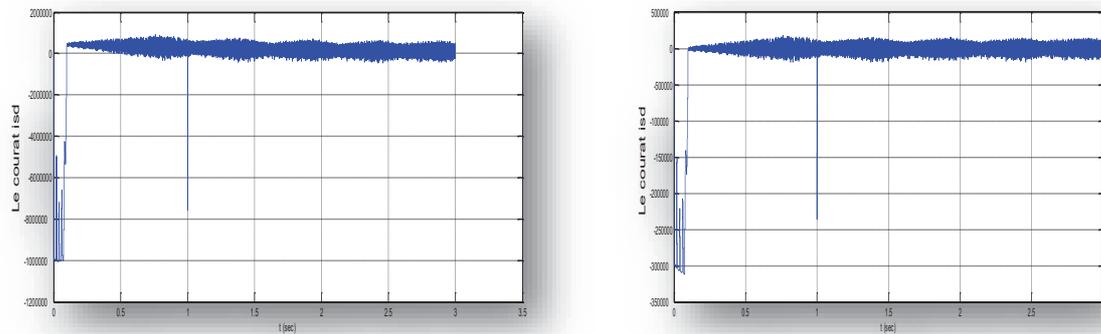


Figure II.14. Courant i_{sd} avec régulateur de courant.

- **Interprétations :**

La commande indirecte utilise quatre (04) régulateurs (02 régulateurs de courant et 02 régulateurs de puissance)

Nous avons procédé à une série de simulations sous environnement MATLAB/Sim Power System, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats de simulation de la commande coté (CCM) représentées dans les Figures II.8 à II.14 et mettant en évidence l'évolution des paramètres suivant la puissance active, et réactive ainsi que les courants statoriques en fonction du temps.

Il est à noter que les performances des régulateurs de puissance PI sont visibles sur les courbes de puissance active et réactive après l'application de deux échelons à $t=1s$ et $t=1,4s$ respectivement Q et P.

La *Figure II.8* illustre bien l'application d'une variation de puissance active d'une valeur de 1.5 MW à $t = 1.4$ s, on remarque que la puissance mesurée suit correctement sa référence.

Dans la *Figure II.9*, à $t = 1$ s, la puissance réactive passe de 0 à -1600000 VAR, on remarque que la puissance mesurée suit aussi sa référence et se stabilise après 1.2 s.

Dans la *Figure II.10*, on voit que le courant statorique est sinusoïdale et suite à l'application de variation de puissance active et réactive, son amplitude varie.

Les *Figures II.11 à II.14* illustrent bien les performances de nos régulateurs que ce soit pour les puissances ou courants en présentant de bonnes dynamiques.

II.11. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de le simplifier. Ainsi, la modélisation et les résultats de simulation de la MADA ont été présentés et discutés. La validation du modèle de MADA à travers les simulations sous environnement Matlab / Sim Power System a ainsi été établie et devra être utilisée le dernier chapitre.

***Chapitre III
FAP pour élimination des
perturbations courant***

III.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale à fréquence fixe suivant certaines tolérances. De ce fait la notion « qualité de l'énergie » est très importante, en raison de l'utilisation à grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance que ce soit par les utilisateurs ou les fournisseurs d'énergie. Ces derniers ont l'obligation de livrer sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées, caractérisé par:[5]

- ✓ Egalité de l'amplitude des trois tensions.
- ✓ Fréquence constante.
- ✓ Forme d'onde sinusoïdale.
- ✓ Symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs.

La qualité de l'énergie de livrée aux utilisateurs dépend de ces quatre paramètres.

III.2 Dégradation de la qualité de l'énergie électrique

Les perturbations des tensions sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation [5]. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques. Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont:

- ✓ Creux de tension;
- ✓ Déséquilibre du système triphasé;
- ✓ Fluctuations de tension (ou flicker);
- ✓ Harmoniques et inter-harmoniques.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système:

- ✓ Amplitude de tension ou de courant;
- ✓ Fréquence.
- ✓ Contenu spectral.

III.2.1 Creux et coupure de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale [33] [34] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation des réseaux électriques. Ils apparaissent également lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs transformateurs, etc.). Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale, disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves, supérieur à une minute pour les coupures longues. La plus part des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. [34]

III.2.2 Variation des fréquences

Une variation sensible de la fréquence peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique, au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles comme dans le cas de certains défauts graves sur les réseaux. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$. [34]

III.2.3 Fluctuation de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension située dans une bande de 10% et se produisent sur un intervalle de temps de quelque centième de seconde.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courant d'appel important. L'origine principale de ce courant et le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder.

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. [34]

III.2.4 Déséquilibres de système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [34]

III.2.5 Conséquences des phénomènes perturbateurs

Parmi les principaux effets instantanés existants, en regroupés dans le tableau (III.1) :

Tableau (III.1) : Types de perturbation.

Types de Perturbation	Conséquences
Creux et coupures de tension	Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.[5]
Fluctuations de tension	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).[5]
Déséquilibres de tension	Couples moteurs inverses (vibrations) et sur échauffement des machines asynchrones.[5]
Harmoniques et inter harmoniques	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.

III.3 Caractéristique de la pollution harmonique

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

III.3.1 Taux Harmonique de rang h

$$S_h = C_h / C_1 \quad (\text{III.1})$$

Où C_h représente la composante harmonique de rang h et C_1 représente la composante fondamentale.

S_h : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

III.3.2. Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2} \quad (\text{III.2})$$

On note qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).

III.3.3 Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_i^2}}{Y_1} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

III.3.4 Le facteur de puissance

Le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominal. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée puissance déformante (D), donnée par la relation III. 3, apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure III.1 [39].

$$D = 3 \cdot V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{III.4})$$

Le facteur de puissance ($F.P.$) devient :

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma \quad (\text{III.5})$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

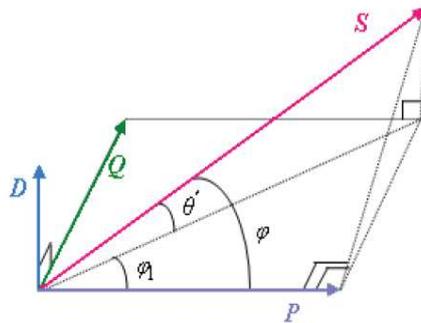


Figure (III.1) : Diagramme de Fresnel des puissances.

φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : Le déphasage entre la puissance active dans le cas d'un système équilibré linéaire SI et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S .

φ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S

III.4 Normes standards pour limiter les harmoniques

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques. Les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes standards des harmoniques qui ont été établies par des institutions internationales pour limiter les niveaux des harmoniques de courant en vue d'une bonne qualité de l'énergie. Ces normes harmoniques et pratiques indiquent les limites sur les niveaux de distorsion des harmoniques de courant et de tension aux différentes fréquences harmoniques. Parmi les principales normes, on cite [45] :

- **EN50 006** : "Limitation des perturbations dans les réseaux électriques causées par des appareils domestiques et semblables équipés de dispositifs électroniques" norme européenne du Comité Européen de Normalisation Electronique (*CENELEC*).
- **Norme IEC555-3** : préparée par la Commission Electrotechnique Internationale (*CEI*).

· **Normes allemandes :**

- VDE 0838 : pour les appareils électroménagers ;
- VDE 0160 : pour les convertisseurs ;
- VDE 0712 : pour les ballasts de lampes fluorescentes.

· **Norme IEEE** : L'IEEE définit les exigences et les recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvrent toutes les plages de puissance. Dans ce standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental. La norme IEEE 519 1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69 KV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3%.

· **BSI-5406(UK)** : Ces normes indiquent les limites strictes de distorsion de courant, très difficiles à respecter pour les industriels pour garantir une bonne qualité de puissance. Alternativement, la limite maximale permise pour les différents

harmoniques dominants est également parfois employée comme mesure de la qualité de l'énergie, une limite pratique de moins de 5% du *THD* doit être utilisée par tous les concepteurs de système et/ou les utilisateurs pour assurer la conformité aux normes établies.

III.5 Solutions aux perturbations harmoniques

Pour diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux :

- Du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution ;
- Du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.

Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

III.5.1 Solutions Traditionnelles de Dépollution

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ;
- Inductance de lissage des courants ;
- Confinement des harmoniques ;
- L'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques ;
- Augmentation de l'indice de modulation ;

Les filtres passifs qui 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 et de la charge ;
- Équipements volumineux ;
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

III.5.2 Solutions Modernes de Dépollution

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les *IGBT*, *IGCT*, *GTO* et *MOSFET*, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques . Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer :

- Les alimentations sans interruption ou de secours (ou *ASI*, ou en anglais *UPS, UN interruptible Power Supply*) ;
- Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles "*Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)*" ;
- Les filtres actifs de puissance "*Active Power Filters (APF)*" ;
- Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

Du fait de leur importance, dans cette thèse, on va traiter uniquement les deux derniers points.

PARTIE 2 : Etude d'un filtre actif parallèle

III.6 introduction

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance (Active Power Filters) sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [42].

III.7 Filtre actif de puissance

Le rôle classique de l'onduleur de tension est d'alimenter à partir d'une source continue, une charge alternative. Les harmoniques doivent être minimisés car seuls les fondamentaux assurent le transfert de la puissance utile. Cependant cet onduleur peut être commandé de manière à ce qu'il ne génère que des courants ou des tensions harmoniques. Ces derniers peuvent être ensuite utilisés pour la dépollution du réseau. L'onduleur de tension connecté au réseau peut assurer le rôle d'un filtre actif de puissance.

Le filtre actif peut être connecté au réseau soit en parallèle soit en série, suivant qu'il est conçu pour compenser les courants ou les tensions harmoniques..

III.8 Principe de filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt est une solution moderne et efficace pour restituer la forme sinusoïdale du courant provenant du réseau électrique lorsque celui-ci est déformé par une charge non linéaire qui se comporte comme un générateur de courants harmoniques. En effet, Il injecte au réseau des courants harmoniques égaux à ceux générés par la charge, mais de phase opposée de façon que le courant du réseau coté source sera ainsi sinusoïdal, par contre la tension au point de connexion ne le sera que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques [43]

Sa structure est la suivante :

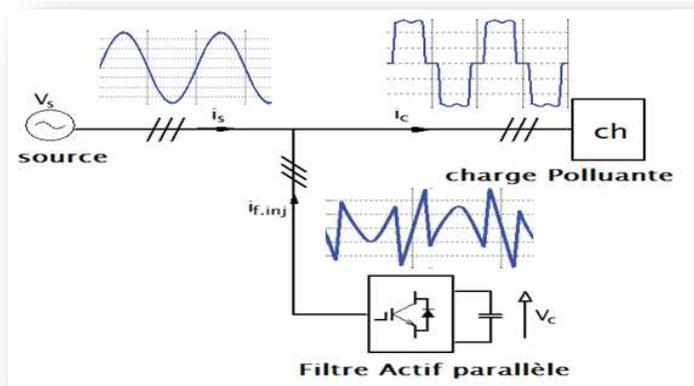


Figure III.2 : structure du filtre actif parallèle.

Le courant de la charge polluante est composé d'une composante fondamentale i_{cf} et de la somme des composantes harmoniques i_{ch} :

$$i_c = i_{cf} + i_{ch} \quad \text{III.6}$$

Si le filtre actif génère un courant i_f identique au courant harmonique de la charge i_{ch} , on obtiendra dans la source un courant sinusoïdal :

$$i_s = i_{cf} \quad \text{III.7}$$

Et son principe est le suivant [43] :

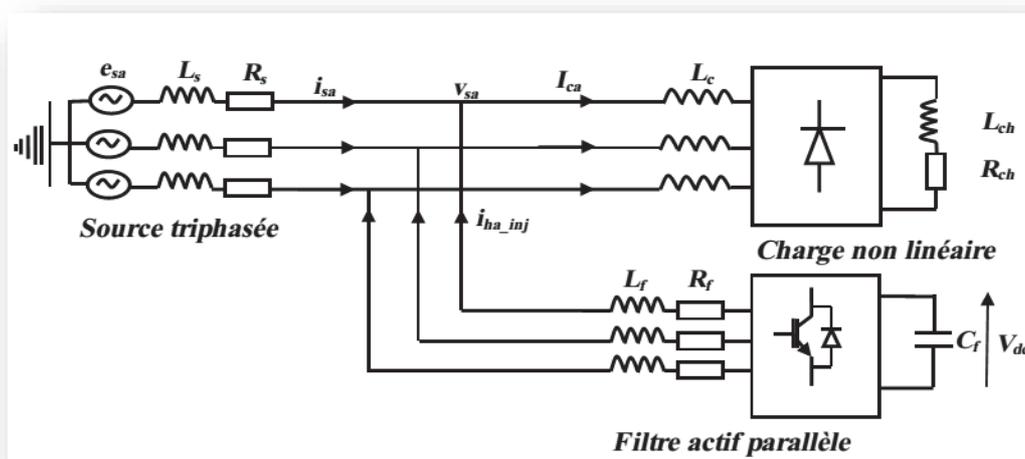


Figure III.3 : Principe de branchement d'un filtre actif parallèle.

Où :

i_{sa} : courant de source

i_{la} : courant de charge

i_{ha_inj} : courant harmonique injecté par le FAP

Théoriquement, le filtre actif de puissance parallèle peut être considéré comme un générateur de courant dont la forme d'onde du courant généré est contrôlée.

III.9 Topologie du filtre actif parallèle

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes: La partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle des courants injectés au réseau ainsi que la commande des interrupteurs.

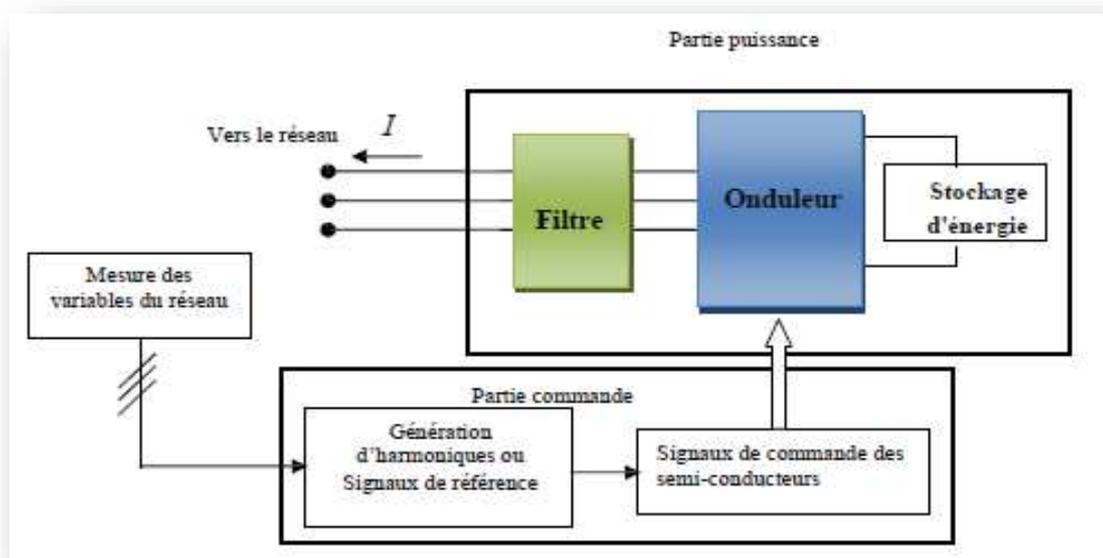


Figure III.4 : Schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.

III.9.1 Stratégie de la commande directe

La commande directe dont le principe est basé sur la comparaison du courant de référence $i_{ref}(t)$ obtenu par une méthode appropriée, au courant injecté par le filtre actif de puissance $i_f(t)$ [42], comme le montre la figure III.5 .

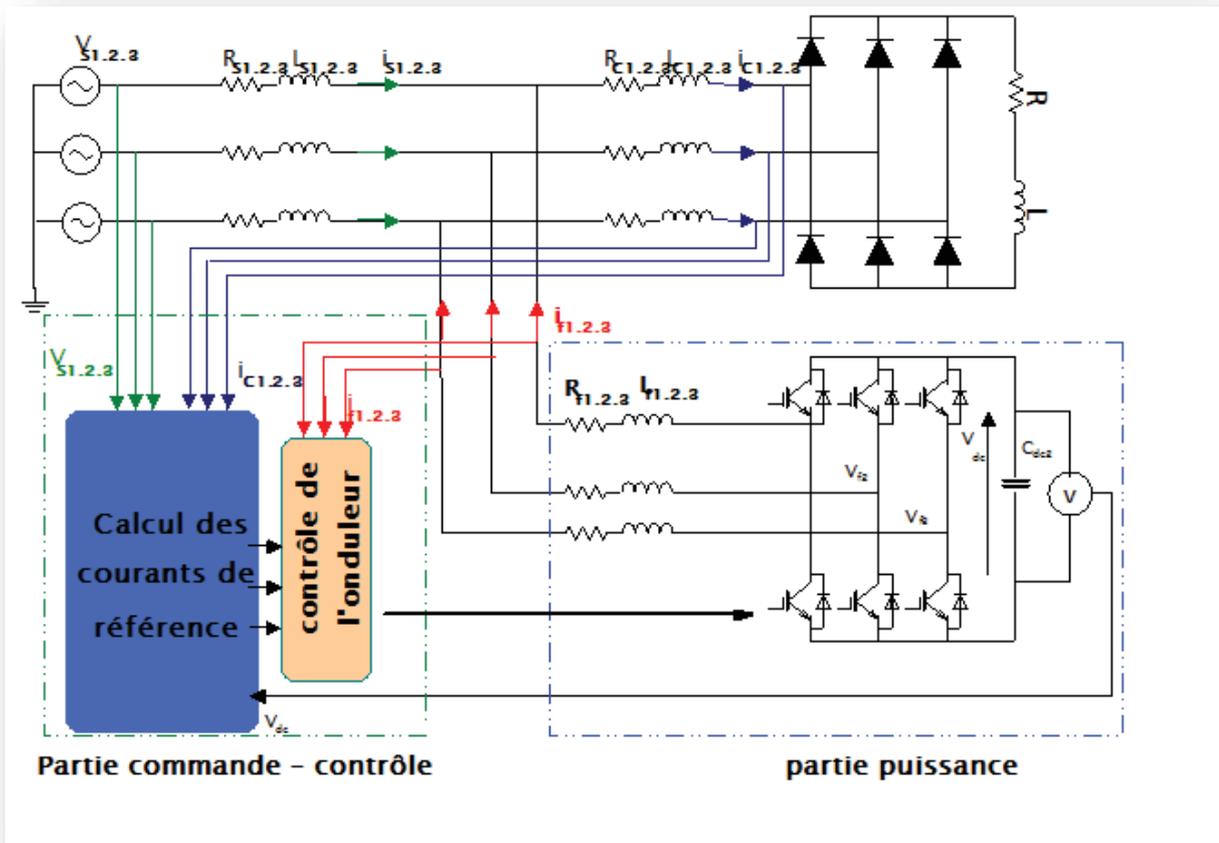


Figure III.5 : Commande directe d'un filtre actif de puissance.

III.9.2 Théorie du référentiel lié au synchronisme $d-q$ « SFR »

Le terme fondamental de la théorie $d-q$ est le résultat de la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge pour notre cas) qui sont initialement donnés suivant le repère abc vers les coordonnées biphasé dq (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park, Il y a cinq étapes pour calculer les courants de référence pour un filtre actif parallèle [40]:

1) **Étape 1:** Transformer les courants de charge triphasés (i_a, i_b, i_c) à (i_α, i_β) sans les homopolaires «

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{III.8}$$

2) **Étape 2:** Transformer les courants i_α et i_β à i_d et i_q par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\tilde{\theta}) & -\cos(\tilde{\theta}) \\ \cos(\tilde{\theta}) & \sin(\tilde{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{III.9}$$

Où ω est la pulsation électrique.

Le schéma vectoriel de passage du repère (abc) vers le repère (dq) est représenté dans la Figure (III.6)

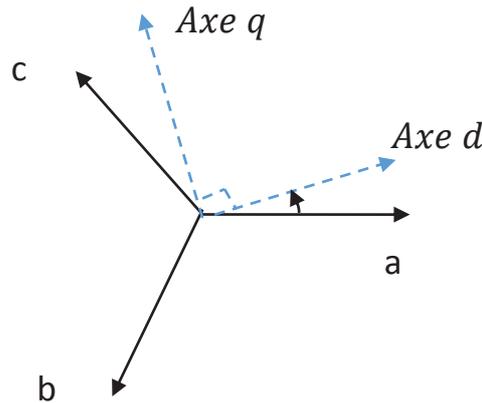


Figure III.6 : Représentation vectoriel de passage de repère abc vers le repère (dq).

On peut décomposer les courants i_d et i_q en deux termes, en composantes continues et oscillatoires. Les harmoniques se comportent comme une composante oscillatoires et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad \text{III.10}$$

Avec :

\bar{i}_d, \bar{i}_q : Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq.

\tilde{i}_d, \tilde{i}_q : Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.

3) **Étape 3:** De l'étape 2, il est montré que les courants de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-bas (FPB) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques \tilde{i}_d, \tilde{i}_q comme illustré dans la Figure III.7 .

4) **Étape 4:** Si nous voulons compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive en même temps :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\tilde{\theta}) & \cos(\tilde{\theta}) \\ -\cos(\tilde{\theta}) & \sin(\tilde{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{III.11}$$

5) **Étape 5 :** Après le choix des paramètres de commande, la transformation inverse de Concordia permet de remonter aux courants de référence.

$$\begin{bmatrix} i_a^{ref} \\ i_b^{ref} \\ i_c^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \end{bmatrix} \quad \text{III.12}$$

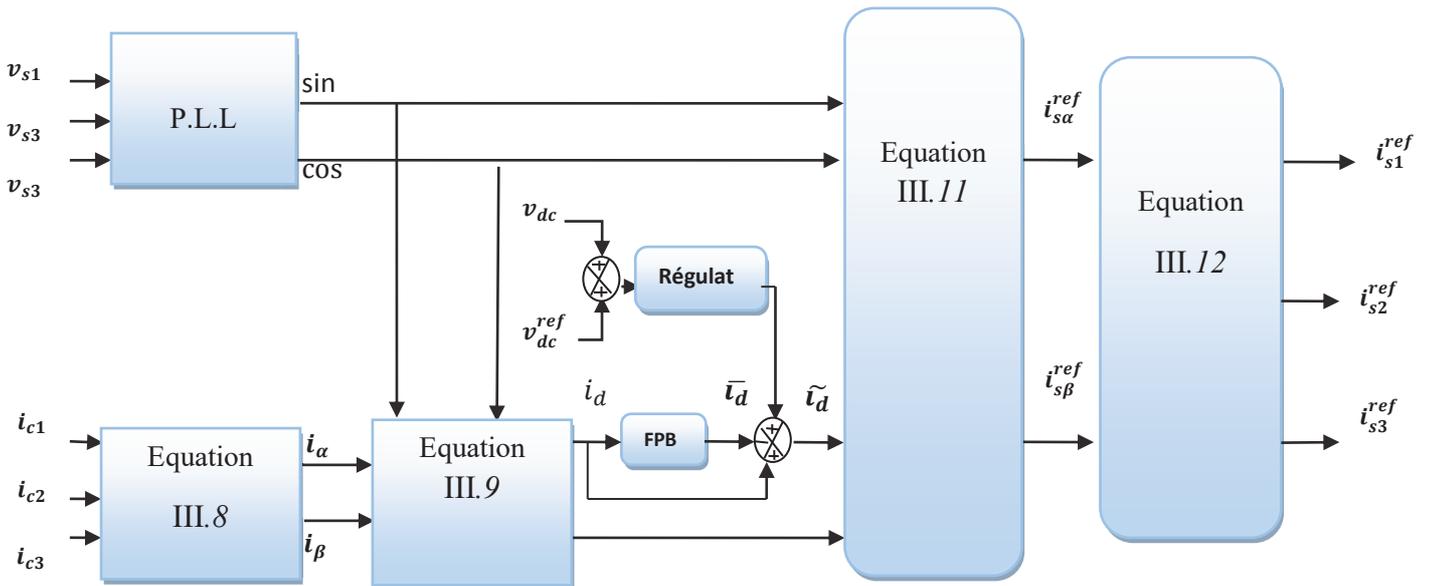


Figure III.7 : Principe de la méthode d-q « SFR ».

Afin d'échanger une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension de la tension fondamentale du réseau. On a utilisé une boucle à verrouillage de phase (PLL: Phase locked loop) [41].

Partie 3:Résultats de simulation

III.10. Introduction

On se propose d’effectu e la simulation de notre système intégrant la MADA alimentant une charge linéaire et évaluer la qualité du signal du courant coté source. Suite à quoi on int egrera un filtre actif de puissance parallèle pour améliorer la qualité du courant de source de sorte à ce qu’il se rapproche le plus possible d’une sinusoïde.

III.11 Présentation du système à simulé

Dans notre étude, on a défini le model ci-dessous de la Figure III.8 comme système d’étude où une source triphasé  equilibr e est int egr e pour alimenter une charge non-linéaire en plus de notre filtre actif de puissance parallèle.

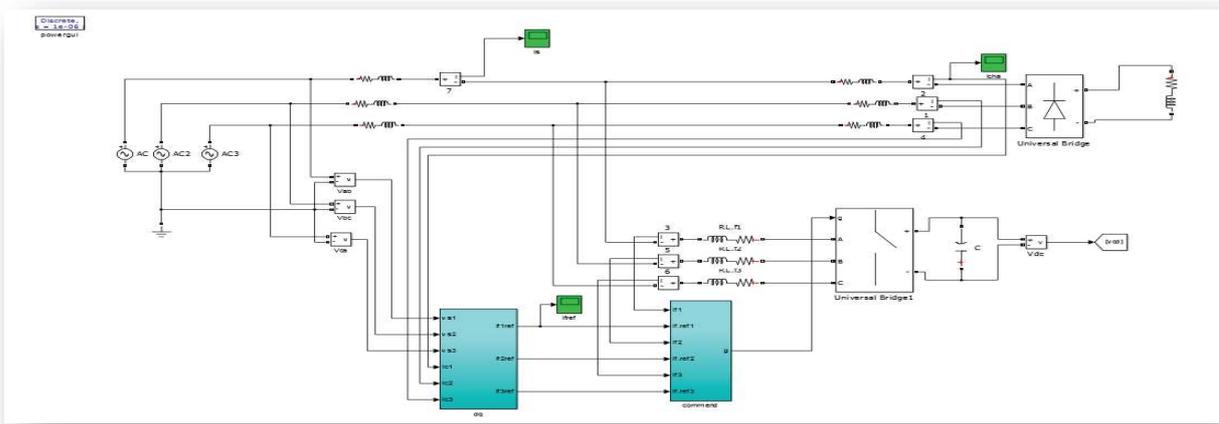


Figure III.8 : Schémas du réseau avec FAP  etudi e.

Les paramètres de simulation sont définis dans le tableau (III.2) :

Tableau III.2 : Paramètres de simulation.

V_{dc} [V]	C_{dc} [μF]	r_f [$m\Omega$]	l_f [μH]
700	6	5	100

Vu que nous travaillant en régime  equilibr e, on se limitera à présenter les résultats de simulation pour une seule phase, on a choisi la phase 1.

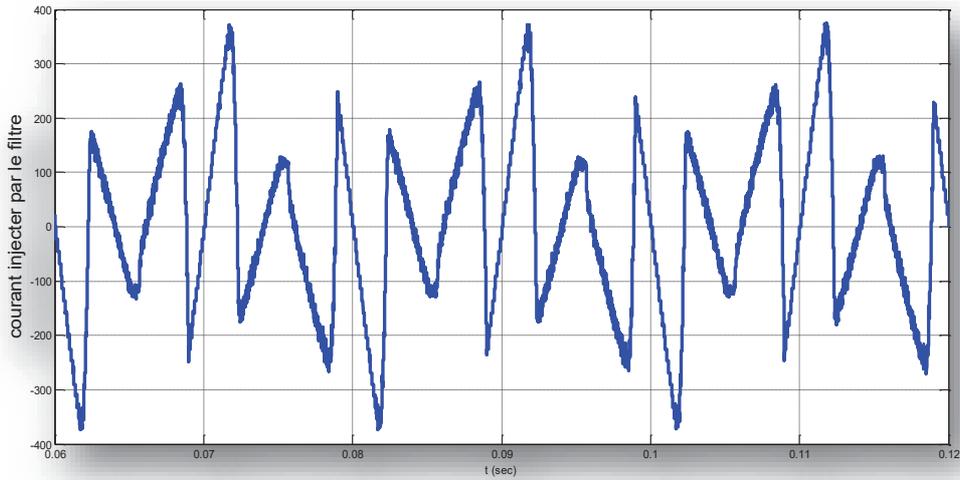
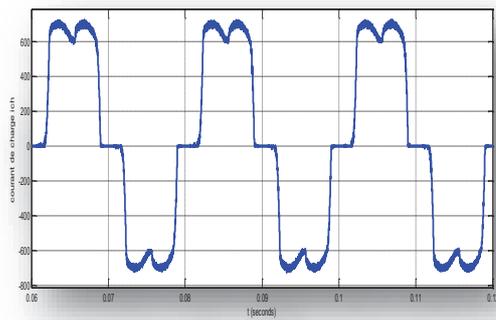
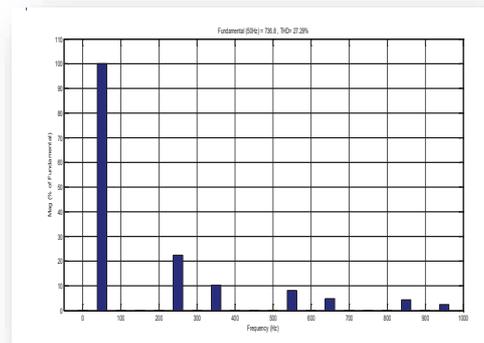


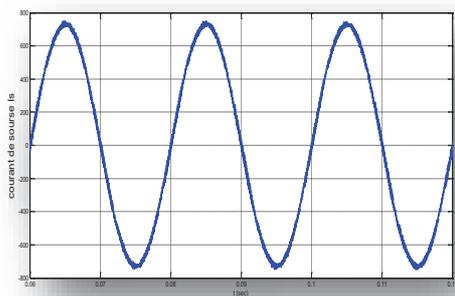
Figure III.9 : Courant injecter par le filtre $i_{fl}=f(t)$.



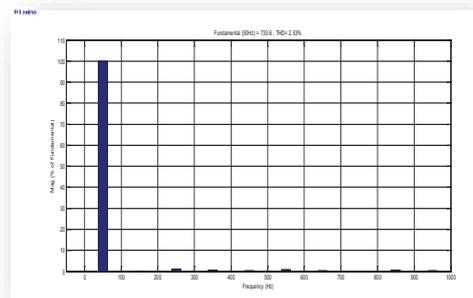
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.10 : Représentation des caractéristiques : (a) courants de charge $i_{ch}=f(t)$ (c) courants de source $i_{s}=f(t)$ (b) et (d) FFT du courant de charge et source THD.

Ce filtre permet une réduction des harmoniques de courant. Le taux de distorsion harmonique pour cette charge la valeur THD est de 27.29 %. Après filtrage, la valeur

du THD est réduite à 2.53 %. Nous remarquons que le but de filtrage actif est démunie la valeur de THD élimine les harmoniques de courant.

III.11.1 Simulation de La MADA pour un système équilibré en présence d'harmonique de tension généré par la source avec une charge linéaire

Model de simulation :

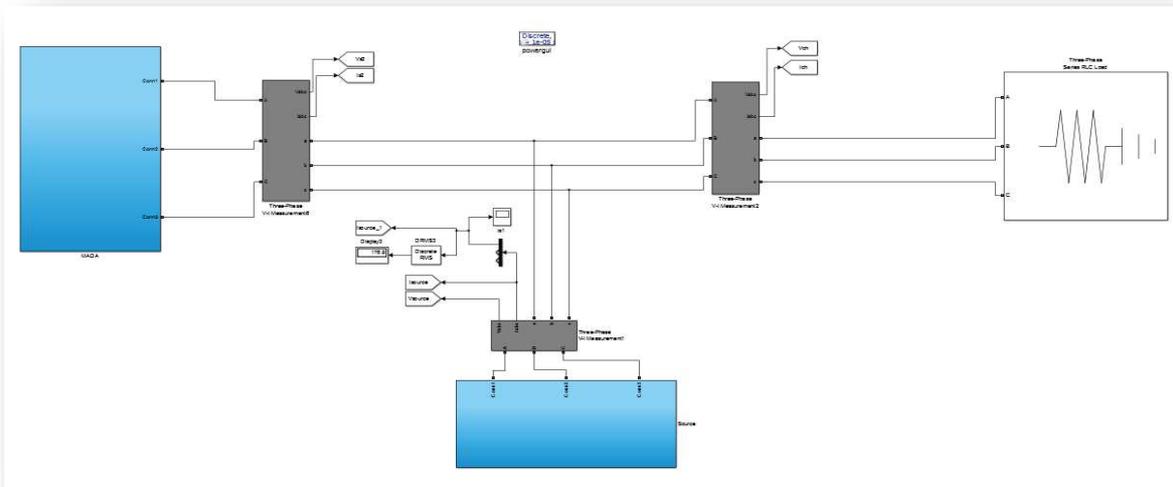


Figure III.11 : Schémas du réseau avec MADA et charge linéaire.

Dans un premier temps, nous nous proposons d'intégrer à notre PLL un filtre multi-variante dans le système étudié. On prend le mode hypo synchrone comme elle montré la figure ci-dessous :

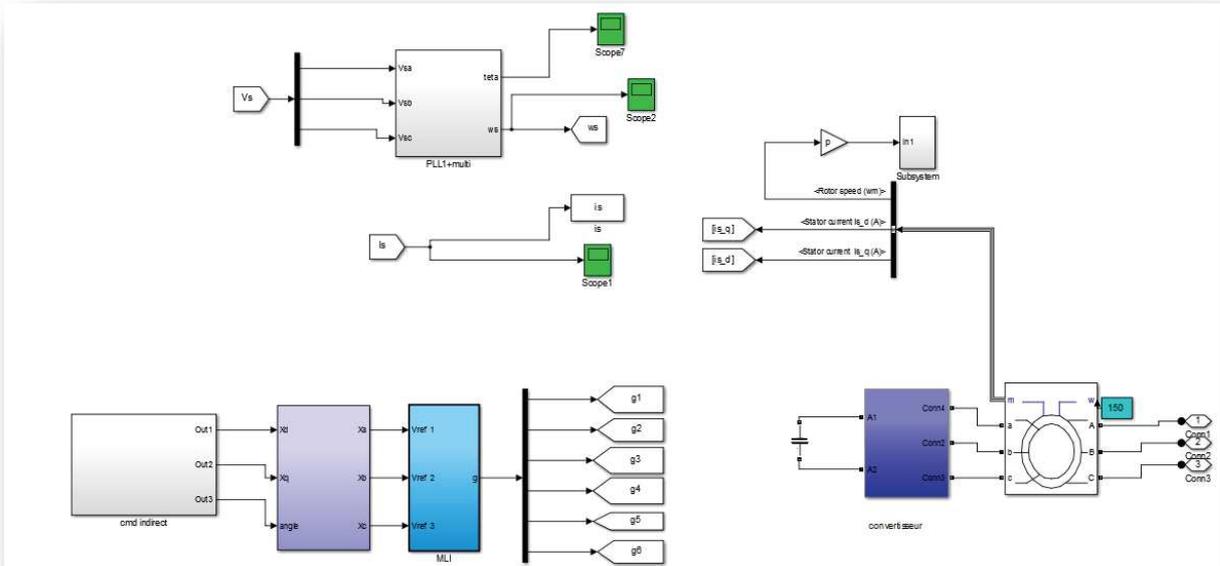


Figure III.12 : Schéma Bloc de la MADA.

- Résultat de simulation :

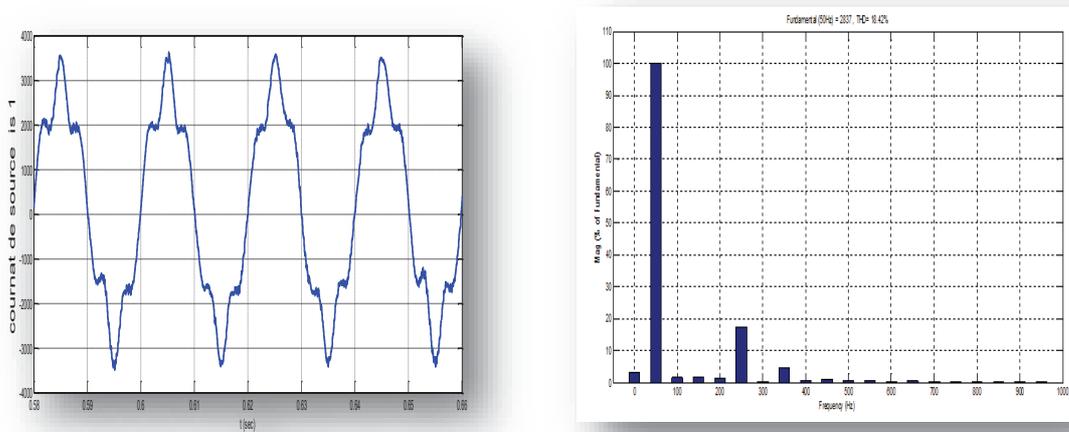


Figure III.13 : Courant de la source (is1) et son FFT.

On remarque que le courant de source à une THD de 18.42%

III.11.2 Simulation de La MADApour un système équilibré en présence d'harmonique de tension généré par la source avec une charge linéaire et un filtre actif parallèle

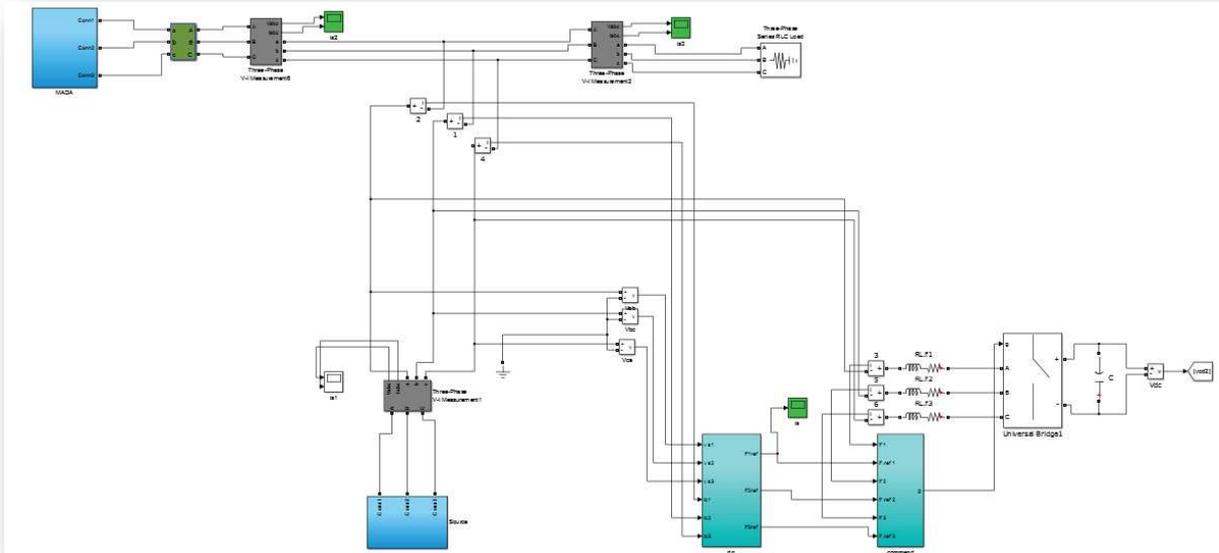


Figure III.14 :Schéma bloc de la MAD avec une charge linéaire et un filtre actif parallèle.

On va ajouter dans notre système un filtre actif parallèle et on a obtenu les résultats suivants :

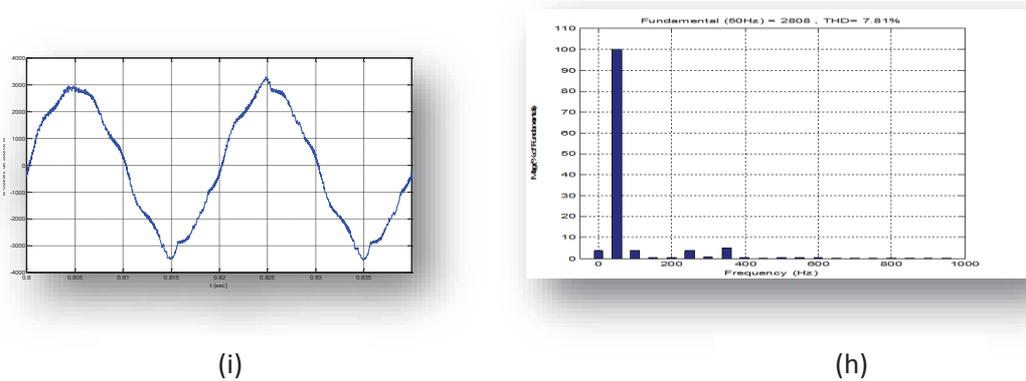


Figure III.15 : Représentation des caractéristiques : (i) courants de source $i_{s1}=f(t)$, (h) THD du courant de source.

Le THD obtenu par la méthode directe appliquant un filtre actif parallèle pour l'extraction des composantes harmoniques est de 7.81%

III.12 Interprétation des résultats

Afin d'évaluer les performances de la méthode d'extraction des courants de références appliqué à notre système dans le cadre de notre régime équilibré, On remarque que les courants triphasé coté source sont quasiment sinusoïdaux, ce qui n'était pas le cas avant l'utilisation du filtre actif de puissance.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés aux caractéristiques de THD de notre courant de source avant et après filtrage et ce pour chacune des phases et le résultat qu'on a obtenu sont conformes aux normes internationales.

III.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la qualité d'énergie, la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté une topologie utilisée le filtre actif parallèle.

Nous avons modélisé et simulé notre système intégrant à la fois la MADA, Charges non linéaires et Filtre actif de puissance parallèle en régime équilibré. Ce qui nous a permis d'obtenir des courants de sources sinusoïdaux.

Conclusion générale

Après avoir présenté une rétrospective sur les systèmes éoliens et leur performances. Notre choix s'est porté sur les machines asynchrone à double alimentation pour mesurer le degré de pollution des courants engendré par ce type d'énergie renouvelable dans le réseau où il est interconnecté, pour qu'on puisse présenter en dernier une solution efficace pour y remédier à savoir l'emploi d'un filtre actif de puissance parallèle.

Après avoir validé le modèle de la MADA à travers une série de simulation où la variation de nos puissances actives et réactive ont été performante à travers un suivi de leurs références respectives. Nous avons intégrés un filtre actif de puissance parallèle qui a permis d'améliorer de façon significative la qualité des courants de sources et ce en comparant les THDs avant et après filtrage.

Comme perspective à ce travail, il serait très intéressant de faire une étude sur :

- La faisabilité d'intégration d'un FAP FAS UPQC on présence de ferme éolienne ou parc PV
- Et l'intégration des filtres multi niveaux a multi port

Synthèse du régulateur PI

La stratégie de commande de la MADA utilise un régulateur proportionnel intégral *PI*. C'est un régulateur simple et rapide à mettre en œuvre et donne un bon compromis complexité performance.

Le régulateur *PI* résulte de la combinaison harmonieuse de deux actions [7]:- une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité de la dynamique du système.- une action intégrale qui permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir. Sa fonction de transfert est $G_s = K_p + \frac{K_i}{s}$

l'on désire asservir. Sa fonction de transfert est $G_s = K_p + \frac{K_i}{s}$

□ □ Boucle des puissances

Le régulateur proportionnel intégral (*PI*), utile pour commander la MADA génératrice est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables c'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien. La Figure A.1 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur *PI* dont la fonction de transfert est de la forme $K_p + \frac{K_i}{s}$, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la *Figure. II.6*

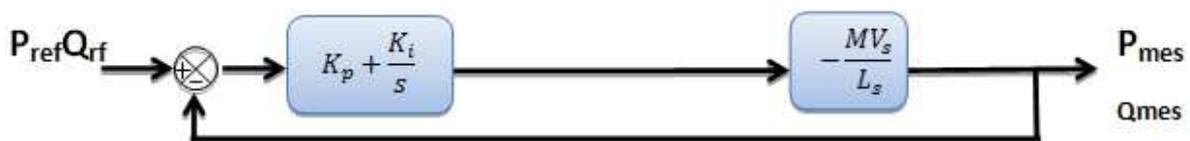


Figure A.1 Schéma de la régulation des puissances rotorique.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de notre système est présentée par les expressions suivantes :

$$FTBO = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot \frac{-MV_s}{L_s} \quad A.1$$

Concernant la fonction de transfert en boucle fermée il est donné par l'expression :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{(K_p s + K_i) \frac{-MV_s}{L_s}}{s + (K_p s + K_i) \frac{-MV_s}{L_s}} \quad A.2$$

De cette FTBF nous obtenons

$$K_p = 0 \quad A.3$$

et

$$K_i = \frac{3}{\frac{-MV_s}{L_s} T_r} \quad A.4$$

Boucle des courants

Si on considère l'hypothèse d'un couplage entre l'axe direct et l'axe en quadrature négligeable pour la commande directe, et parfaitement compensé pour les commande sin directes en boucle ouvert et en boucle fermé, ainsi que tous les termes de perturbation compensés on obtient le système corrigé de la figure ci-dessous.

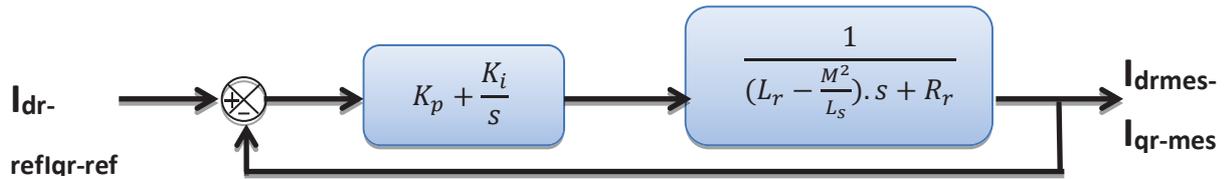


Figure A.2 :Schéma de la régulation des courants rotorique.

En effectuant le calcul des gains des régulateurs suivant la méthode détaillée au début de cette annexe, on trouve les valeurs numériques, affinées pour obtenir les meilleures performances, suivantes :

Tableau A.1 :Gainsdes régulateurs utilisés

METHODE	Commande indirect BF	
	courants	Puissances
kp	0.3438	0.5151
ki	0.171	20.5177

PARAMETRES DE la MADA

La machine utilisée est une machine asynchrone à double alimentation d'une puissance de 1.5MW dont les paramètres sont donnés sur le tableau suivant :

Tableau B.1 : Paramètres de MADA

Nom	Valeur Numérique	unité
Puissance nominale P_n	1.5	MW
Tension nominale V_s	690	V
Fréquence nominale statorique f_n	50	HZ
Résistance statorique R_s	0.012	Ω
Résistance rotorique R_r	0.021	Ω
Inductance statorique L_s	2.0372e-4	H
Résistance rotorique L_r	1.7507e-4	H
Inductance magnétisante M	0.0135	H
Nombre de paires de pôles P	2	---
Inertie totale J	1000	Kg.m^2

Références Bibliographiques

- [1] Frederic Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes, 2003.
- [2] Haritza Camblong , «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [3] Arthouros Zervos, sven teske , «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006 .
- [4] Toual Belkacem « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice ».
- [5] J-C. Sabonnadière, « Nouvelles technologie de l'énergie 1 », Lavoisier,2003.
- [6] F. Poitiers, « Etude d'un système éolien basé sur une machine asynchrone a double alimentation », sixième conférence des jeunes chercheurs en génie électrique JCGE'03, Saint- Nazaire, juin 2003.
- [7] F. Akel, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne ». Mémoire de magister, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger 2009.
- [8] Kleber f. Da silva, m.a. saidel « Digital control and integration of a 192MW wind farm with doubly fed induction generator into the Brazilian power system », Electric Power Systems Research (2010) .
- [9] Omar Bouhali, « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordementd'origine éolienne sur un réseau électrique », Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2008.
- [10] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation del'énergie éolienne”, Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 2003.
- [11] A. Mirecki, “Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance”, Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, 2005.

- [12] Site de constructeur Danois, <http://www.wind power .dk/>.
- [13] M. Liserre, r. Cárdenas, m. Molinas, j. Rodríguez, "Overview of Multi-MW Wind Turbines and Wind Parks," IEEE Transaction on Industrial Electronics, April 2011.
- [14] Tarak Ghennam « supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » docteur, école militaire polytechnique d'Alger, école centrale de Lille, 2011.
- [15] Djafer Mohamed, «Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme Aérogénérateur»,2013.
- [16] Danic Toffessi Yapta - simulation et expérimentation -commande vectorielle à flux rotorique orienté de la machine asynchrone université Henri Poincaré Nancy 1 – 2010.
- [17] Becker Florent-`Emulation d'une chaîne éolienne de conversion d'énergie` - Université Henri Poincaré, Nancy I- 2011.
- [18] El Kabira El Majabber- modalisation et commande de la MADA pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne-université de sidi Mohammed ben abdallah
- [19] R. Abdessemed, m. kadjouj ; "modélisation des machines électriques", presses de l'université de Batna, Algérie, 1997.
- [20] Pascal Krafczyk. modalisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne _a base de la mada. autre. 2013.
- [21] Thomas Ackermann « Wind Power in Power Systems » John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- [22] Mr : rouabhi Riyad" étude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation" application : énergie éolienne- université Ferhat Abbas -Sétif 2012.
- [23] Djeriri Yousef -Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes-"Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle".- Doctorat en Sciences.
- [24] Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne"-Université d'EL-

Oued-2015.

- [25] Bennour Cherif- "Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation-"2015.
- [26] Djellouliabdellah -Etude comparative de l'effet de deux régulateurs PI et IP employés pour la commande directe d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode continu—2012.
- [27] T. Ghennam, E.M. Berkouk, B.Francois, "Modeling and Control of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Based Wind Conversion System" IEEE transaction, 2009.
- [28] B. Kelkoul « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation » API option automatique. Université, Tlemcen, 2011.
- [29] Bennour Cherif -``Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation`` - Université Mohamed Khider – Biskra-2012.
- [30] A. Melloul-``Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. `` - Universit Ferhat Abbas_ Setif.
- [31] Kamel Djazia. Etude Des Filtrés Actifs Pour Réseaux Déséquilibrés Et Distordus- These De Doctorat- Université Ferhat Abbas – Sétif 1
- [32] Etude Et Simulation D'un Filtre Actif Parallel A Quatre Fils-Master- Université Echahid Hama Lakhder D'el-Oued-2015.
- [33] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, "Statistical analysis of voltage dips", notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [34] Omeiri. Amar. "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [35] Nekkar Djamel. "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés "Mémoire de magister .Université de Souk-Ahras 2013_2014.
- [36] Michel Crappe : « Commande et régulation des réseaux électriques » Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [37] Philippe Sarrand et Jean Verseille : « Compensation de l'énergie réactive et

- tenue de tension dans les réseaux publics », Technique de l'ingénieur, D 4305, pp-1-10.
- [38] L. Benasla : « Compensation statique : Approche shunt et Approche série », mémoire demagister, Département d'électrotechnique, USTO, juillet 1999.
- [39] Ghadbane Ismail. Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle en utilisant Différentes Stratégies De Contrôle- Doctorat- Université Mohamed Khider – Biskra 2016
- [40] Chelli Zoubir- Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique_ Badji Mokhtar University-Annaba].
- [41] Bollen, Math HJ et Zhang, L. D. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. Electric power Systems research, 2003.
- [42] M.C. Benhabib 'Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande'- l'Université Henri Poincaré, Nancy-I-2004.
- [43] A. Boukadoum 'Contribution à l'étude des stratégies d'identification harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques'-2015.
- [44] XU.Jianhong 'filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux et distribution d'électricité '-l'institut national polytechnique de lorraine - 1994.
- [45] Belhaouchet Nouri, Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées, 2011).

Résumé :

Ce mémoire de fin d'étude traite la modélisation, la commande et la simulation d'un système de génération d'énergie électrique par une éolienne.

L'objectif principal de ce mémoire étant d'analyser les différentes commandes d'une éolienne basées sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Un filtre actif de puissance parallèle est proposé comme solution pour la compensation des perturbations courants générés à la fois par l'éolienne et la charge non linéaire.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la compensation des courants harmoniques générés par la charge et la MADA.

Mots clés : énergie éolienne, éolienne, MADA , FAP.

Abstract :

Our work deals with the modeling, control and simulation of a system for the generation of electrical energy by a wind turbine. The main objective in this thesis is to analyze different control of a wind turbine based on doubly fed induction generator (DFIG). A parallel active power filter is proposed as a solution for the harmonic current compensation generated by this type of wind turbine. The simulation results will show the validity of our wind turbine based on DFIG and the efficiency of the current harmonic compensation generated by this wind turbine.

Keywords: Wind energy , wind turbine, DFIG, Shunt Active Power filter.

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذه المذكرة هو تطبيق طريقتين للتحكم بمولد الاتزامني مزدوج التغذية MADA، اقترحنا مرشح موازي فعال كحل لتعويض الاضطرابات من نوع التيار الناتجة عن الحمولات الغير الخطية، نتائج المحاكات اوضحت فعالية استعمال المرشح مجاورا للمنبع لتعويض جميع الاضطرابات الناجمة عن مولد الاتزامني مزدوج التغذية و الحمولات الغير الخطية .

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح، توربينات الرياح ، مولد الاتزامني مزدوج التغذية ، الحمولات الاخطية المرشح الفعال.