الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Département du Génie Électrique
Et de l'Informatique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : *commande et électronique industrielle*
Réseau éléctrique

THEME

Amélioration de la qualité d'énergie à l'aide d'un filtre actif appliqué dans une chaine de production éolienne connecté au réseau électrique

Proposé et dirigé par

Dr .MADJBER Ahmed
Dr. MORSLI Abdelkader

Préparé et présenté
Par
NOUAR Hadda

SABOUR Kaouthar

2015-2016

Remerciements

***E**n Premier lieu, Je remercie **ALLAH,** le Tout Puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.*

***J**e remercie infiniment Docteur : **MADJBER ahmed** et **MORSLI abdelkader** qui avoir assuré la co-direction de ce mémoire, pour ces conseils précieux le long de mon travail de mémoire. Je ne saurais trop le remercier pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et pour les longues heures de discussion qu'il m'a réservé avec une patience inégale. Et tous les enseignants du département Electrique.*

***J**e remercie également tous les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail. Je suis certaine de pouvoir compter sur leurs vastes connaissances et leur esprit critique constructif pour m'aider, par leurs commentaires et leurs discussions, à mieux comprendre certains problèmes rencontrés au cours de ce travail de recherche.*

***I**l est difficile, dans un petit espace, de remercier toutes les personnes qui ont eu une influence sur ma vie de tous les jours pendant la durée de réalisation de mon mémoire de fin d'études. Ces personnes se reconnaitront facilement et sauront combien ma tendresse et mon amitié sont grandes pour eux.*

***C**e travail n'aurait jamais pu se réaliser sans le soutien continu de ma famille et sans leur éducation basée sur des valeurs morales fondées sur le respect des autres et du travail.*



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère m4ère et mon père.

Mes frères et sœurs.

Toute la famille SABOUR

Tous mes amis.

Et tous ceux qui me sont chers.



kaouthar



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère m4ère et mon père.

Mes frères et sœurs.

Toute la famille NOUAR

Tous mes amis.

Et tous ceux qui me sont chers.



Hadda

ملخص:

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

الكلمات المفتاحية:مولد غير متزامن مزدوج التغذية (م,غ,م,ت)التوافقيات,المرشح الكهربائي.

Résumé :

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

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

Abstract:

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

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

Table de matière

CHAPITRE I : Généralité sur les systèmes éoliens

I.1.Introduction……6

I.2Historique……..……..6

I.3. Définition……....7

I.4.Principaux composants d'une éolienne……..…….....8

I.5.Les différents types d'éolienne……10

I.5.1 Les éoliennes à axe vertical……....…...10

I.5.2.Les éoliennes à axe horizontal……...……..…..…11

I.6.Zones de fonctionnement de l'éolienne……...……11

I.7. Applications des éoliennes……...……13

I.8.Production optimale de l'énergie……...…….……14

I.8.1.Fonctionnement à vitesse variable……...…….…14

I.8.2. Fonctionnement avitesse fixe……...…….……...15

I.9. Systèmes utilisant la machine synchrone ……...……..15

I.9.1. Machine asynchrone a cage d'écureuil……...……16

I.9.2. Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné ……..…16

I.10.Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique……..19

I.10.1. Modèle de la turbine éolienne…….....19

I.10.1.1. Loide betz……...…….……19

I.10.1.2. Production d'énergie mécanique……21

I.10.1.3. modelé de multiplicateur…….....23

I.10.1.4. modelé de l'arbre……..25

I.10.1.5. Classement des types d'éoliennes en fonction du coefficient de puissance.…25

I.11.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne……26

I.11.1 Avantages……...……...26

I.11.2.Inconvénients……...…….……27

I.12.Dispositifs de stockage de l'énergie éolienne ……...……27

I.13.Conclusion…….....28

Chapitre II: Modélisation et commande d'un système de conversion éolienne

II.1. Introduction……30

II.2. Structure de la machine ……30

II.3. Principe de fonctionnement de la MADA ……..…31

II.4. Modélisation d'une chaine de conversion éolienne……..…32

II. 4. 1. Modélisation d'une chaine conversion éolienne coté machine……..…33

II.4.1.1. Modèle de la machine asynchrone à double alimentations (MADA) ……..…33

II.4.1.2. Modelé de la MADA dans le repère PARK……...…36

II.4.1.3. Principe de la commande vectorielle de la MADA……41

II.4.1.4. Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux……..…43

II.4.1.5. Modélisation du redresseur……48

II. 4.1.6. Simulation et interprétation des résultats……....49

II.4. 2 Modélisation d'une chaine de conversion éolienne côté réseaux……50

II.4.2.1. Modèle Contrôle des courants transitant dans le filtre RL……..51

II.4.2.2Modèle du bus continu…….....53

II.4.2.3 Simulation et interprétation des résultats…….....54

II.5. conclusion…….....56

CHAPITRE III : Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électriques et solution

III.1.Introduction…….....58

III.2. Paramètres de la qualité de l'énergie électrique……58

III.2.1.Creux et coupures de tension…….....59

III.2.2. Fluctuations de tension…….....59

III.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension……...60

III.2 .4. Variation de fréquence…….....60

III.2.5. Harmoniques et interharmoniques…….....61

III.3. Origines des harmoniques…….....62

III.4. Grandeurs caractéristiques…….....62

III.4.3. Série de Fourier…….....62

III.4.4. Valeur efficace d'une grandeur alternative……62

III.4.5. Taux de distorsion harmoniques…….....63

III.4.6. Charges linéaires et non linéaires…….....63

III.5. Conséquences des harmoniques…….....64

III.5.1. Effets instantanés …….....64

III.5.2. Effets à terme…….....64

III.6. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP……65

III.7. Normes standards …….....66
III.8. Solutions pour la dépollution harmonique…….....77
III.8.1. Filtrage passif …….....77
III.8.2.Filtrage actif …….....78
III.8.2.1.Filtres actif parallèle AP) …….....78
III.8.2.2. Filtre actif série (FAS) …….....79
III.8.2.3. Filtrage à structure hybride…….....79
III.8.2.4. Filtre universel …….....80
III.9. Principe de filtrage actif parallèle…….....80
II.10. Topologie générale……...……82
III.10.1. Etude de la partie contrôle commande…….....82
III.10.1.1. La méthode d'identification des courants perturbés……..…83
III.11 Conclusion……...……84

Chapitre IV : Etude et analyse d'un système éolien connecter au réseau avec filtrage

IV.1. Introduction……...……..……85
IV.2. Les résultat de la chaine éolienne……...……85
VI.2.1 Simulation de la PLL avec MATLAB-Simulink……..…...……86
IV.2. 2. Régulateur PI……...…….……86
IV.2.3 Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse...….87
IV.2.4. Simulation et interprétation des résultats……90
IV.2.5. Résultats de simulation du système éolien et sa charge non linéaire…….94
IV.3. Les résultats de simulation avec le filtre actif……..…..…….96
IV.4. Conclusion……...……100

Liste des figures

Figure I.1. Répartition des sources primaires d'énergie dans lemonde……..…7
Figure I.2. Etapes de construire l'électricité……..….8
Figure I.3. Conversion de l'énergie cinétique du vent conversion de l'énergie cinétique du vent…….…….…….……..……9
Figure I.4. Les différentes composantes d'une éolienne…….……10
Figure I.5. Schéma type d'une architecture de nacelle…….……11
Figure. I.6. Pales de 39 m sur une NORDEX N80 (2.5MW) ……..11
Figure I.7. Eolienne à axe vertical…….……..…….12
Figure I.8. Les deux types à axe verticale Savonius et Darrieus. ……...……12
Figure I.9. Les éoliennes à axe horizontal……...….13
Figure I.10. Turbine éolienne en amont et en aval……..……14
Figure I.11. Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent……..……...…14
Figure I.12. Principales composants de l'éolienne à axe horizontal…….16
Figure I.13. Etapes de construire l'électricité……..….17
Figure I.14. Eolienne à vitesse fixe…….…….……17
Figure I.15. Eolienne à vitesse variable……...……18
Figure I.16. Système éolien à base d'une machine synchrone et unconvertisseur électronique…….…….……19
Figure I.17. Machine asynchrone avec liaison directe au réseau…….20
Figure I.18. Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur-onduleur…….…….…….……21
Figure I.19. Machine asynchrone à rotor bobiné…….……21
Figure I.20. Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI. ……...….21
Figure I.21. La partie mécanique de la turbine éolienne. ……...……22
Figure I.22. Principe de la théorie de Betz……...….23
Figure I.23. Coefficient de puissance et vitesse spécifique…….……23
Figure I.24.Courbe de coefficient Cp (β, λ) …….24
Figure I.2. Modèle mécanique de la turbine éolienne. …….25

Figure I.26. Schéma bloc du modèle de la turbine……..…….25

Figure. I.27. Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines ……..……..……..….30

Figure II.1. MADA connectée à deux réseaux triphasés…….……35

Figure II.2. Différentes configurations de fonctionnement de la MADA……36

Figure. II.3. Chaine de conversion éolienne. ……..…….37

Figure II.4. Chaine de conversion éolienne cotée machine…….……37

Figure II.5. Repère référentiel de Park……..……...….40

Figure II.6. Schéma bloc de la MADA à réguler…….……45

Figure II.7. Schéma bloc de la commande de puissance directe……..….46

Figure II.8. Schéma bloc de la commande de puissance indirecte……..…….47

Figure II.9. Onduleur de tension à deux niveaux. ……...….48

Figure II. 10. Schéma de principe de la technique tringulo-sinusoïdale……..…….58

Figure II.11. Principe de la MLI sinus triangle et la tension simple de l'ondule….……49

Figure II.12. Spectre de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo–sinusoïdale à deux porteuses bipolaires (m=12, r=0.8) ……..….49

Figure II. 13. Les tensions de l'onduleur à deux niveaux…….52

Figure II.14. Tensions simples de l'onduleur……..….49

Figure II.15. Schéma du redresseur triphasé à diodes…….50

Figure II.16. (a). Puissance active (watt), (b) puissance réactive (VAR) de la MADA coté Machine. ……..……..……..……...……50

Figure. II.17. Les courants rotoriques de la MADA…….51

Figure II.18. (a) les courant rotorique (b) les courants rotorique avec zoom courant rotorique……..……..…….51.

Figure II.19. Connexion du CCR au réseau électrique. ……..……..……52

Figure II.20. Filtre RL le repère dq……..……..…….53

Figure II.21. Modèle de bus continu……..……...…….54

Figure II.22. Courant d'un filtre coté réseau……..……..54

Figure II.23. Tension de filtre (V) ……...….55

Figure II.24. Tension de bus continu en fonction de référence……..…….59

Figure III.1. Creux et coupure de tension……....…….59

Figure III.2. Fluctuation de tension…….……60

Figure III.3. Déséquilibre du système triphasé de tension……...……61

Figure III.4. Variation de fréquence…….……...…….……65

Figure III.5. Les perturbations électriques…….……...…….……65

Figure III.6. Diagramme de Fresnel des puissances…….……71

Figure III.7. (a) Filtre passif résonant(b) Filtre passif amorti……..…….……71

Figure III.8. Schéma de principe du filtrage actif parallèle…….……72

Figure III.9. Schéma de principe du filtrage actif série…….…...……73

Figure III.10. Filtre active série et filtre passif parallèle. …….…...……73

Figure III.11. Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle……...……74

Figure III.12. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle…….…..……75

Figure III.13. Combinaison parallèle-série des filtres actifs…….……76

Figure III.14. Principe du filtre actif parallèle…….……77

Figure III.15. Courant de source ,de charge et de filtre……77

Fig. III.16. Structure générale du filtre actif parallèle……..**78**

Figure III.17. Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes alternatives de p et q……79

Figure III.18. Circuit de puissance du filtre actif parallèle à deux niveaux propose……79

Figure III.19. Algorithme ″P_Q″ d'extraction des courants harmoniques…….……79

Figure III.20. Alimentation direct dans une charge non linéaire sans filtre **actif**…….……80

Figure III.21. Allure de isa avant filtrage **actif**……80

Figure.III.22. Spectre harmonique de isa. ……80

Figure III.23. Courant de i_{sa} déphasé de la tension V_{sa}……81

Figure III.24. Modèle du filtre actif parallèle à deux niveaux établi sous Matlab –Simulin1 ……81

Figure III.25. Allure de isa après filtrage actif deux niveaux……...…82

Figure III.26. Spectre harmonique dei_{sa}. ……82

Figure III.27. Allure de isa et vsa après filtrage actif. ……...……83

Figure III.28. Courant généré par le filtre actif i_{fa} et sa référence i_{fa}^{*}……...……83

Figure III.29. Courant de source i_{sa} ,de charge non-linéaire i_{ca} et celui du filtre actif i_{ha}.....84

Figure IV.1. Schéma du système avec filtre actif parallèle……..85

Figure IV.2. Architecture de commande du système éolien. ……..……86

Figure IV.3. Schéma block Simulink de la de la PLL……..…86

Figure. IV.4. Caractéristique la position (rad) ……..……...87

Figure IV.5. Schéma de régulation par PI……..……...87

Figure IV.6. Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de Vitesse……..……..……..……90

Figure IV.7. Puissance mécanique de l'éolienne……..……90

Figure IV.8. Vitesse du vent de la MADA et la vitesse mécanique……..……91

Figure IV.9. Tension et courant rotorique de la MADA……..……..……91

Figure IV.10. Puissance active et réactive de la MADA……92

Figure IV.11. Courant rotorique de la MADA……..……92

Figure IV.12. Puissance active et reactive de filtre……..……93

Figure IV.13. Courant rotorique et statorique de filtre……..……...……94

Figure IV.14. Tension bus continus……..……..……94

Figure VI. **15.** Le système éolien connecte au réseau sans filtre actif ….……95

Figure VI. **16.** *Courant de charge N_L* ……...……..……...…..95

Figure VI.17. Courant de la source avant le filtrage ……....96

Figure VI.18. Spectre harmonique du courant de la source ……..…..……..……96

Figure VI.19. Le système éolien avec le filtre actif……..…..……..97

Figure VI.20. Courant rotorique et statorique en fonction du temps……97

Figure VI.21. Puissance active et puissance réactive rotorique en fonction du temps……..98

Figure VI.22. Puissance active et réactive statorique……..…..……..…...…98

Figure IV.23. Puissance réactive et active injectée au réseau (VAR) ……....…...99

Figure VI .24. La courbe du courant injecte au réseau (A) ……..…..……..…....…99

Figure IV.25. Spectre harmonique du courant de la source ……..…..…….....100

Liste des Tableaux

TAB. III.1. Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)……..67

Introduction générale

Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins planétaires en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

Par ailleurs, des récentes estimations ont montré qu'actuellement prés de 2.2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordé aux grands réseaux d'électricité [99](ce qui représente environ 44% de la population mondiale), pour la plus part située dans les pays du tiers monde dont l'Algérie, ou plus de 50% vivent encore sans électricité, 95% d'entre eux vivent dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, de la présence des régions rudes et d'une faible densité de population.

Le secteur de la génération électrique est le premier consommateur d'énergie primaire et les deux tiers de ses sources sont des carburants fossiles. Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables. Actuellement ,les énergies renouvelables n'entrent qu'à hauteur de 20% environ dans la production mondiale d'électricité. Bien qu'énergie finale propre par excellence. C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité [1].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique), en particulier l'énergie éolienne qui représente une solution importante et pourrait mitiger beaucoup de problèmes grâce essentiellement à ses impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde. Ainsi, la production d'électricité par des sources d'énergies renouvelables offre une grande sûreté d'approvisionnement des

consommateurs tout en respectant l'environnement. Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions de vent. Le système éolien est contrôlé de manière à maximiser la puissance produite en recherchant en permanence le point de fonctionnement à maximum de puissance.

Aujourd'hui, parmi les sources de génération renouvelables, notamment l'éolien, sont les énergies dont le taux de croissance est le plus élevé. Leur développement au niveau résidentiel et industriel est considérable [1].

L'utilisation de l'énergie éolienne comme énergie électrique a commencé en 1925, lorsque des parcs éoliens reliés à des génératrices à courant continu ont été utilisés comme chargeur de batterie dans les terres agricoles des États-Unis. En 1939 les générateurs synchrones sont mis en exploitation et ont diminué l'utilisation des générateurs à courant continu à vitesse fixe[2].

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduireà l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire même la destruction totale de tous ces équipements [3].

L'insertion de plus en plus croissante des éoliennes a conduit les chercheurs en « Génie Electrique » à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien puis le filtrage parallèle à la présence de ce dernier. L'objectif principal de ce travail est de faire l'analyse et le filtrage d'un réseau électrique avec une production éolienne [4].

Le premier chapitre est consacré à des notions théoriques sur l'énergie éolienne. Les différents types et les zones de fonctionnement de l'éolienne, les applications des éoliennes

et la production optimale de l'énergie suivi par la conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique aussi les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs associés, sont décrits. Les différentes formes de stockage d'énergie y seront aussi présentées pour envisager des solutions d'association avec l'éolienne.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de Machines Asynchrones A Double Alimentation (MADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions du vent. Pour atteindre ces objectifs.

Le deuxième chapitre est composé de deux sections :

La première section est la modélisation d'une chaine conversion éolienne coté machine, nous rappelons une stratégie de contrôle vectoriel directe et indirect par orientation du flux statorique est étudiée. Aussi les deux stratégies de la commande MLI « triangulo-sinusoïdale et vectorielle », les résultats de simulation. La deuxième section débute par une la modélisation et la commande d'une chaine conversion éolienne coté réseaux, le Modèle Contrôle des courants transitant dans le filtre RL et bien le modèle de bus continue et les résultats de Simulation.

Dans le troisième chapitre, on discutera le problème des perturbations harmoniques. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées. Des solutions seront proposées pour la dépollution harmonique et le principe filtrage actif parallèle, nous étudierons la méthode d'identification des courants harmoniques d'une charge polluante. Ce dernier est une solution originale afin d'éliminer les harmoniques de courant et ainsi limiter leur propagation dans le réseau.

Le dernier chapitre est consacré l'étude et analyse d'un système éolien connecter au réseau avec filtrage et les résultats de simulation.

CHAPITRE I :

Généralité sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Cette dernière sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones [5]. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2. Historique

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. La première utilisation de l'énergie éolienne, et sans doute la plus simple, a été la propulsion des bateaux à voiles. Cette énergie aidait le bateau à avancer et remplaçait l'énergie des galériens.

En moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Ce type d'éoliennes va se répandre dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades.

Au 16èmesiècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois. En 1891, le danois Poule La Cour inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité. Aux débuts du 20ème siècle, a été marquée par la conception de la première éolienne à axe verticale, même si la puissance générée restait assez faible. Il faut attendre jusqu'à 1957 pour que la puissance atteigne les 200kW par le constructeur Danois Gedser. Mais ce n'est qu'après le premier choc pétrolier en 1973, quand les pays exportateurs de pétrole ont diminué leurs exportations que de nombreux pays se sont lancés dans le marché éolien.

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [6].

I.3. Définition

Tirant son nom d'Éol (en grec 'Aiolos') le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique, Un système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.

Cette conversion se fait en deux étapes [8, 9] :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. L'ensemble de la chaine de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [10].

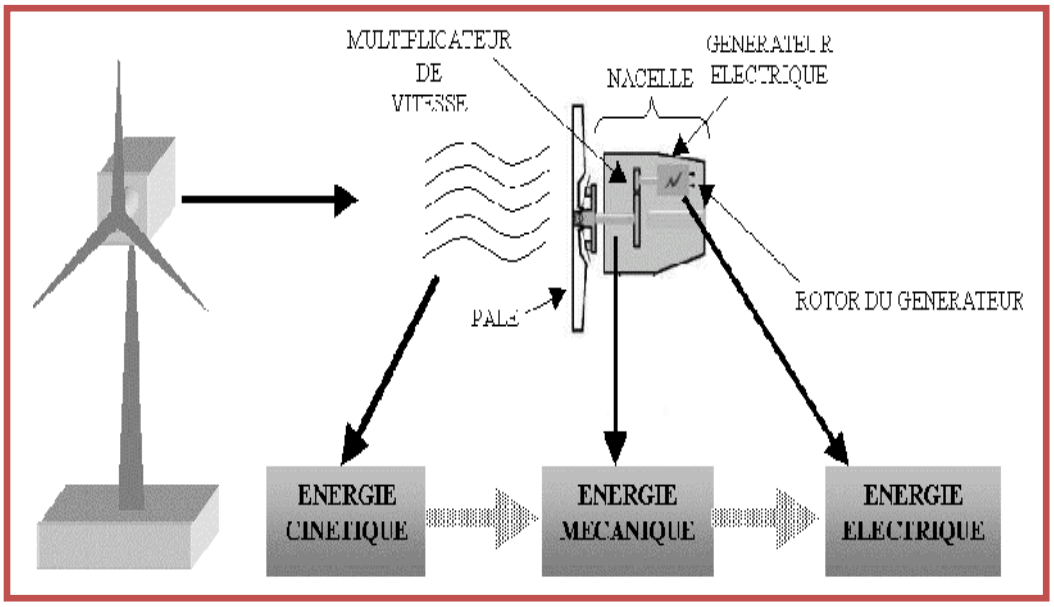


Figure I.1. *Etapes de construire l'électricité*

I.3.1. Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux présents sur la figure I.2 [11].

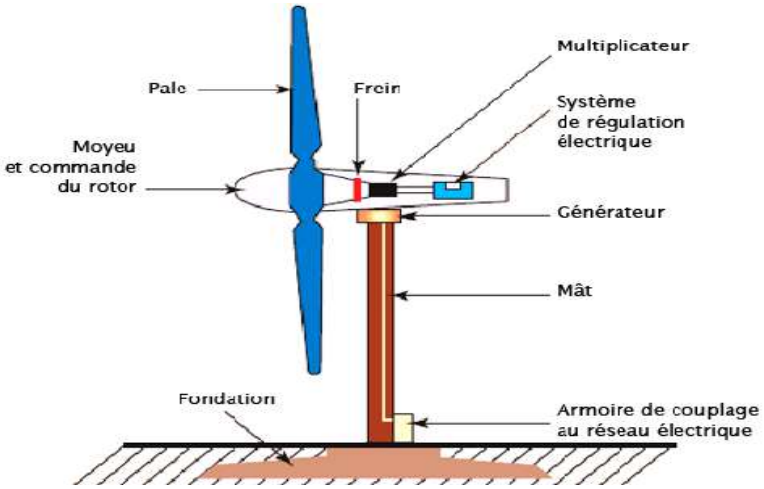


Figure I.2. *Les différentes composantes d'une éolienne*

- Fondations : Pour les éoliennes terrestres, la fondation est une assise en béton sur laquelle est fixé l'ensemble de la structure devant être capable de résister aux tempêtes et aux vents extrêmes (environ 500 tonnes de béton pour les fondations d'une éolienne de 3 MW).
- Mât ou tour : Le mât est plus ou moins imposant selon la puissance de l'éolienne, permettant ainsi de remonter l'hélice dans une zone de vent plus fort et plus régulier que près du sol. La hauteur varie entre 65 et 80 mètres, certaines tours pouvant dépasser 100 mètres. Généralement le mât est fabriqué à partir de tubes d'acier coniques. Le diamètre de la base d'une tour est de 5 mètres et diminue progressivement pour atteindre environ 3 mètres au sommet. Ainsi les tours comportent 3ou 4 sections .Certains constructeurs d'éoliennes utilisent des mâts en béton précontraint. Le mât peut également contenir une partie des composants électriques et électroniques, en association avec la nacelle.
- Rotor : Le rotor est composé d'une hélice et d'un moyeu. L'hélice est généralement composée de trois pales qui sont placées devant la nacelle et reliées par l'intermédiaire du moyeu. Ces éléments constituent le nez de l'éolienne.
- Nacelle : La nacelle est l'habitacle situé au sommet du mât. Elle est composée d'un châssis, d'un multiplicateur et d'une génératrice. Elle contient toute la machinerie transformant la rotation lente des pales en électricité. Cette machinerie permet de superviser

l'éolienne : diriger les pales en fonction de la force du vent, arrêter l'éolienne. Pour les grandes puissances, la nacelle ressemble à un container de transport maritime ou routier.

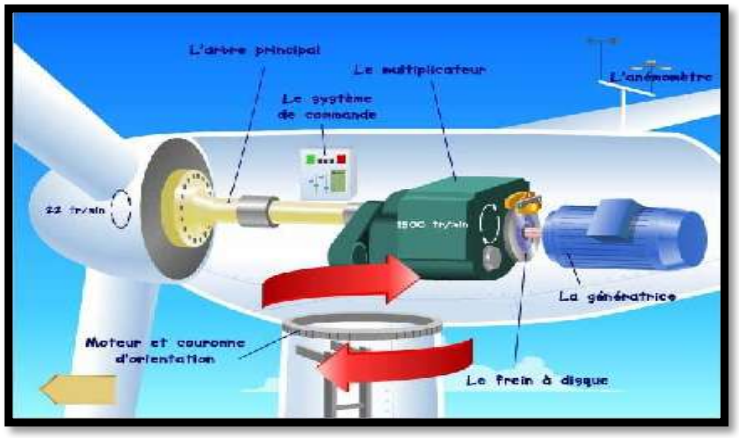


Figure I.3. *Schéma type d'une architecture de nacelle*

- Les pales **:** Les pales sont une partie très important des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales [12]:

a. La longueur.
b. La largeur.
c. Le profil.
d. Le matériau.
e. Le nombre.

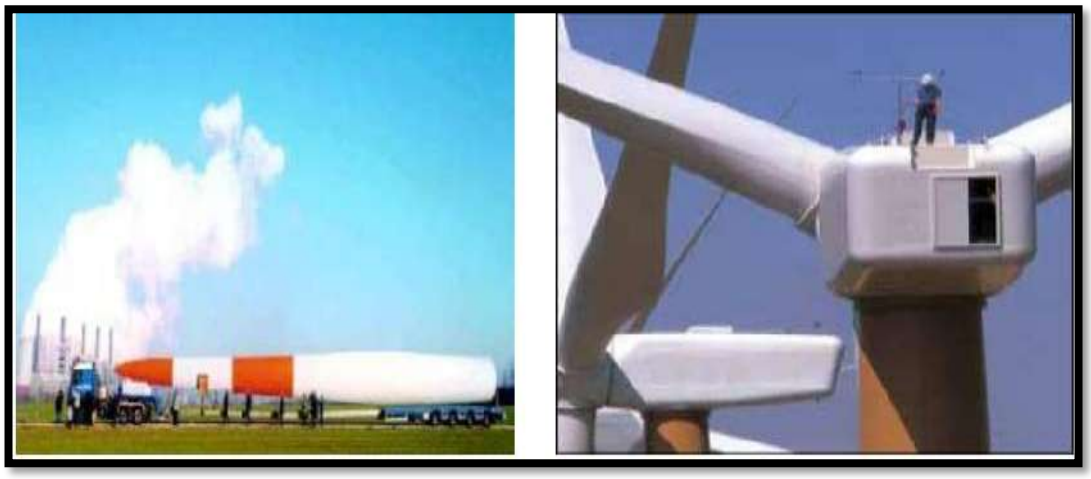


Figure. I.4. *Pales de 39 m sur une NORDEX N80 (2.5MW)*

I.4. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.4.1. Les éoliennes à axe vertical

Elles sont les moins utilisées, à cause de leur manque de performances par rapport à la précédente. L'axe de rotation de ce type est verticale par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur est disposé au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol. Ces turbines ne disposent pas de commande d'angle de pale comme la précédente [14.15].



Figure I.5. *Eolienne à axe vertical*

Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont: Savonius et Darrieus.

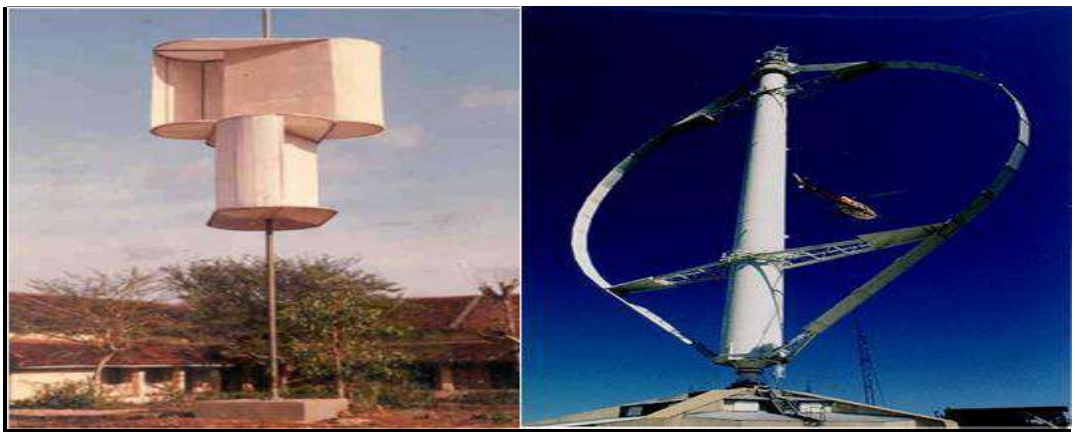


Figure I.6. *Les deux types à axe verticale Savonius et Darrieus.*

I.4.2. Les éoliennes à axe horizontal

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

Selon son nombre de pales, une éolienne à axe horizontal est dite monopale, bipale, tripale ou multipale. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux autres types. Suivant leur orientation en fonction du vent [13].



Figure I.7. *Les éoliennes à axe horizontal*

Les éoliennes à axe horizontal sont dites en « amont » (upwind) ou en « aval » (downwind), la figure I.3.1 montre ces deux types, celle en amont est largement prédominante [5].

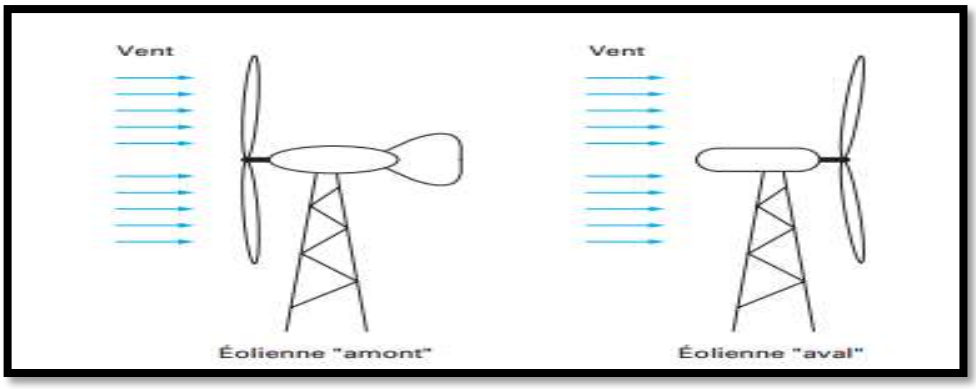


Figure I.8. *Turbine éolienne en amont et en aval*

I.5. Zones de fonctionnement de l'éolienne

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

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

  Les vitesses V_n V_d et V_{max} définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

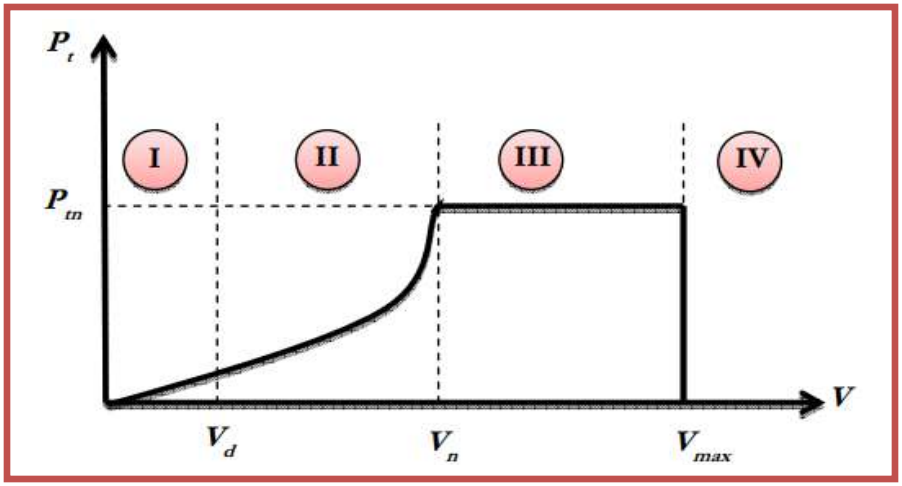


Figure I.9. *Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent*

- La zone I, où 0 = P, la vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à Capter est trop faible
- La zone II, le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n
- La zone IV, la vitesse du vent devient trop forte, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle [16, 17]

I.6. Applications des éoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [6].

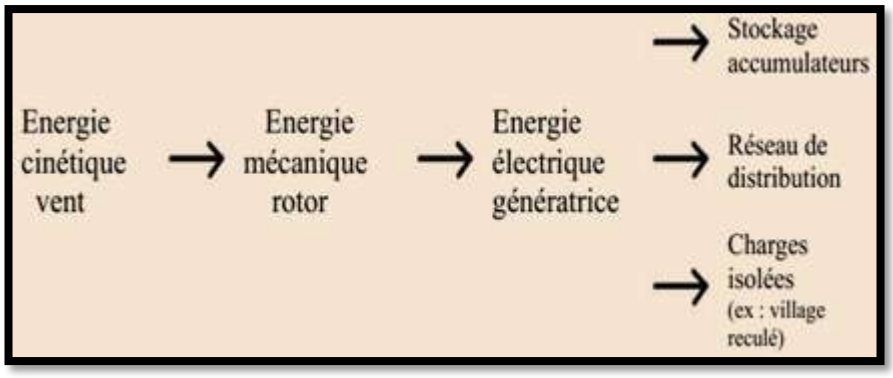


Figure I.10. *Etapes de construire l'électricité*

I.7. Production optimale de l'énergie

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

I.7.1. Fonctionnement à vitesse fixe

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

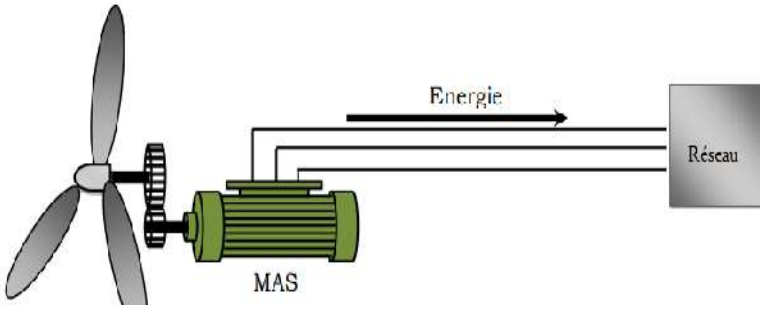


Figure I.11. *Eolienne à vitesse fixe*

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hypersynchrone et fournit la puissance électrique au réseau. On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables [4].

I.7.2. Fonctionnement à vitesse variable

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

Le fonctionnement à vitesse variable demande la définition d'une stratégie de commande globale de la turbine. Il faut donc indiquer les variations de la vitesse de rotation, couple ou puissance souhaitées en fonction des variations de la vitesse du vent [4].

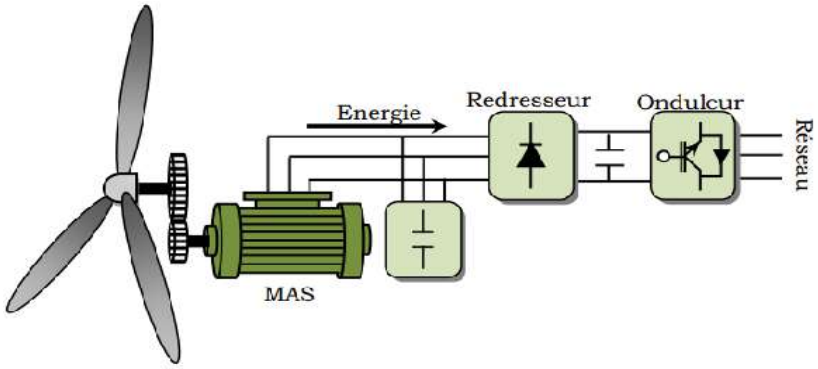


Figure I.12. *Eolienne à vitesse variable*

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

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

I.8. Machines utilisées dans le système éolien

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

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

- Le niveau de puissance à fournir au réseau ou à la charge
- L'implantation sur terre ferme (Onshore) ou en mer (Offshore)
- Et principalement la conversion au réseau électrique ou non (mode autonome) [14].

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

I.8.1. Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné

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

La MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines [20]. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage.

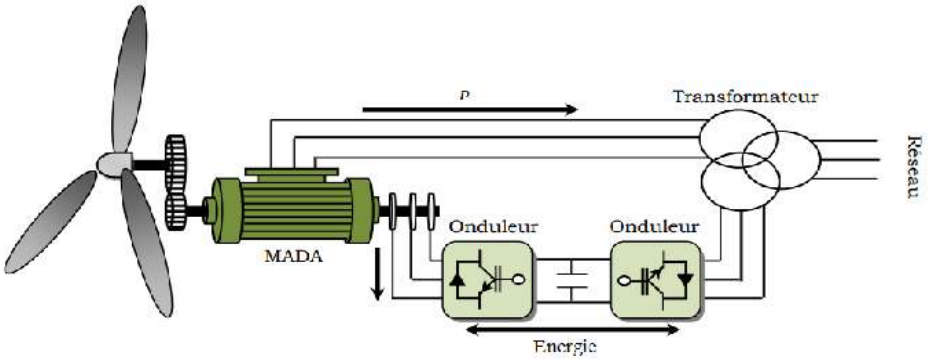


Figure I.13. *Machine asynchrone à rotor bobiné*

- Structure de SCHERBIUS avec convertisseurs MLI

Une autre structure intéressante utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des

GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [20].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité [20].

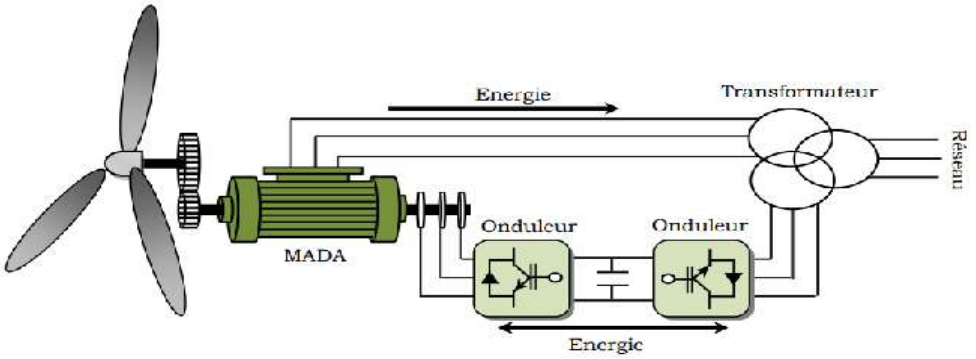


Figure I.14. *Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.*

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

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

A- Les avantages de la MADA

Les principaux avantages de la MADA sont [26]:

- L'accès au rotor offre la possibilité de contrôler les grandeurs électriques du rotor (courant et tension), ce qui donne une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne).
- En fonctionnement moteur, la solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement. Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique.
- Le fonctionnement en hypo ou hypersynchone offre une large plage de variation de la vitesse.

B- Les inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle de la machine asynchrone classique, généralement elle est plus longue à cause du collecteur.
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique.
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines [26].

I.9. Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur.

I.9.1. Modèle de la turbine éolienne

La turbine étudiée comporte trois pales de longueur R. Elles sont fixées à un arbre d'entrainement qui est relié à un multiplicateur de rapport G. Le multiplicateur entraine le générateur électrique à travers un arbre moteur. la figure II.1 Montre le schéma des parties mécanique du générateur éolien

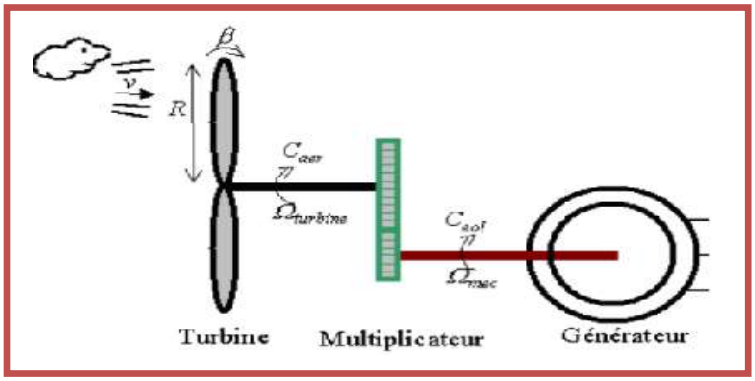


Figure I.15. *La partie mécanique de la turbine éolienne.*

I.9.2. Loi de Betz

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, cependant des modèles mathématiques simples sont souvent utilisés, Considérons le système éolien à axe horizontal (Figure I.16) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval [22].

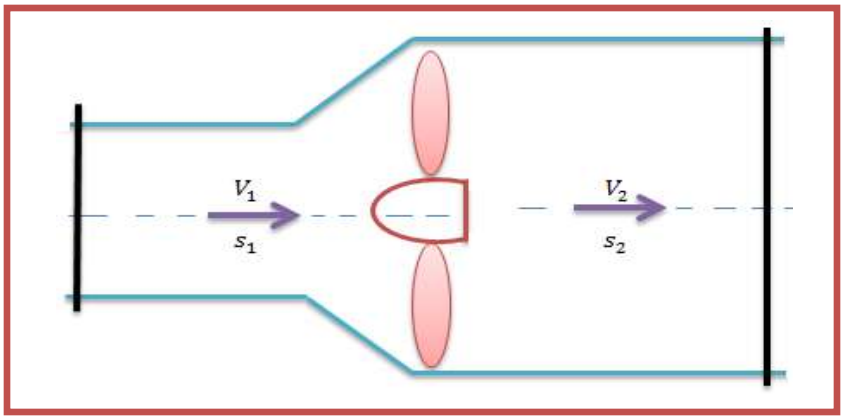


Figure I.16. *Principe de la théorie de Betz*

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant.

En supposant que la vitesse (V) du vent traversant le rotor est égale à la moyenne des deux vitesses ($V1$ et $V2$) donc :

$$V = \frac{v_1 + v_2}{2} \qquad (I.1)$$

L'énergie éolienne provienne de l'énergie cinétique du vent. Si on considère une masse d'air, m (kg), qui se déplace avec la vitesse V (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}V^2 \tag{I.2}$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \rho . S \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{I.3}$$

La puissance mécanique P_m extraite de l'éolienne s'exprime comme suite

$$p_m = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \tag{I.4}$$

En remplaçant «*m*» par son expression dans l'équation (I.3), on aura :

$$p_m = \frac{1}{4} \rho . S (v_1 + v_2)(V_1^2 - V_2^2) \tag{I.5}$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesseV_1, la puissance p_{mt} correspondante serait alors:

$$p_m = \frac{1}{2} \rho . S . V_1^3 \tag{I.6}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est appelé coefficient de puissance (Cp), il s'exprime comme suit :

$$C_p = \frac{p_m}{p_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \tag{I.7}$$

La figure(I.17) Représente la caractéristique *Cp et lambda*.

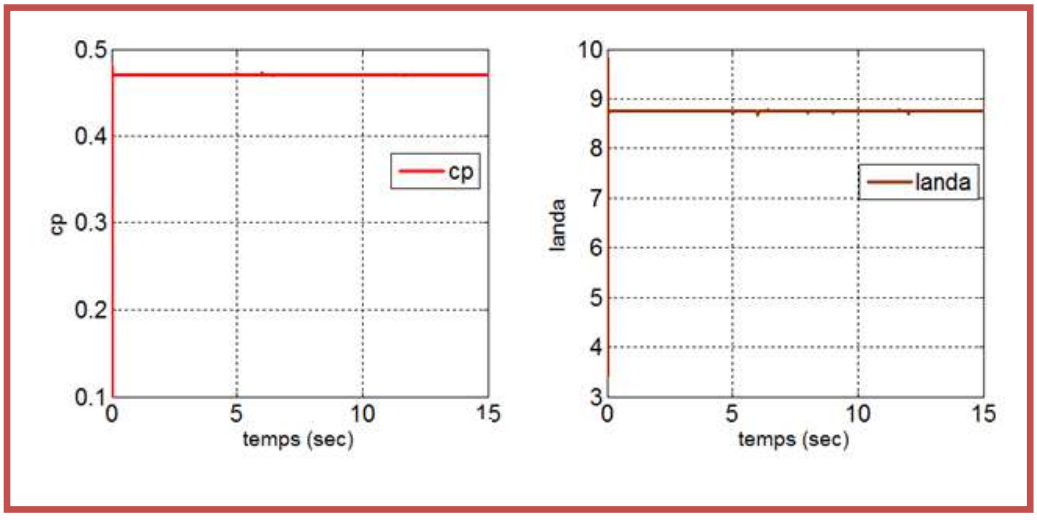


Figure I.17. *Coefficient de puissance et vitesse spécifique*

On constate que le coefficient de puissance (C_p) ne dépasse pas la valeur maximale de 0.49, cette valeur théorique est appelée la limite de Betz [23].

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

I.9.3. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.8), (I.9) et (I.10), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi:

$$C_p = f(\lambda,\beta) = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 - C_4\right)\exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6\lambda \quad (I.8)$$

$$p_m = C_p p_{mt} = \frac{1}{2}C_p(\lambda)\rho\pi R^2 V_1^3 \quad (I.9)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0.08} - \frac{0.035}{\beta^3+1} \quad (I.10)$$

C_1=0.5176, C_2=116, C_3=0.4, C_4=5, C_5=21, C_6=0.0068.

β: L'angle d'orientation des pâles.

$$\lambda = \frac{R.\Omega_1}{V_1} \quad (I.11)$$

λ: Vitesse spécifique.

Ω1: Vitesse de rotation avant multiplicateur

R: Rayon de l'aérogénérateur.

La figure I.18 montre les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ pour différentes valeurs de β. On obtient un coefficient de puissance maximum de 0.498 pour un ratio de vitesse λ qui vaut 8 (λ_{opt}). En fixant β et λ respectivement à leurs valeurs optimales, le système éolien fournira une puissance électrique optimale.

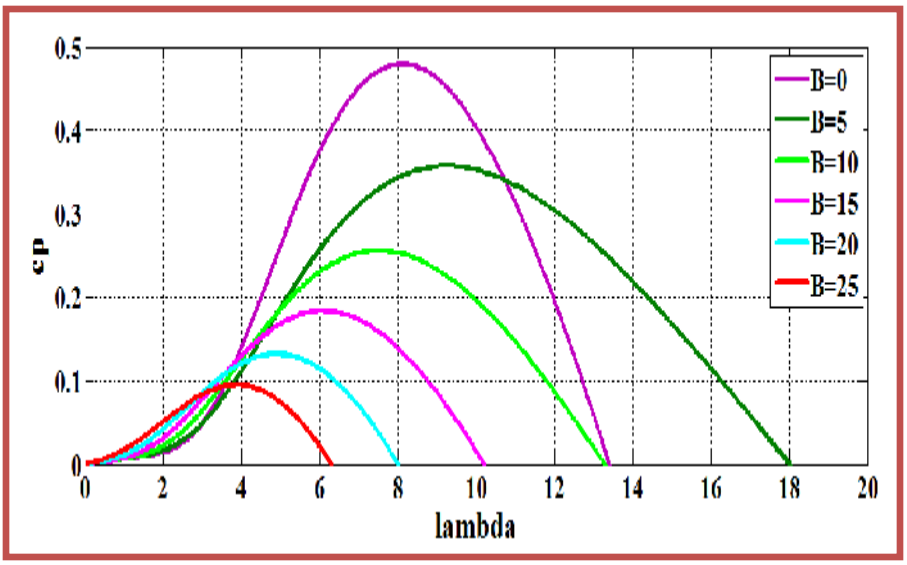


Figure I.18.*Courbe de coefficient Cp (β, λ)*

Le couple de la turbine peut alors être obtenu en divisant l'expression de la puissance mécanique extraite de l'éolienne par la vitesse de rotation de l'arbre mécanique Ω_1:

$$C_{turbine} = \frac{p_m}{\Omega_1} = \frac{1}{2\Omega_1} C_p \left(\frac{R.\Omega_2}{k.V_1}\right) \rho\pi R^2 V_1^2 \quad (I.12)$$

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse *K*, la puissance mécanique p_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{mg} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2}\left(\frac{R\Omega_2}{kV_1}\right) \rho\pi R^2 V_1^3 \quad (I.13)$$

Avec Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent [23].

I.9.4. Modelé de multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le gain de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [24].

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{turbine} \quad (I.14)$$

Où :

G : Gain de multiplication ;

C_{mec}: Couple mécanique sur l'axe du générateur en $(N.m)$.

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega_{\text{mec}} = G\Omega_{\text{turbine}} \tag{I.15}$$

Où :

Ω_{mec}=Vitesse angulaire mécanique du générateur (rad/s).

I.9.5. Modelé de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique de l'arbre qui permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor s'écrit comme suite:

$$j\frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = C_{\text{turbine}} - f\Omega_{\text{mec}} \tag{I.16}$$

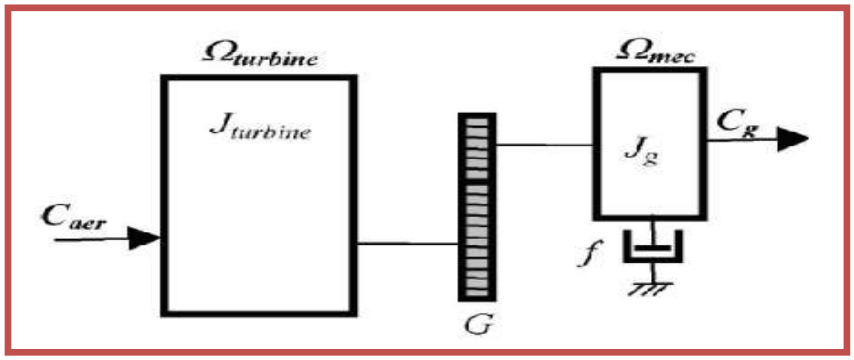


Figure II.19. *Modèle mécanique de la turbine éolienne.*

J : Inertie totale des parties tournantes $(Kg.m^2)$

f : Coefficient de frottements visqueux ;

$f\Omega_{méc} = C_{vis}$: Couple des frottements visqueux;

$C_{turbine} = C_{méc} + C_{em}$: Couple total de l'éolienne ;

C_{em}: Couple électromagnétique du générateur en $(N.m)$.

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif.

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$j = \frac{j_{\text{turbine}}}{G^2} + j_{\text{générateur}} \tag{I.17}$$

Les équations précédentes permettent d'établir le schéma bloc du modèle de la turbine (Figure II.9.).

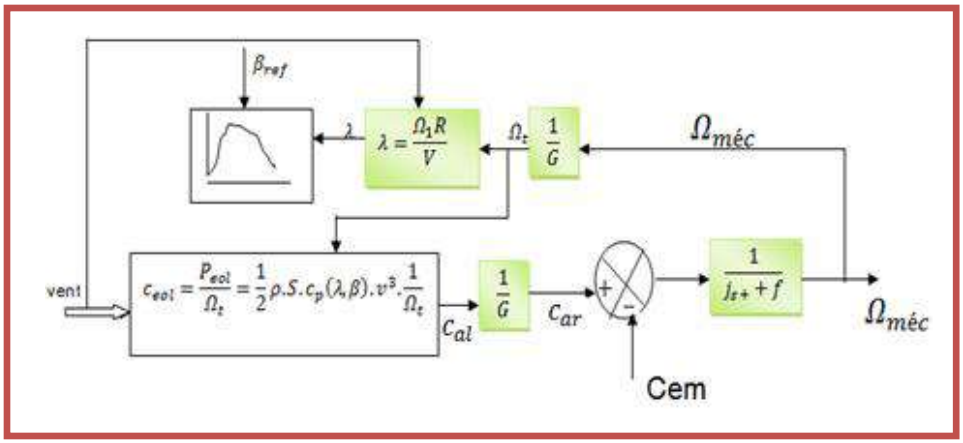


Figure II.20. *Schéma bloc du modèle de la turbine*

I.9.6. Classement des types d'éoliennes en fonction du coefficient de puissance

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend aussi de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse réduite λ.

$$C_p = C_p(\lambda) \qquad (I.18)$$

Ainsi, et sur le plan aérodynamique, nous pouvons comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ comme donné dans la Figure (I.21).

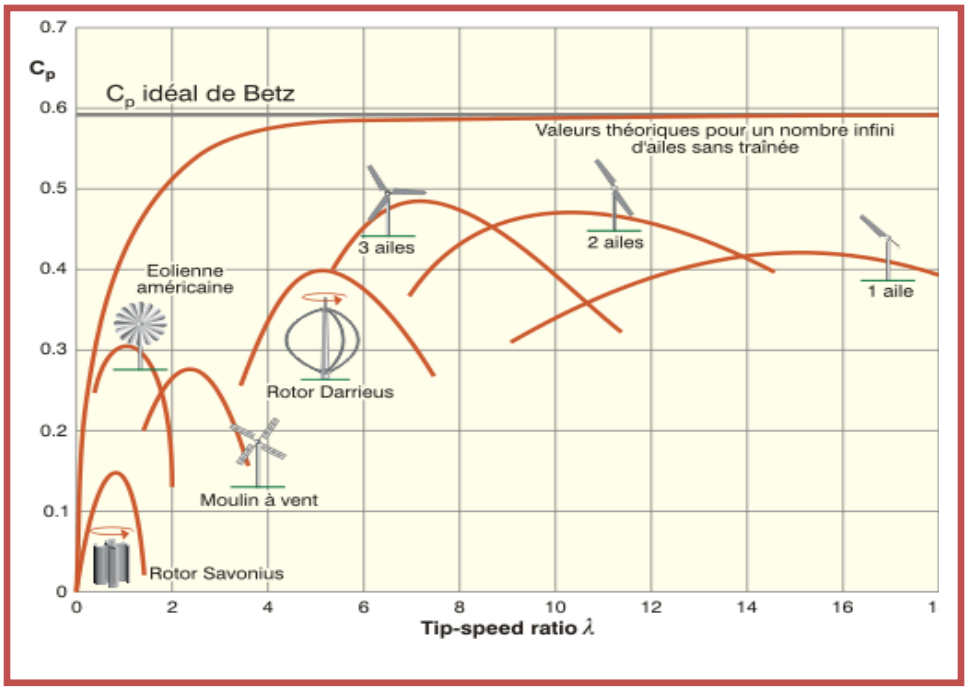


Figure. I.21. *Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types de turbines*

On remarque en tout premier lieu que les éoliennes à axe horizontal, dites à vitesse rapide, possèdent potentiellement un rendement plus important que les autres formules. Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour une gamme de λ comprise entre 5 et 15.Dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse réduite. Il atteint un maximum pour une certaine valeur de λ puis diminue même avec une augmentation de la vitesse réduite. Ces variations de $C_p\ (\lambda)$restent bien en dessous de la limite de Betz.

Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées. On remarque aussi que pour une éolienne tripale, le coefficient de puissance est maximal pour λ=7 , c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse réduite que l'on maximise le rendement

Aérodynamique. Il est à noter aussi, qu'a diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation bien plus élevée qu'une tripale. Par contre, en utilisant le coefficient de couple Cc, défini par la relation :

$$C_p = \lambda\, C_c \qquad \text{(I.19)}$$

On comprend tout l'intérêt des petites machines. Ainsi, et pour des λ très faibles, elles possèdent intrinsèquement un couple très important. Dans ce cas, la présence d'un nombre important de pale contribue à la création du couple de démarrage et ce, avec très peu de vent.

Par contre, dès que le vent se renforce, leurs caractéristiques de couple et de puissance s'effondrent rapidement [6].

I.10.Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après [4].

I.10.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux autres énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier
- Energie non polluante
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu, on peut facilement l'arrêter, contrairement aux autres procédés continus thermiques ou nucléaires
- C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite
- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et se démontent très facilement
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement.

Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

I.10.2.Inconvénients

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

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées

- C'est une source couteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.
- La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations

I.11. Dispositifs de stockage de l'énergie éolienne

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

- Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par batterie d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus. Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre deux réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé.
- Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire [25].

I.12. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits, après ce rappel et descriptif des notions élémentaires, on est passé à la conversion électromécanique où on a présenté et évalué les différentes configurations électriques qui sont utilisées dans le domaine éolien. L'évaluation a été faite sur la base des principales exigences d'un système de conversion d'énergie éolienne. Après une étude comparative, on peut dire que la génératrice la plus intéressante est la MADA à cause de ses caractéristiques intrinsèques telles que le fonctionnement à vitesse variable, et nous avons donné une vue de la turbine éolienne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement de la turbine éolienne, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz).

CHPITRE II :

Modélisation et commande d'un système de conversion éolienne

II.1. Introduction

Grace à sa réversibilité de fonctionnement, la machine asynchrone constitue un outil très précieux dans le domaine de conversion d'énergie. Puis long temps, cette machine destine principalement moteur.

Alors qu'elle présente des performances très intéressantes lorsqu'elle opère en génératrice. Ces performances ont permis à la machine asynchrone et sortant à sa version dite machine asynchrone à double alimentation, d'être meilleur candidat pour travailler dans

Les installations de production des énergies renouvelables, que l'homme essaye à tout prix de les faire exploiter.

L'objectif de ce chapitre, est de traiter la modélisation et le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande et évaluer les performances apportées par cette machine. On présentera aussi sa modélisation dans le repère de Park avec ses deux alimentations, l'une alimente le stator avec un couplage direct au réseau et l'autre alimente le rotor à fréquences variables [27].

Nous présentons un modèle mathématique de la machine dos un le repère de PARK.

Nous montrons l'influence des composantes de la tentions rotorique sur les puissances du réseau et le couple électromagnétique.

Enfin nous présentons le convertisseur qui assure la liaison du rotor avec le réseau.

II.2. Structure de la machine

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques .On peut voir sur la Figure(II.1) que les enroulements rotorique sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts. Glissants. (Collecteur) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [28].

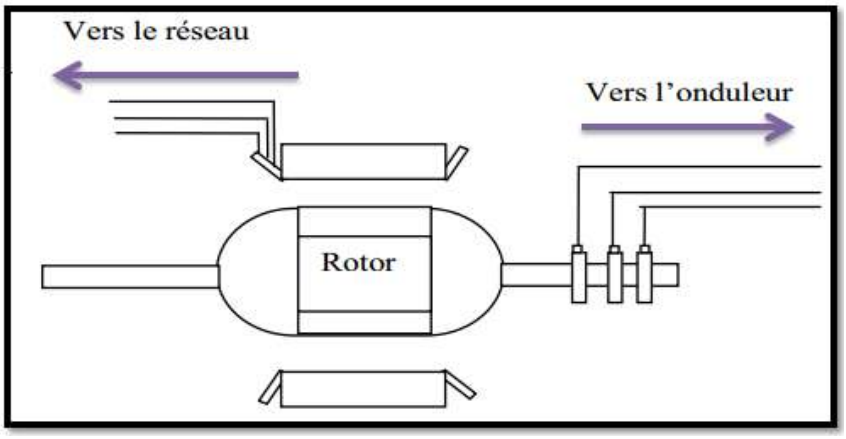


Figure II.1. *MADA connectée à deux réseaux triphasés*

II.3. Principe de fonctionnement de la MADA

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être moteur et au-dessus pour être générateur. Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [29] :

a) Cas du fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone (g>0) : La figure (II.2.a) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

b) Cas du fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone (g<0): La figure (II.2.b) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

c) Cas du fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone (g>0): La figure (II.2.c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est

réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

d) Cas du fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone (g<0): La figure (II.2.d) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

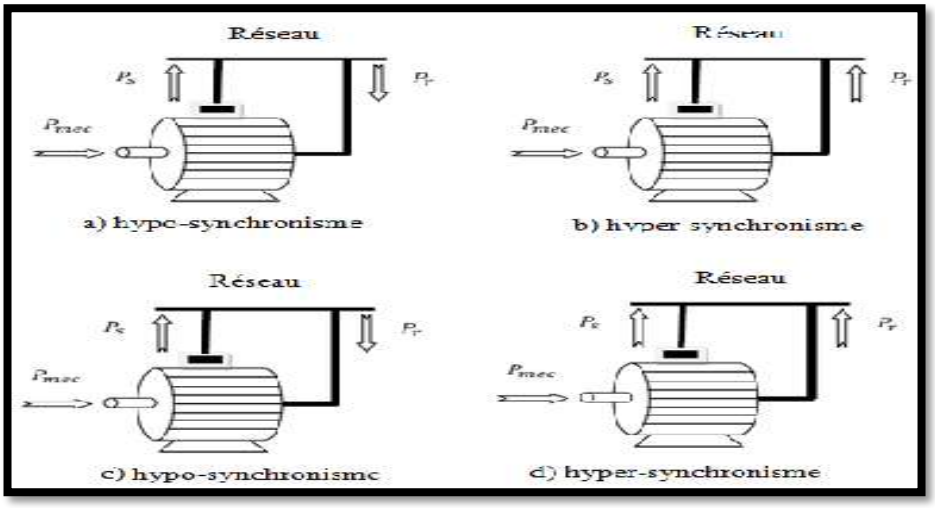


Figure II.2. *Différentes configurations de fonctionnement de la MADA*

II.4. Modélisation d'une chaine de conversion éolienne

Le schéma de l'éolienne basée sur une MADA connectée au réseau, incluant les différentes grandeurs mécaniques et électriques servant à la modélisation de la chaîne de conversion électromécanique, est illustré à la (Figure II.3).

Le système éolien à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA, est illustré à la Figure II-1, La turbine, via un multiplicateur, entraine la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également au travers de convertisseur statique triphasé à IGBT (Insulated GateBipolar Transistor) par le rotor, Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais. Ce Convertisseur Côtés MADA et Réseau, notés respectivement CCM et CCR.

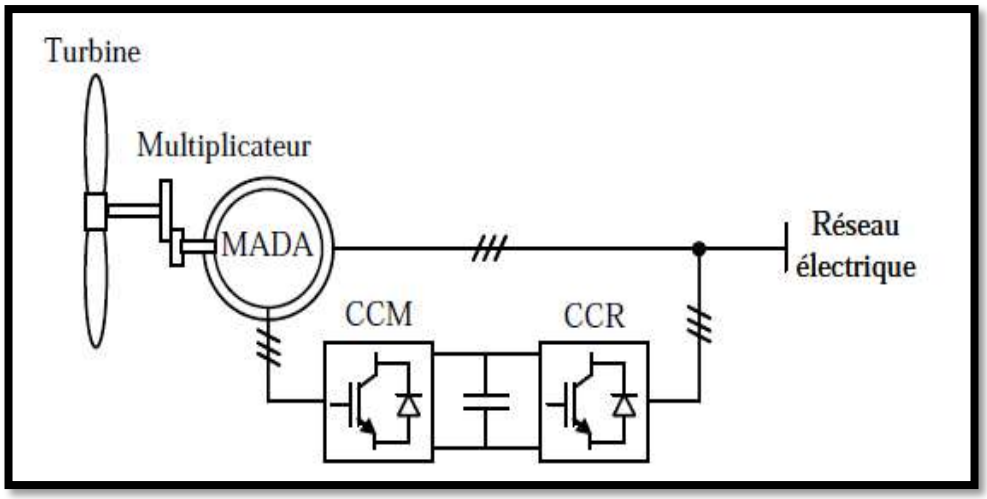


Figure. II.3. *Chaine de conversion éolienne.*

II. 4. 1. Modélisation d'une chaine conversion éolienne coté machine

La chaine de conversion éolienne Côté rotor (RSC) est illustrée par la figure (II.4).

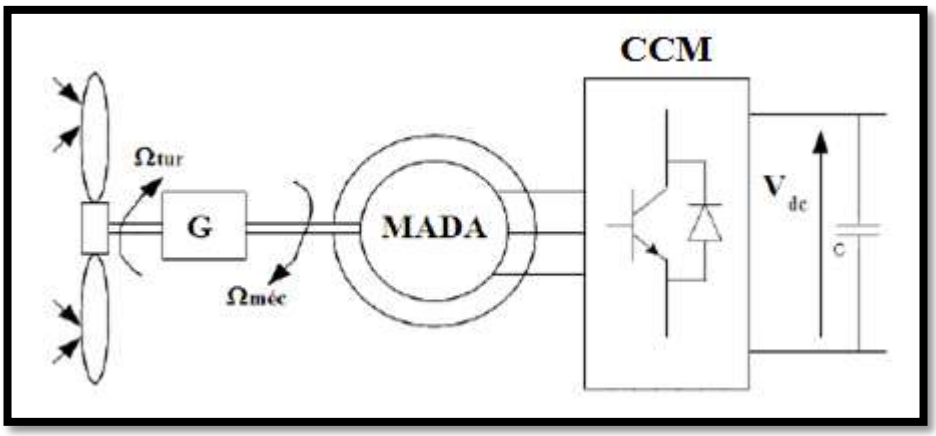


Figure II.4. *Chaine de conversion éolienne cotée machine*

II.4.1.1. Modèle de la machine asynchrone à double alimentations (MADA)

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vue de leur commande en général [30] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligeable
- La force magnétomotrice à une répartition spatiale sinusoïdale
- La machine à une construction symétrique
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

a- Equation électrique

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_S] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] = [R_S][I_S] + \frac{d}{dt}([I_{SS}][M_{Sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([I_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad \text{(II.1)}$$

Avec:

V_s,V_s *tensions* statoriques et rotoriques ;

i_s,i_r courants statoriques et rotoriques ;

R_s,R_r résistances des enroulements statoriques et rotoriques ;

φ_s ,φ_s flux statoriques et rotoriques ;

L_s ,L_r inductances de fuites des statoriques et rotoriques ;

M_S, M_r inductances mutuelles.

b- Équation magnétique

Les équations magnétiques sont données par :

$$\begin{cases} [\varphi_S] = [I_{SS}][I_S] + [M_{Sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [I_{rr}][I_r] + [M_{Sr}][I_S] \end{cases} \quad \text{(II. 2)}$$

. .

Avec:

$$V_S = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_C \end{bmatrix}; [I_S] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ Ic_s \end{bmatrix}; [\varphi_S] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{(II. 3)}$$

$$[R_S] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix}; [L_S] = \begin{bmatrix} L_S & M_S & M_S \\ M_S & L_S & M_S \\ M_S & M_S & L_S \end{bmatrix} \quad \text{(II. 4)}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix}; [\varphi_S] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{Cr} \end{bmatrix} \quad \text{(II. 5)}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{(II. 6)}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(II. 7)}$$

c- Equation mécanique

$$C_{em} = P[I]^t \frac{d}{d_\theta}([M_{sr}][I_r]) = P\left(\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qr} I_{qr}\right) = P\frac{M}{L_s}\left(\varphi_{ds} I_{qr} - \varphi_{qs} I_{ds}\right) \quad \text{(II. 8)}$$

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

$$\frac{d_\Omega}{d_t} = \frac{1}{J}(C_{em} - C_r - f_{r\Omega m\theta}) \quad \text{(II. 9)}$$

Où :

Ω : Vitesse de rotation de la machine ;

J : moment d'inertie de l'ensemble machine et turbine éolienne ;

f_r*:* Coefficient de frottement.

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine). Pour remédier à cette difficulté, nous sommes amenés à utiliser la transformation de variables de type de Park.

II.4.1.2. Modelé de la MADA dans le repère PARK

Afin de pouvoir travailler au niveau de l'algorithme de commande avec des grandeurs électriques constantes tout en réduisant leur nombre, on introduit une transformation de variables supplémentaires. Cette transformation est appelée transformation de Park.

La méthode consiste à transformer le système d'enroulements triphasés statoriques d'axes (a, b, c) en un système équivalent à deux enroulements biphasés sur les axes (*d*, q) ; en raison de la possibilité de créer une même force magnétomotrice indifféremment par des systèmes de courants diphasés ou triphasés d'espace [31].

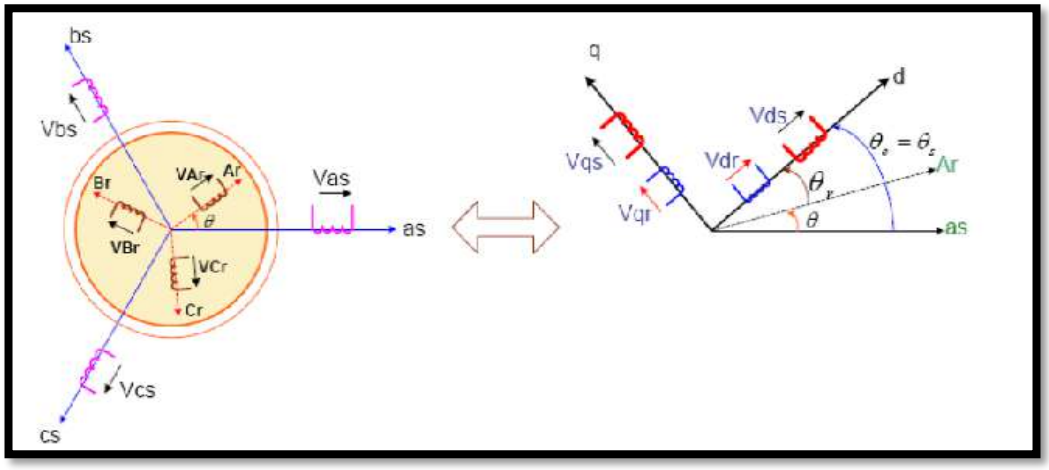


Figure II.5. *Repère référentiel de Park*

Le passage aux composantes de Park est donné par une matrice de rotation suivante :

$$p(\theta)=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} cos(\theta) & cos\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right) & cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) \\ cos^{-1}\theta & -sin(\theta-\frac{2\theta}{3} & -sin\left(\theta+\frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II .10)}$$

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$\begin{cases} \left[V_{s(dq)}\right]=[P(\theta s)]\left[V_{S(abs)}\right] \\ \left[V_{r(dq)}\right]=[p(\theta_r-\theta]\left[V_{r(abc}\right] \end{cases} \quad \text{(II.11)}$$

$$\begin{cases} \left[I_{s(dq)}\right]=\left[P(\theta_s)\left[I_{s(abc)}\right]\right] \\ \left[I_{s(dq)}\right]=[P(\theta_r-\theta)]\left[I_{r(abc)}\right] \end{cases} \quad \text{(II.12)}$$

$$\begin{cases} \left[\varphi_{s(dq)}\right]=[P(\theta_s)]\left[\varphi_{s(abc)}\right] \\ \left[\varphi_{r(dq)}\right]=[P(\theta_r-\theta)]\left[\varphi_{r(abc)}\right] \end{cases} \quad \text{(II.13)}$$

Dans le repère (d, q) les équations du flux s'expriment par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds}=L_S I_{ds}+MI_{ds} \\ \varphi_{qs}=L_S I_{qs}+MI_{qs} \end{cases}; \begin{cases} \varphi_{dr}=L_r I_{dr}+MI_{ds} \\ \varphi_{qr}=L_s I_{qs}+MI_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.14)}$$

Avec :

$L_S=l_sM_s$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r=l_r-M_r$: Inductance cyclique rotorique ;

$M=\frac{3}{2}M_{sr}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

En remplaçant les équations des flux (II-14) dans les équations des tensions (II-15), on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_s+L_s\frac{d}{dt} & w_sL_s & M\frac{d}{dt} & -w_sM \\ w_sL_s & R_s+L_s\frac{d}{dt} & w_sL_s & M\frac{d}{dt} \\ M\frac{d}{dt} & -(w_s-w_r)M & R_r+L_r\frac{d}{dt} & -(w_s-w_r)L_r \\ (w_s-w_r)M & M\frac{d}{dt} & (w_s-w_r)L_r & R_r+L_r\frac{d}{dt} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{(II.15)}$$

L'expression générale du couple électromagnétique dans le repère d-q devient :

$$C_{em} = P\frac{M}{L_s}(\varphi_{ds}I_{qs} - \varphi_{qs}I_{dr}) \quad \text{(II.16)}$$

II.4.1.3. Principe de la commande vectorielle de la MADA

Afin de découpler la commande du couple et celle du flux de cette machine, plusieurs stratégies de commande ont été proposées pour obtenir des performances souhaitées. Ces stratégies de commande consistent souvent à rendre le comportement électromagnétique de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Cette similitude est rendue possible par l'emploi de la commande vectorielle élaborée à partir du modèle de Park.

Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter une des composantes du flux statorique suivant un axe de référence tournant à la vitesse du synchronisme, c'est-à-dire sur l'axe « d » (Figure II.5.).

- Procédé d'orientation de flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter (statorique, rotorique ou d'entrefer) doit coïncider avec l'axe « d ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes :

- Orientation du flux rotorique

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \varphi_r \\ \varphi_{qr} = 0 \end{cases} \quad \text{(II.17)}$$

- Orientation du flux statorique

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad \text{(II.18)}$$

- Orientation du flux magnétisant

$$\begin{cases} \varphi_{dm} = \varphi_m \\ \varphi_{qm} = 0 \end{cases} \quad \text{(II .19)}$$

Dans notre travail, nous avons choisi un référentiel lié au champ tournant statorique.

- Modelé de GADA avec orientation de flux statorique

Le modèle de la GADA s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

- Equation du flux statoriqu

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{ds} \\ 0 = L_s I_{qs} + M I_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

- Equation du couple électromagnétique

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} \varphi_{ds} I_{qr} \quad \text{(II.21)}$$

Le courant i_{qr}sera rendu variable par action sur la tensionV_{qr}**,** le flux peut être contrôlé parle réglage du courant i_{dr}. Ce dernier est rendu variable par action sur la tension V_{dr} [32].

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s, ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne, les équations des tensions statoriques devient:

$$\begin{aligned} V_{ds} &= 0 \\ V_{qs} = V_s &= w_s \varphi_{dr} \end{aligned} \quad \text{(II.22)}$$

A partir de l'équation (II-20), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{aligned} I_{ds} &= \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{ds} &= -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{aligned} \quad \text{(II.23)}$$

- relations entre puissance statoriques et courants rotorique

Dans un repère diphasé, les puissances actives et réactive statoriques d'une machine. asynchrone à double alimentation s'écrivent :

$$\begin{aligned} P &= V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q &= V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{aligned} \quad \text{(II.24)}$$

$$\begin{cases} P = g.P_s \\ Q = g.Q_s \end{cases} \quad \text{(II.25)}$$

En approximant φ_S par, $\frac{V_S}{w_S}$ l'expression de la puissance réactive Q devient alors :

$$Q = \frac{1}{w_s L_s} V_S^2 - V_s \frac{M}{L_S} I_{dr} \tag{II.26}$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe *q* et la puissance réactive au courant rotorique d'axe *d* à la constante $\frac{V_s^2}{L_s w_s}$ près imposée par le réseau.Relation entre tension rotorique et courants rotorique

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (II-27) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_S}\right) I_{dr} + \frac{M V_S}{w_s L_s} \\ \varphi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \end{cases} \tag{II.27}$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_S}\right)\frac{d}{dt} I_{dr} - g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_S}\right)\frac{d}{dt} I_{qr} + g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{w_s L_s}\right) \end{cases} \tag{II.28}$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques ; diphasés disparaissent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g w_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_S}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g w_S \left(L_r - \frac{M^2}{L_S}\right) I_{dr} + g w_s \frac{M V_S}{W_S L_S} \end{cases} \tag{II.29}$$

Où :

V_{dr}etV_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_S}\right)$ Est le terme de couplage entre les deux axes ;

$g w_S \dfrac{MV_S}{w_S L_S}$ Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Les équations (II-23), (II-24) et (II-29) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (Figure II.6)

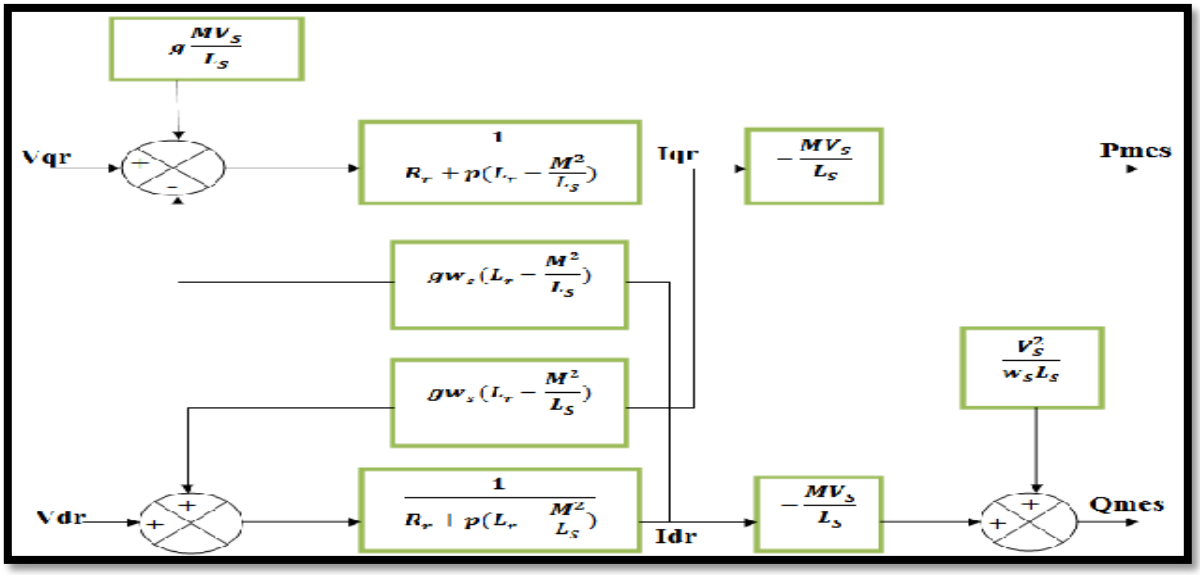


Figure II.6. *Schéma bloc de la MADA à réguler*

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotoriques. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator, de façon à optimiser la qualité de l'énergie envoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal [32].

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine

- Méthode directe

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et de mettre en place un régulateur (PI) indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive (Figure II.7.). Cette méthode est dite méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

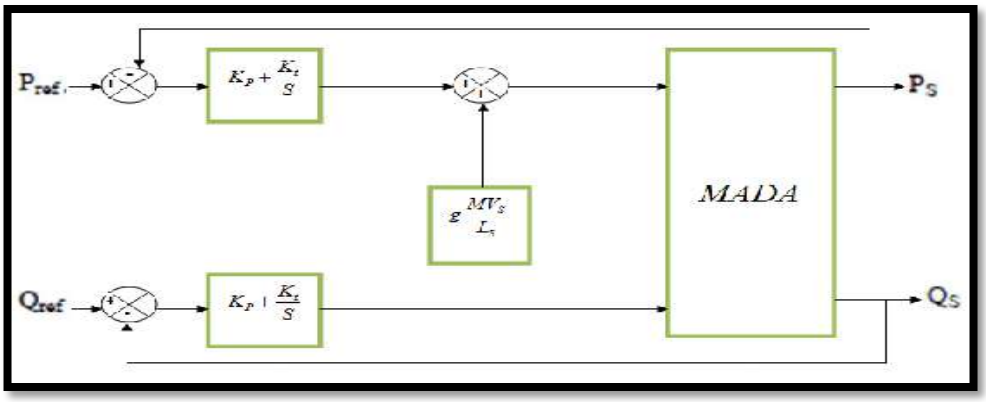


Figure II.7. *Schéma bloc de la commande de puissance directe*

- Méthode indirecte

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en utilisant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques.

En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi les schémas bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la *MADA*. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courant rotoriques et on trouve :

$$\begin{cases} V_{dr} = gw_s \dfrac{R+\left(L_r-\frac{M^2}{L_S}\right)}{\frac{MV_S}{L_S}} p - \left(\dfrac{R_r+\left(L_r-\frac{M^2}{L_S}\right)}{\frac{MV_S}{L_S}}\right) Q + \left(\dfrac{R_r V_s}{w_s M} + \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_S}\right)\dfrac{V_S}{L_S}\right) p \\ V_{qr} = \left(\dfrac{R_r+\left(L_r-\frac{M^2}{L_S}\right)}{\frac{MV_S}{L_S}}\right) p - gw_S \dfrac{\left(L_r-\frac{M^2}{L_S}\right)}{\frac{MV_S}{L_S}} Q + gw_S \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_S}\right)\dfrac{V_S}{w_s M} \end{cases} \quad \text{(II.30)}$$

Pour obtenir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine (Figure II.8.).

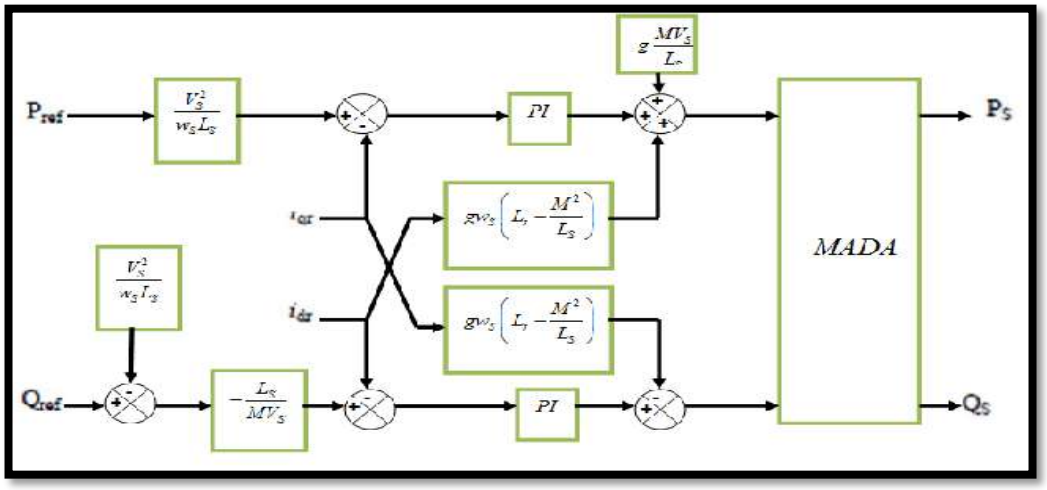


Figure II.8. *Schéma bloc de la commande de puissance indirecte*

II.4.1.4 Modélisation de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

- **Définition**

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors (IGBT, GTO, MOSFET…). Sa commande peut être réalisée par la technique classique ou par la technique de Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI).

Dans ce travail, on commande l'onduleur de tension par la technique à MLI.

L'onduleur est le cœur du système d'alimentation. Il est formé de trois bras indépendants portant chacun deux interrupteurs. Un interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode en antiparallèle. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [9].

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfaits [26].

.

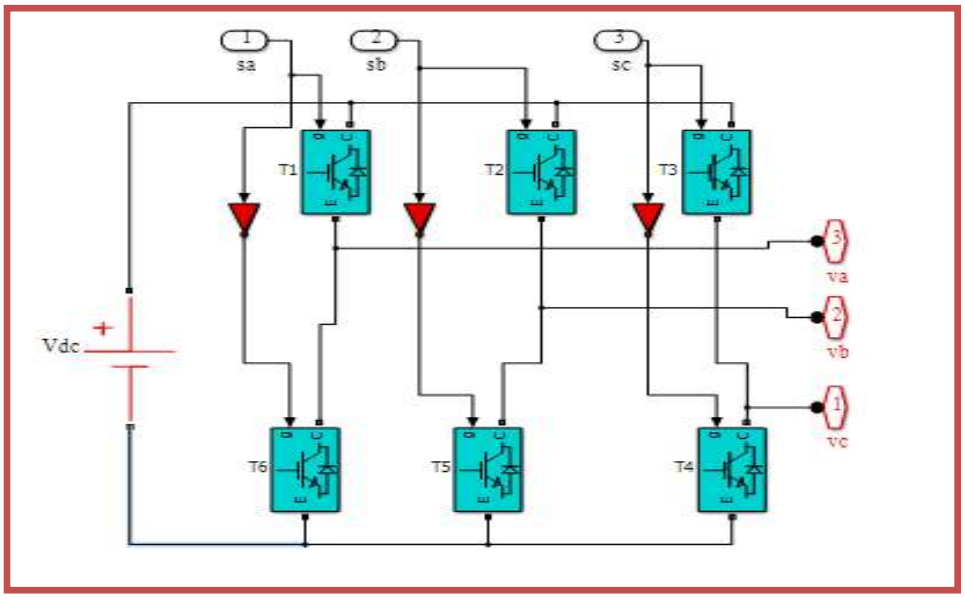


Figure II.9. *Onduleur de tension à deux niveaux.*

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables(S_a, S_b, S_c)en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

Branche1

$S_a = 0$ Si S_1 est en position off et S_4est à on.

$S_a = 1$ Si S_1 en position on et S_4est à off.

Branche 2

$S_b = 0$ Si S_2 est en position off et S_5 est à on.

$S_b = 1$ Si S_2 en position on et S_5 est à off.

Branche 3

$S_C = 0$ Si S_3 est en position off et S_6 est à on.

$S_C = 1$ Si S_3 en position on S_6 à off.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{aligned} U_{AB} &= V_A - V_B = S_a U_c - S_b U_c - 0 S_c U_c \\ U_{BC} &= V_B - V_C = S_b U_c - S_c U_c - 0 S_a U_c \\ U_{CA} &= V_C - V_A = S_c U_c - S_a U_c - 0 S_b U_c \end{aligned} \quad \text{(II.1)}$$

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} . U_c \quad \text{(II.2)}$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \tag{II.3}$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{1}{3}U_c(2S_a - S_b - S_c) \\ V_B &= \frac{1}{3}U_c(-S_a + 2S_b - S_c) \\ V_C &= \frac{1}{3}U_c(-S_a - S_b + 2S_c) \end{aligned} \tag{II.4}$$

D'où on obtient :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{U_C}{3}(2.S_a - S_b - S_c) \\ V_B &= \frac{U_C}{3}(2.S_b - S_a - S_c) \\ V_C &= \frac{U_C}{3}(2.S_c - S_b - S_a) \end{aligned} \tag{II. 5}$$

Ou encore sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_C}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II. 6}$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie et la technique de modulation vectorielle [26].

- **Principe de la MLI**

La MLI consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [9]

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

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

$$m = \frac{f_p}{f} \quad \text{(II. 7)}$$

Taux de modulation(r) qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence(V_{ref}) et celle de la porteuse(V_P) :

$$r = \frac{V_{ref}}{V_P} \quad \text{(II.8)}$$

Le choix d'un indice de modulation(m) multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicape de cette technique. Cependant, le taux de modulation(r) varie suivant la référence imposée

- stratégie de la commande MLI triangulo-sinusoïdale

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux (r1, r2,r3), d'amplitude variable et de fréquence f appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

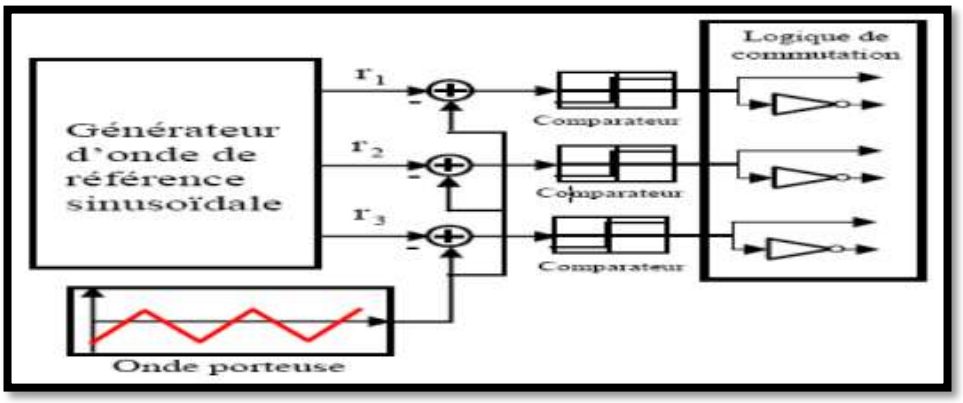


Figure II. 10. *Schéma de principe de la technique tringulo-sinusoïdale*

Résultat de simulation

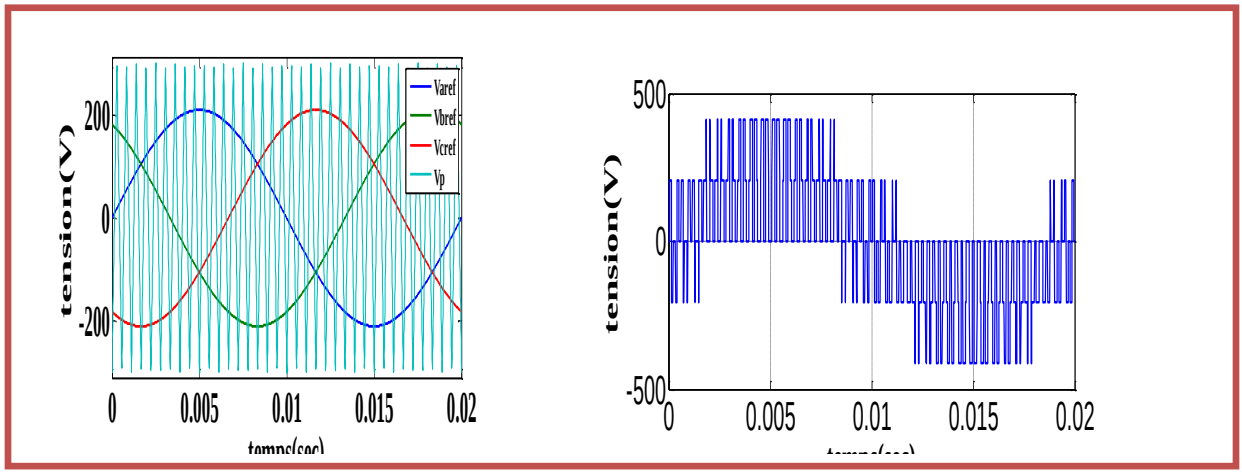


Figure II.11. *Principe de la MLI sinus triangle et la* tension simple de l'onduleur

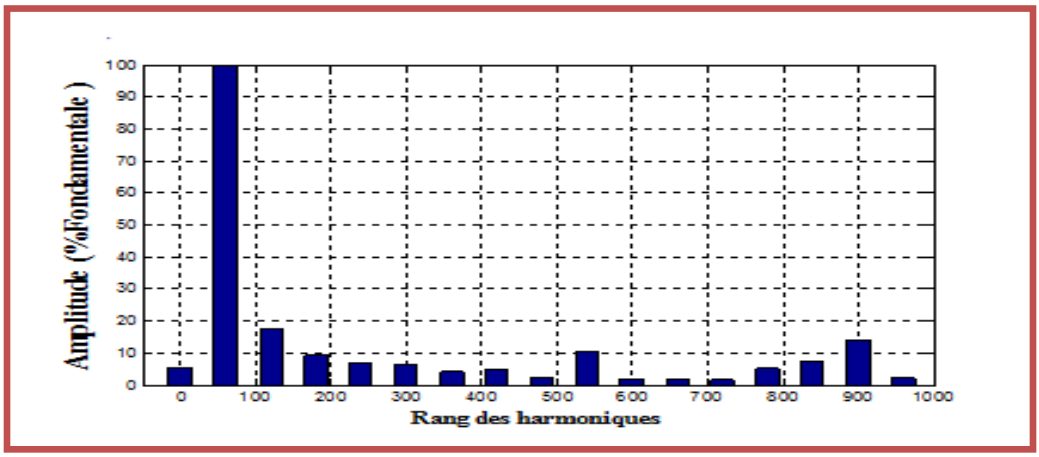


Figure II.12. *Spectre de l'onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie triangulo–sinusoïdale à deux porteuses bipolaires (m=12, r=0.8)*

- **Modulation vectorielle**

La modulation vectorielle permet de suivre le vecteur de tension de référence et non pas chaque tension de référence de phase séparément [25]. Son principe est identique à celui de la stratégie triangulo–sinusoïdale à échantillonnage régulier avec injection de l'harmonique trois

On définit à partir du vecteur de référence $V_{Sref}, V_{sref} = (V_{ref1}, V_{ref2}, V_{ref3})^t$ deux niveaux vecteurs de référence V_{Sref1} et V_{Sref0}. Le vecteur de référence V_{Sref1} est associé à l'onduleur à deux niveaux constitué des demi-bras du haut de l'onduleur multi niveaux, alors que le vecteur V_{Sref} est associé aux demi-bras du bas.

Ces deux nouveaux vecteurs de référence sont définis par le système d'équations suivant

$$V_{Sref1}[i] = V_{Sref}[i] + V_0 \quad \text{(II.9)}$$

$$V_{sref}[i] = V_{sref}[i] - V_0 \quad \text{(II. 10)}$$

Avec i=1,2, 3

La tension V_0 est donnée par l'expression suivante :

$$V_0 = \frac{[max(V_{Sref}) + min(V_{Sref})]}{2} \quad \text{(II.11)}$$

Resultas de simulation :

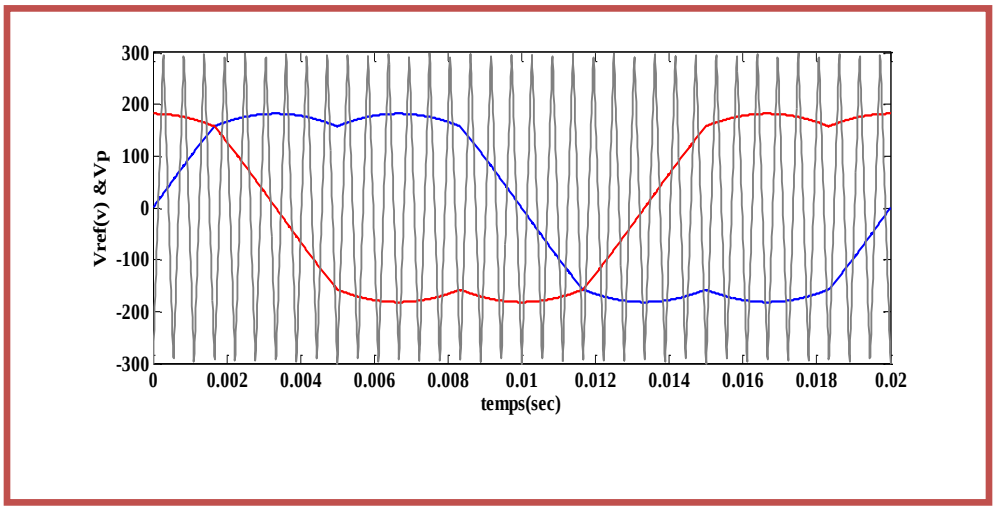


Figure II. 13. *Les tensions de l'onduleur à deux niveaux*

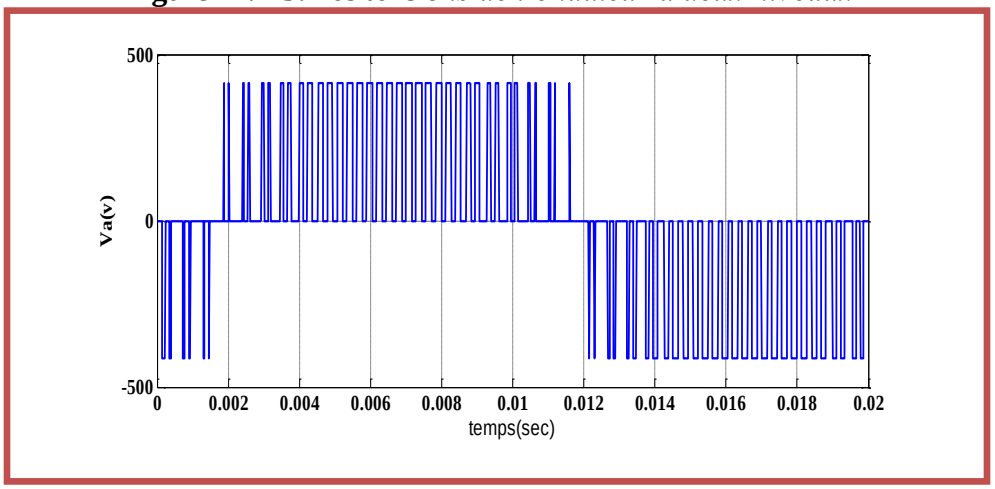


Figure II.14. *Tensions simples de l'onduleur*

II.4.1.5 Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternative [03].

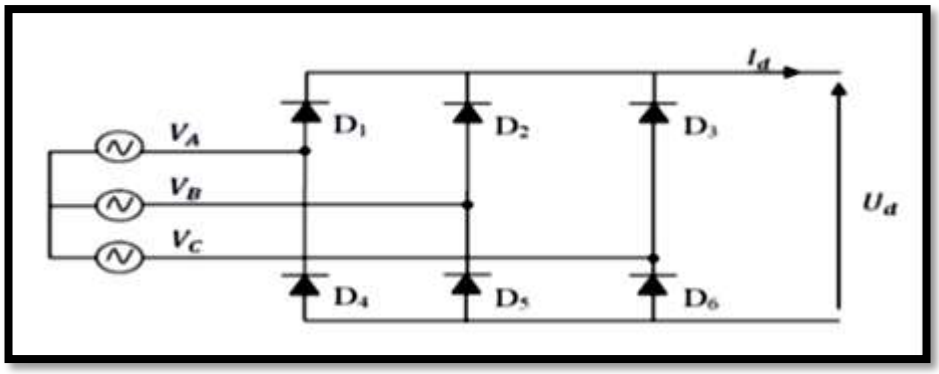


Figure II.15. Schéma du redresseur triphasé à diodes

Ce redresseur comporte trois diodes D1, D2, D3 à cathode commune assurant l'aller du courant Id et trois diodes D4, D5, D6 à anode commune assurant le retour du courant Id. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} U_a(t) = V_{max}\sin(2\pi f t) \\ U_b(t) = V_{max}\sin(2\pi f t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c(t) = V_{max}\sin(2\pi f t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(IV.12)}$$

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

$$U_d(t) = Max[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] - Min[U_a(t), U_b(t), U_c(t)]$$

La tension redressée présente des ondulations. Pour réduire ces ondulations il faut placer un filtre passe bas entre le redresseur et l'onduleur.

II. 4.1.6 Simulation et interprétation des résultats

Nous allons simuler notre système coté MADA et coté réseau à l'aide des contrôleurs PI, les résultats de simulation trouvée est indiqué comme suite:

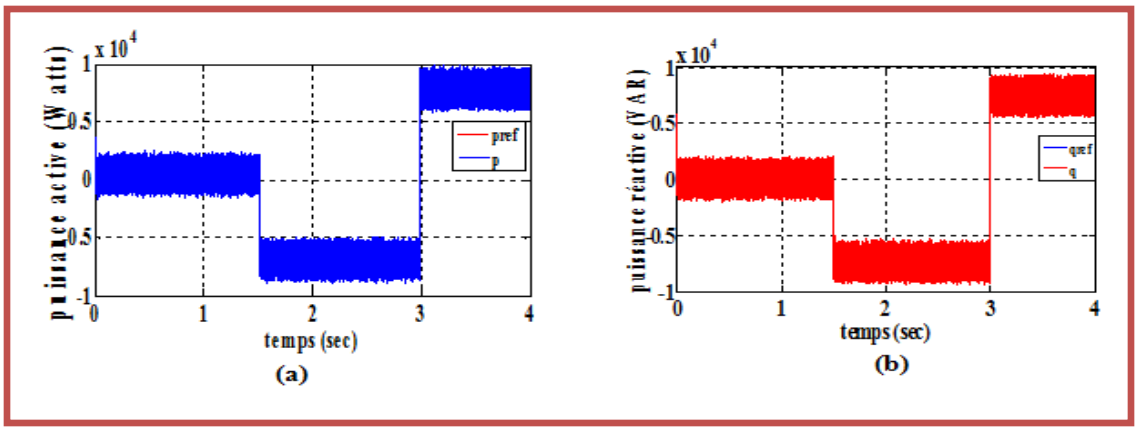


Figure II.16. (a). *Puissance active (watt), (b) puissance réactive (VAR) de la MADA coté Machine.*

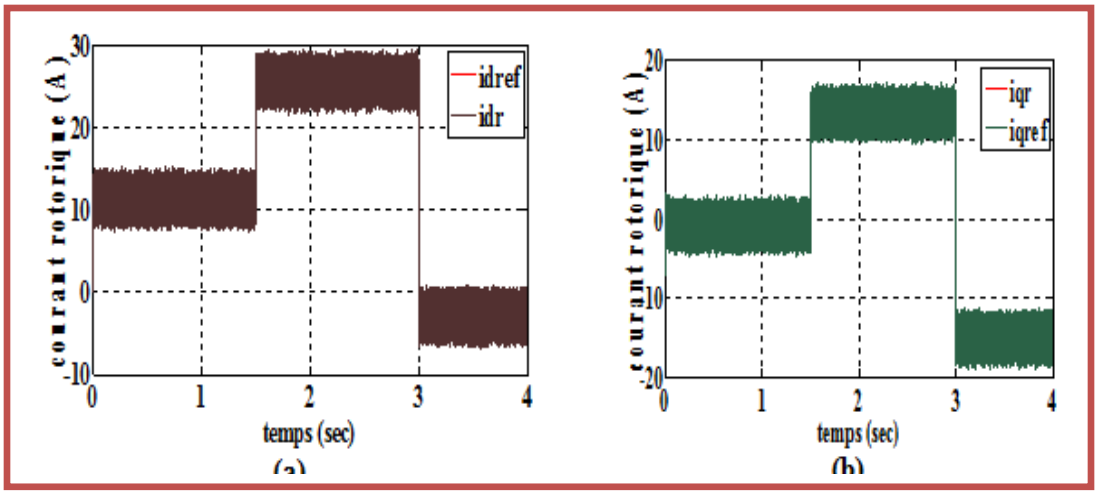


Figure. II.17. *Les courants rotoriques de la MADA*

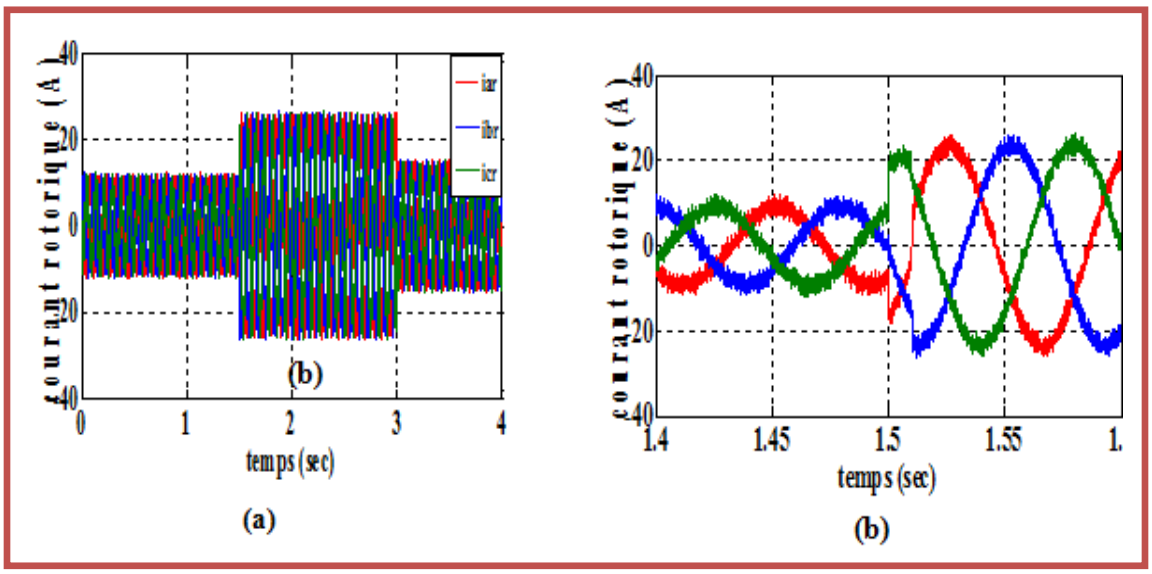


Figure II.18. *(a) les courant rotorique (b) les courants rotorique avec zoom courant rotorique.*

Les Figures ci dessus montrent les performances des contrôleurs PI et de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA intégrée dans un système éolien, on suppose la puissance active nous remarquons que les grandeurs de référence ont été bien suivies par la MADA pour les deux puissances active et réactive.

II.4. 2 Modélisation d'une chaine de conversion éolienne côté réseaux

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR avec le réseau électrique via le filtre RL. La (Figure II.18) illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique, constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée.

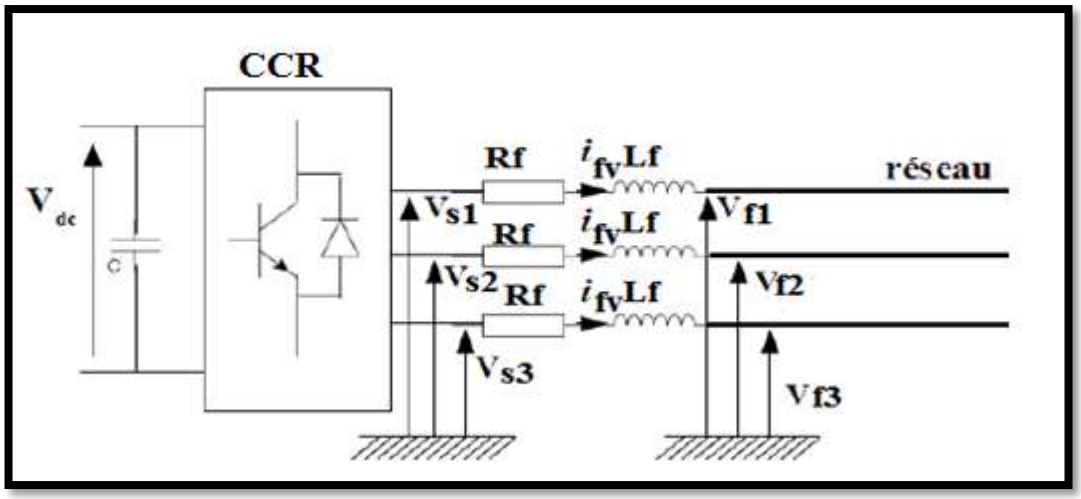


Figure II.19. *Connexion du CCR au réseau électrique.*

Avec :

- $\boldsymbol{i_{ond}}$, $\boldsymbol{i_{red}}$: respectivement les courants modulés par le CCM et le CCR,
- $\boldsymbol{i_{ond}}$ **:** le courant traversant le condensateur,
- $\boldsymbol{V_{dc}}$ **:** la tension du bus continu (tension aux bornes du condensateur),
- $\boldsymbol{R_f}$ et $\boldsymbol{L_f}$: respectivement la résistance et l'inductance du filtre RL,
- $\boldsymbol{V_{fk}}$: les tensions simples modulées par le CCR ($k \in \{1, 2, 3\}$),
- $\boldsymbol{V_{sk}}$: les tensions simples du réseau électrique,
- $\boldsymbol{i_{f1}}$, $\boldsymbol{i_{f2}}$: les courants circulant à travers le filtre RL.

II.4.2.1. Modèle Contrôle des courants transitant dans le filtre RL

Dans le repère *dq* lié au champ tournant statorique, les équations (II.28. et II.29) deviennent:

D'après la Figure (II.18), nous pouvons écrire dans le repère triphasé, selon les lois de Kirchhoff, les expressions suivantes

$$\begin{cases} v_{f1} = -R_f i_{fv} - L_f \dfrac{di_{fv}}{dt} + vs_1 \\ v_{f2} = -R_f i_{fv} - L_f \dfrac{di_{fv}}{dt} + vs_1 \\ v_{f3} = R_f i_{fv} - L_f \dfrac{di_{fv}}{dt} + vs_1 \end{cases} \quad \text{(II.46)}$$

En appliquant la transformation de Park aux trois équations précédentes, nous obtenons :

$$\begin{cases} v_{fd} = -R_f i_{fd} - L_f \dfrac{di_{fd}}{dt} + e_{df} \\ v_{fq} = -R_f i_{fq} - L_f \dfrac{di_{fq}}{dt} + e_{qf} \end{cases} \quad \text{(II.47)}$$

$$\begin{cases} e_{df} = w_S . L_f . i_{qf} \\ e_{qf} = -w_S . L_f . i_{df} + v_{qs} \end{cases} \quad \text{(II.48)}$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère *dq* suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes *dq*. Comme pour la régulation des courants rotoriques, nous modélisons le convertisseur par un gain G_c, avec ici $G_c$égal à 1. Le bloc des boucles de régulation des courants d'axes *dq* est décrit à la (Figure II.20), Les correcteurs utilisés sont de type PI. Dans ces schémas blocs de régulation apparaissent les termes de compensation et de découplage des axes *dq* ainsi que les modèles du CCR et de la liaison de celui-ci au réseau via le filtre RL suivant le repère *dq*.

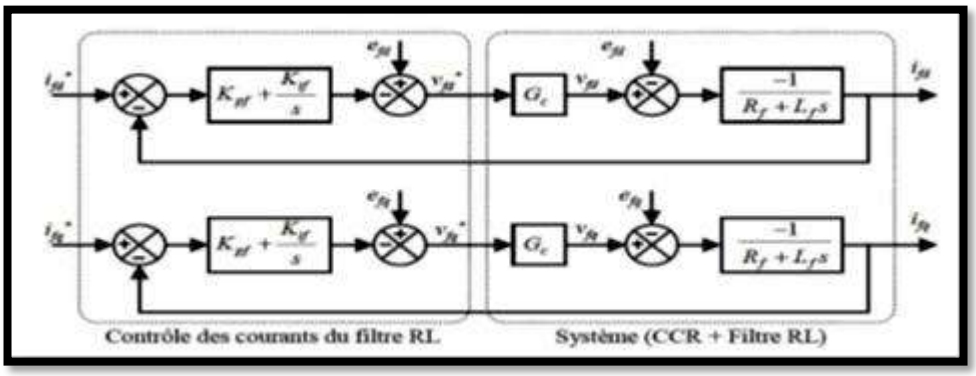


Figure II.20. *Filtre RL le repère dq*

Les courants de référence i_{fq}^*et i_{fd}^*sont respectivement issus du bloc de contrôle de la tension du bus continu et du contrôle de la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique (Figure II.20).

En négligeant les pertes dans la résistance $R_f$du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère *dq* lié au champ tournant statorique (V_{sd}= 0), les équations 1.38 et 1.39deviennent :

Les puissances active et réactive générées par le CCR sont définies par :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{cond} \tag{II.49}$$

A partir de ces relations, il est alors possible d'imposer les puissances active et réactive de référence, notées ici P_{f^*} et Q_f, en imposant les courants de référence suivants :

$$\begin{cases} I_{df^*} = \dfrac{q_{f^*}}{V_{qs}} \\ I_{qf^*} \dfrac{q_{f^*}}{V_{qs}} \end{cases} \tag{II.50}$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée (Q_{f^*} = 0 VAr).

II.4.2.2.Modèle du bus continu

La tension aux bornes du condensateur du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant circulant dans le condensateur (Figure II.21)

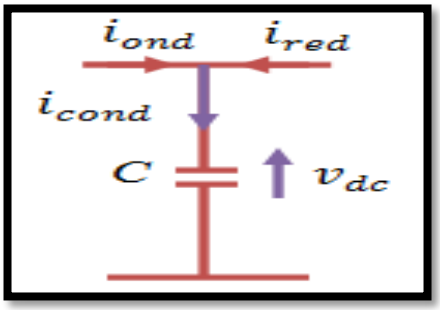


Figure II.21. *Modèle de bus continu*

$$\frac{d_{vdc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{cond} \tag{II.51}$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR (Figure II.21) :

$$i_{Cond} = i_{rond} - i_{ond} \tag{II.52}$$

II.4.2.3 Simulation et interprétation des résultats

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation coté réseau.

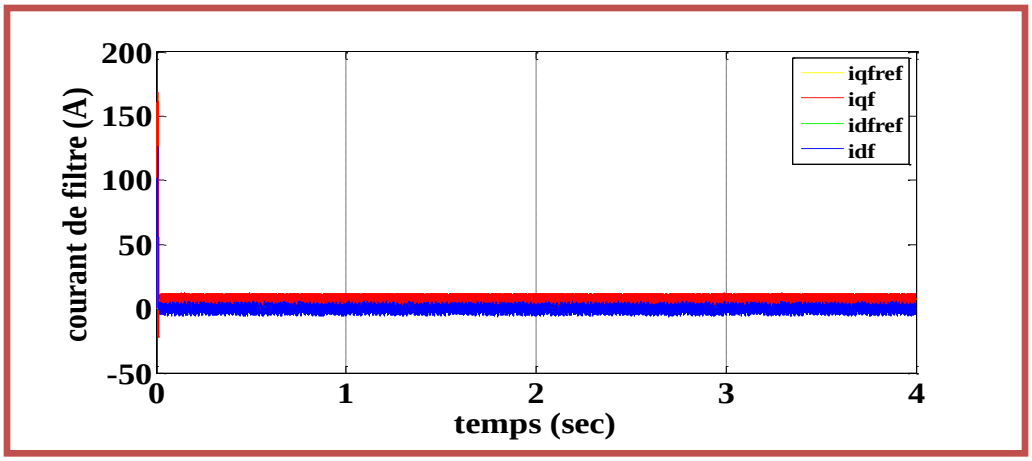


Figure II.22. *Courant d'un filtre coté réseau.*

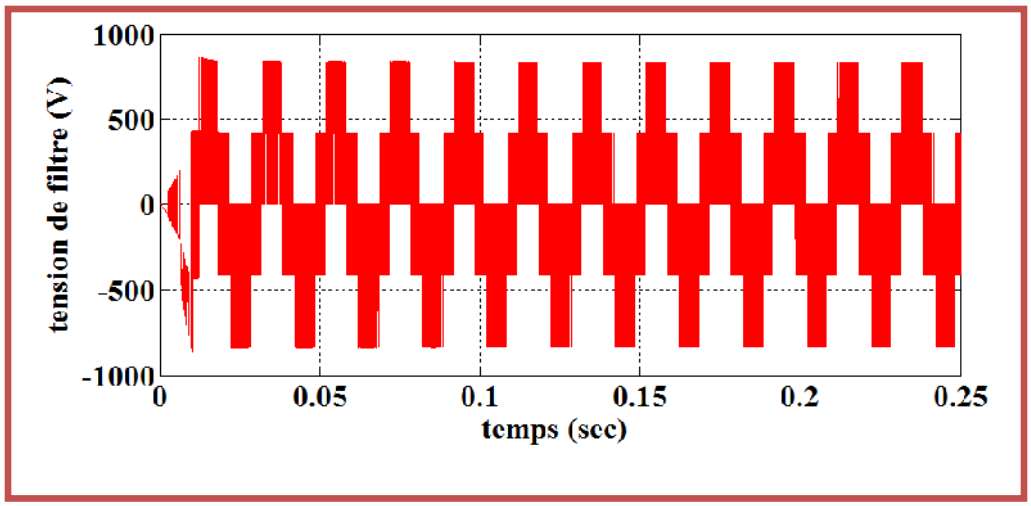


Figure II.23. *Tension de filtre (V)*

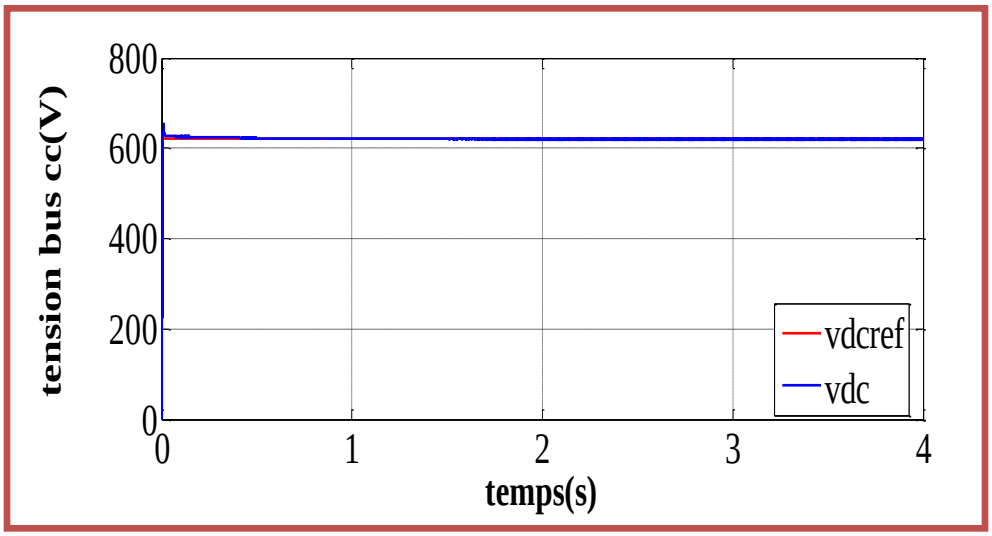


Figure II.24. *Tension de bus continu en fonction de référence*

A partir de ces résultats de simulation, nous avons remarqué que tous les performances des grandeurs mesurées suivent bien l'évolution de ses références, et celui varie au profil du vent comme pressentes les figures (III.21), (III.22), (III.23) et (III.24).

II.5. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudies la modélisation et la commande de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système de plusieurs équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil informatique. Afin de simplifier le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, nous avons utilisé la transformation dite de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, le système d'état de la machine a été réduit à un modèle biphasé.

Nous avons aussi développé deux méthodes de commande vectorielle en puissance de la machine à savoir : la commande directe et la commande indirecte. Effectivement nous avons pu voir que la commande directe est la plus simple à mettre en œuvre, mais pas la plus performante. En revanche, la méthode indirecte nous permet, en association avec le bouclage des puissances, d''avoir un système performant et robuste. Elle est certes plus complexe à mettre en œuvre, mais permettra d''avoir un fonctionnement optimal du système de génération électrique en minimisant les éventuels soucis liés aux variations des paramètres de la machine et du système éolien.

CHAPITRE III :

Les perturbations et la dépollution dans les réseaux électriques

III.1. Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibre.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses ; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer [33].

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles. Nous discuterons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisés pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

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

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- Les fluctuations
- le déséquilibre
- la fréquence
- la forme d'onde

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation [33].

III.2.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur situé entre 10 % et 90 % de la tension nominale 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 ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvrés 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 ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [33].

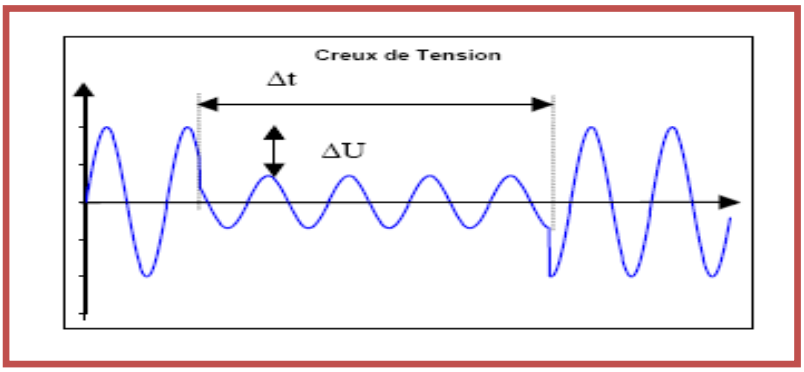


Figure I.1. *Creux et coupure de tension*

III.2.2. Fluctuations 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 situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est 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 un gène visuel perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appeler flicker [33].

Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (III.2).

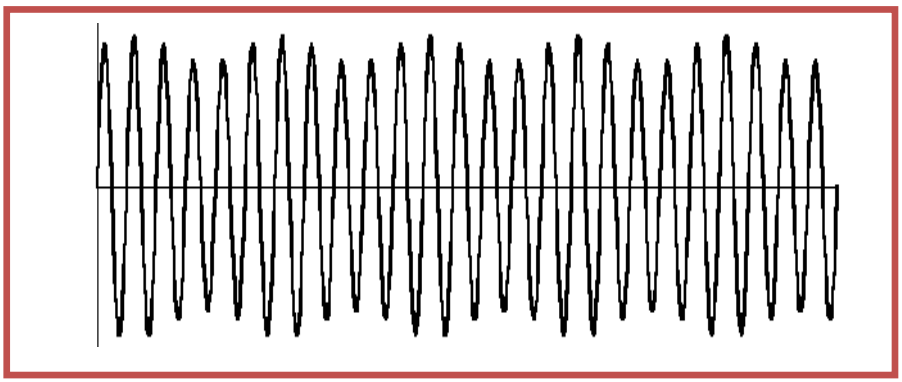


Figure III.2. *Fluctuation de tension*

III.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (III.3). 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 [33].

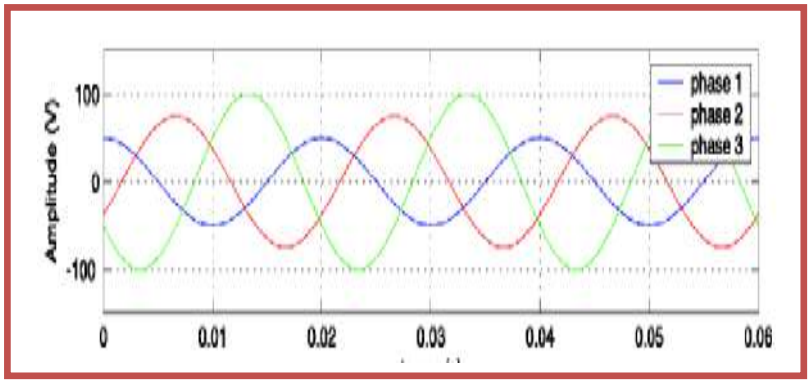


Figure III.3. *Déséquilibre du système triphasé de tension*

III.2 .4. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure (III.4). 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 le réseau. Dans des conditions normales

d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz ±1% [33].

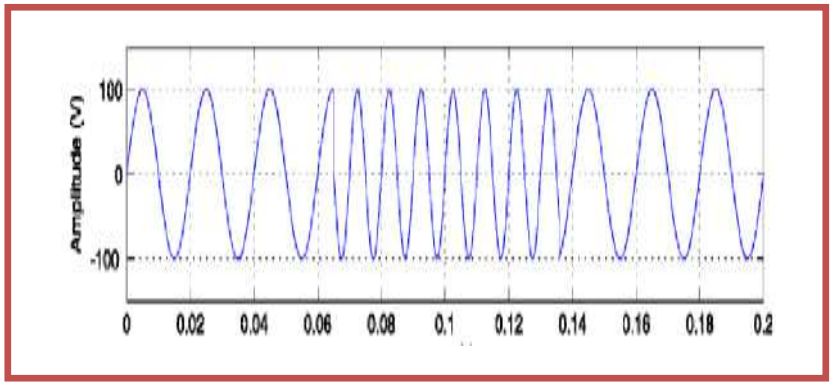


Figure III.4. *Variation de fréquence*

III.2.5. Harmoniques et inter harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La figure III.5. Montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipement de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique. Les perturbations harmoniques feront l'objet d'une étude approfondie tout au long de cette thèse [33].

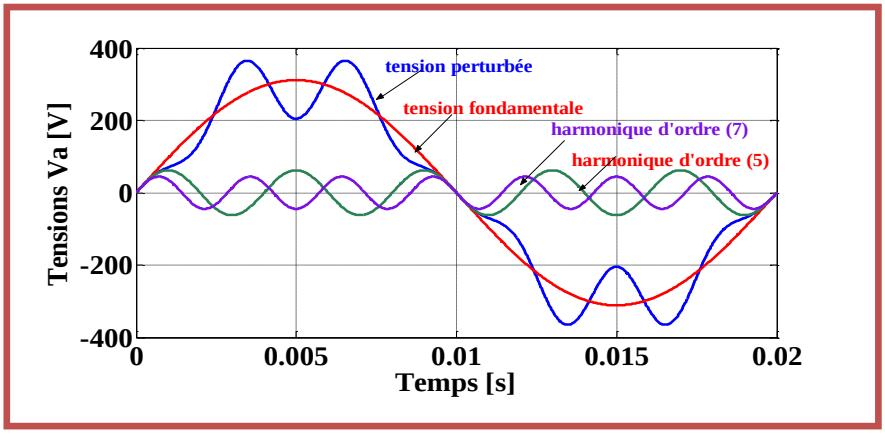


Figure III.5. *Les perturbations électriques*

III.3. Origines des harmoniques

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. [34].

III.4. Grandeurs caractéristiques

III.4.3. Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signaux, périodique de période T=1/f, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n-1}^{\infty}(a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \qquad \text{(III.1)}$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de s(t).

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right).\int f(t).\cos(nwt)dt \qquad \text{(III.2)}$$

Et

$$b_n = \left(\frac{2}{T}\right).\int f(t).\sin(nwt)dt \qquad \text{(III.3)}$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles:

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- si la fonction est impaire, les coefficients an sont nuls.
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

III.4.4. 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 [35] :

$$Y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2} \quad \text{(III.4)}$$

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

III.4.5. Taux de distorsion harmoniques

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante.

Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroit généralement avec la fréquence [34].

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} Y_n^2}}{Y_1} \quad \text{(III.5)}$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension)

Y_n: Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

III.4.7. Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales [33]:

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires)
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances. Une charge est dite non-linéaire si l'on alimente une charge non linéaire par une tension

sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques.

III.5. Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques, qui se propage dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types [34]:

- Les effets instantanés
- Les effets à terme

III.5.1. Effets instantanés

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages [34]:

- Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques: En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils, dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électrique peuvent être affectés.
- Trouble fonctionnel des micro–ordinateur: les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoiresdes moteur d'entrainement de disque.
- Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électrique : certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecteur supplémentaires en présence des harmoniques.
- Vibrations et bruits: les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques.

III.5.2. Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet le plus important est de nature thermique, Il se traduit par un échauffement, il conduit à une fatigue prématurée du matériel des lignes et amènent à un déclassement des équipements [34]:

- Echauffement des câbles et des équipements: ces effets peuvent être à moyen Terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques

années) et concernent les câbles qui peuvent être, le siège des sur échauffements du neutre et les éléments bobinées (transformateurs, moteur …..etc.).

- Echauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes due au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques .Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs : Echauffements causés par les pertes dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

III.6. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par rapport entre la puissance P et puissance apparente S.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties actives P, réactive Q et déformante D, ce dernier est la puissance provoquée par les courants harmoniques, son expression est donnée par l'équation suivante [35]:

$$S = \sqrt{P^2 + D^2 + Q^2} \qquad \text{(III.6)}$$

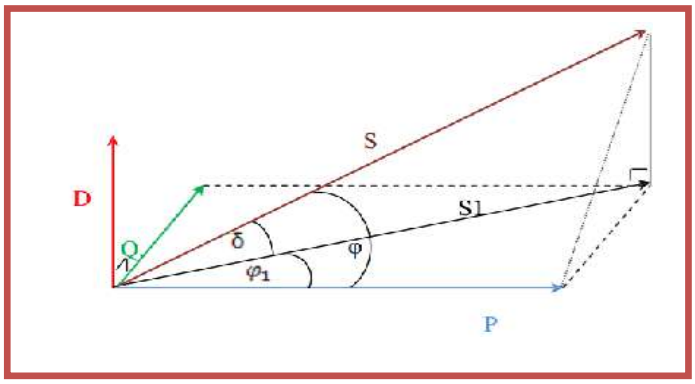


Figure III.6. *Diagramme de Fresnel des puissances*

Où Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

Ou $$P = 3.U.I_1 \cos \varphi_1 \quad \text{(III.7)}$$

φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3.U.I_1 \sin \varphi_1 \quad \text{(III.8)}$$

$$D = 3.U\sqrt{\sum_{h=2}^{n} I_h^2} \quad \text{(III.9)}$$

Finalement le facteur de puissance est donné par l'expression [9]:

$$F_p = \frac{P}{S} = F_{dis} \cos \varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad \text{(III.10)}$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accentue.

III.7. Normes standards

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

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

La CEI a défini une série des normes appelées les normes de la Compatibilité Electromagnétique CEM. La norme IEC 61000 inclut les harmoniques et les inters harmoniques comme des phénomènes électromagnétiques à basse fréquence [4].

TAB. III.1. *Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2) [34].*

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)		
Harmonique impaires		Harmoniques paires	
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	0.23*8/h
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	0.15*15/h		

III.8. Solutions pour la dépollution harmonique

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

III.8.1. Filtrage passif

Le filtrage passif consiste à placer en parallèle sur le réseau une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant (figure III.7.a) et le filtre passif amorti ou passe-haut (figure III.7.b). Le filtre résonant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants [4].

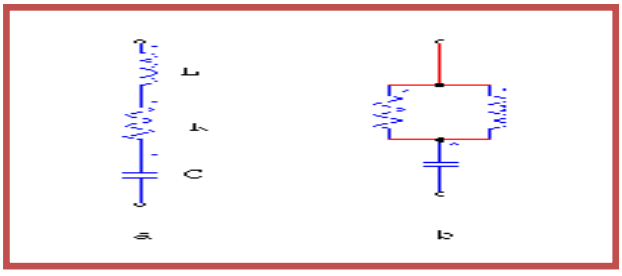


Figure III.7. *(a) Filtre passif résonant(b) Filtre passif amorti*

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

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

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

III.8.2. Filtrage actif

Les filtres actifs sont des convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur) associés à un dispositif de contrôle adapté. Ils sont assimilables à des sources de courant ou de tension qui éliminentdirectement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en oppositions par rapport aux perturbations existantes [4].

III.8.2.1. Filtres actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (III.9), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injectedans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs, produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [36].

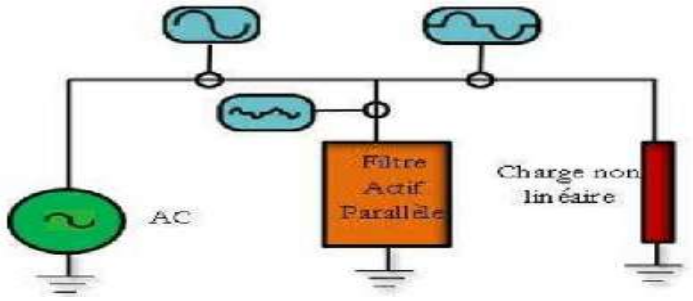


Figure III.8. *Schéma de principe du filtrage actif parallèle*

III.8.2.2. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure (III.10), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale [36].

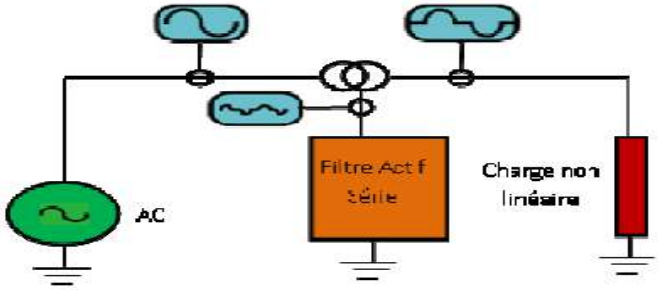


Figure III.9. *Schéma de principe du filtrage actif série*

III.8.2.3. Filtrage à structure hybride

Le filtre hybride est l'association de filtre(s) passif(s)avec filtre actif. Les filtres passifs sont chargés pour éliminer les harmoniques de rangs élevés, tandis que le filtre actif s'occupe des autres rangs d'harmonique. On distingue alors plusieurs types d'association de filtres actifs et passifs, les plus étudiées étant [36] :

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

Les figures (III.11 et 12) montrent la configuration de chaque un de ces types.

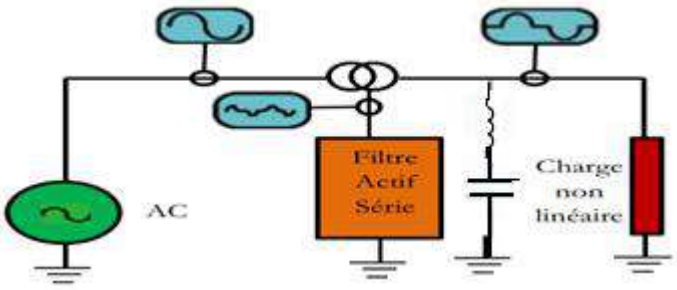


Figure III.10. *Filtre active série et filtre passif parallèle.*

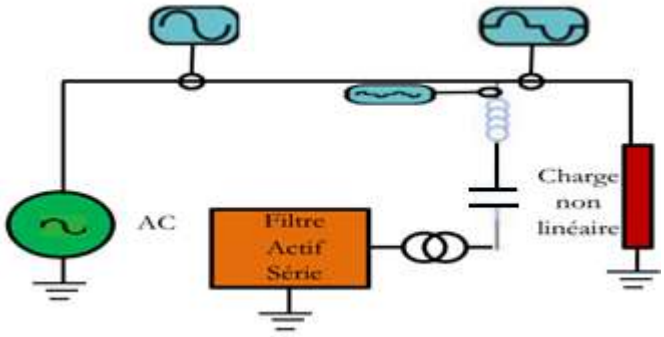


Figure III.11. *Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle*

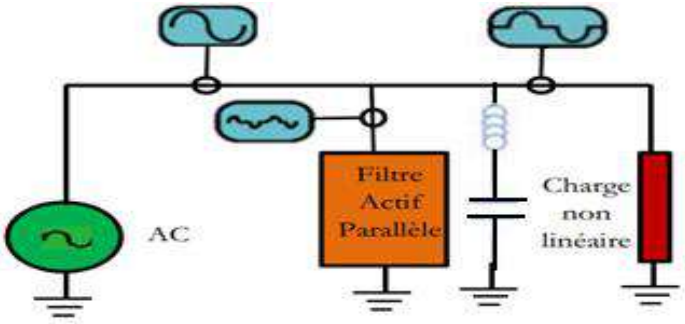


Figure III.12. *Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle*

III.8.2.3. Filtre universel

La combinaison parallèle-série des filtres actifs, aussi appelée, en anglais, Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série profitant des avantages des deux. L'UPQC assure la forme d'onde sinusoïdale pour le courant et de même pour la tension [37].

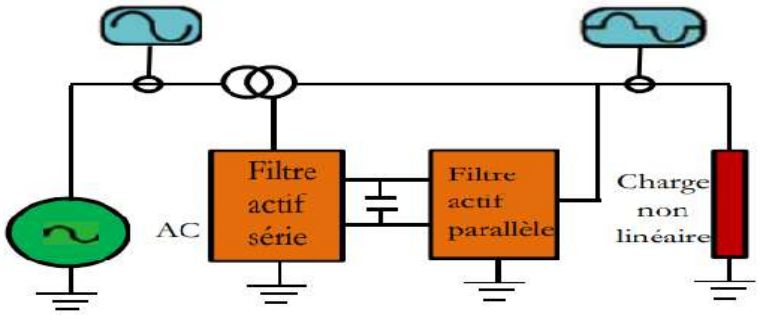


Figure III.13. *Combinaison parallèle-série des filtres actifs*

III.9. Principe de filtrage actif parallèle

Le principe est d'injecter un courant en opposition de phase avec les courants de la charge afin d'obtenir un courant le plus sinusoïdal possible au niveau de la source. En général charge polluante sur le réseau électrique entraîne la circulation de trois composantes de puissance

active, réactive et déformante, le filtre actif peut alors compenser la puissance réactive et la puissance déformante mais cela nécessite une commande lui associe.

La figure (III.15) présente le principe d'un compensateur actif de type parallèle qui permet de compenser les harmoniques de courant de la charge polluante à l'aide d'une source du courant mise en œuvre [38].

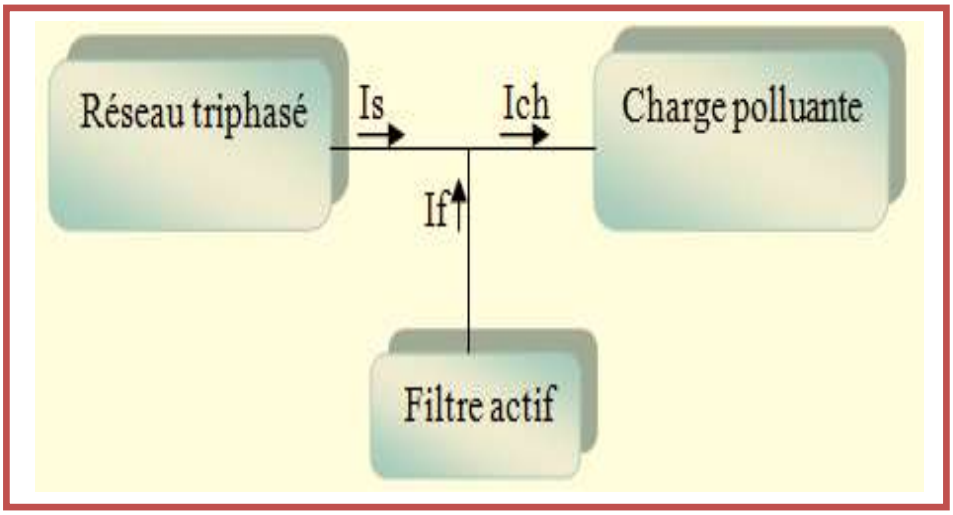


Figure III.14. *Principe du filtre actif parallèle*

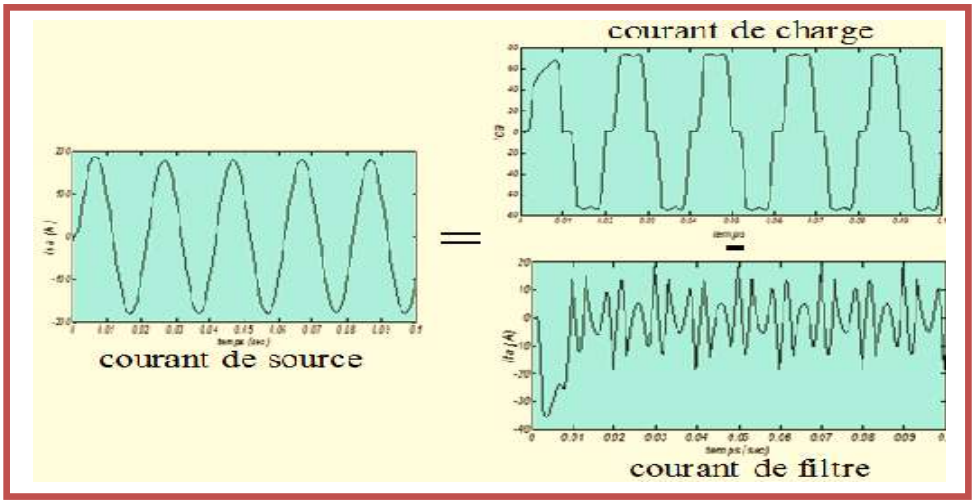


Figure III.15. *Courant de source ,de charge et de filtre*

II.10. Topologie générale

La Figure (III.17) donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

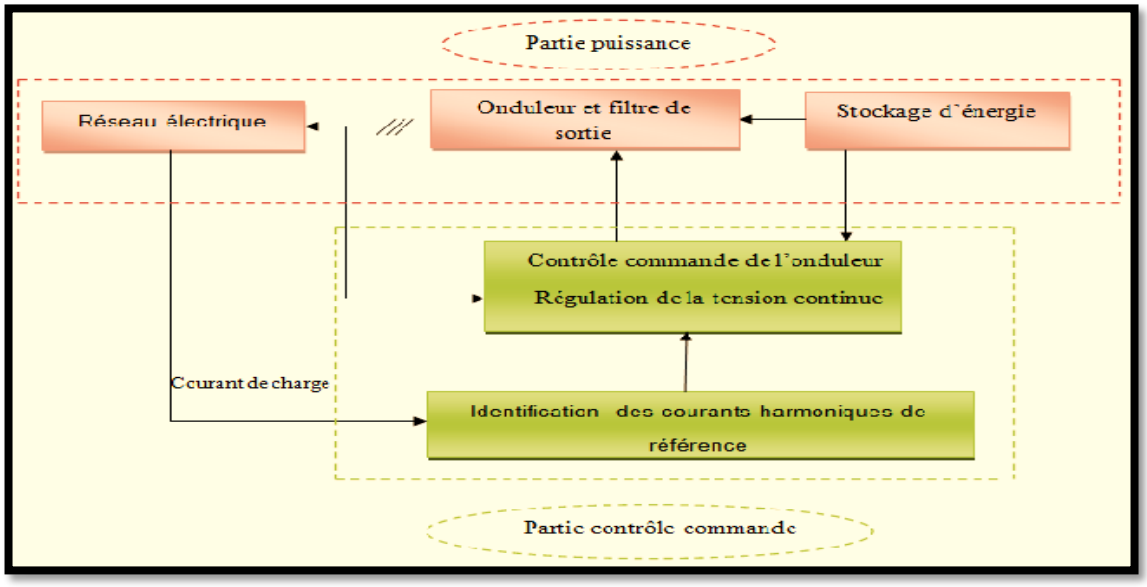


Fig. III.16. *Structure générale du filtre actif parallèle*

La partie puissance est constituée :

- d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc.…) avec des diodes en antiparallèle.
- d'un circuit de stockage d'énergie.
- d'un filtre de sortie.

La partie commande du filtre actif est constituée :

- Détermination des courants harmoniques de la charge polluante
- Commande de l'onduleur du filtre actif ou poursuit des référence de courant
- Régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue.

III.10.1. Etude de la partie contrôle commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées

- identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,
- identification à partir de la détection du courant de la source,
- identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail [4].

III.10.1.1. La méthode d'identification des courants perturbés

La méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée [33].

A. Méthode des puissances instantanées et sa variante

Cette méthode d'identification des courants harmonique, plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser. On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessite de tension sinusoïdale à la fréquence fondamentale. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement $[v_s]$ et des courants de charge $[i_c]$ d'un système triphasé et équilibré par [39] :

$$[v_s]=\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \text{et} \quad [v_s]=\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \tag{III.16}$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des cordonnées α-β est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \tag{III.17}$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.18)}$$

Les puissance réelle et imginaire instantanées , notées respectivement p et q ,sont définies par relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(III.19)}$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés , on obtient :

$$p = v_{s\alpha} i_{c\alpha} + v_{s\beta} i_{c\beta} = v_{sa} i_{ca} + v_{sb} i_{cb} + v_{sc} i_{cc} \quad \text{(III.20)}$$

De méme ,pour la puissance imaginaire on a :

$$q = v_{s\alpha} i_{c\beta} - v_{s\beta} i_{c\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} + v_{sb}) i_{cc} - (v_{sb} - v_{sc}) i_{ca} + (v_{sc} + v_{sa}) i_{cb}] \quad \text{(III.21)}$$

A partir de l'expression (III.19) , en posant :

$\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{\beta}^2$On a :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\} \quad \text{(III.22)}$$

Ou alors :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.23)}$$

Avec :

$$i_{c\alpha p} = \frac{v_{s\alpha}}{\Delta} p \qquad i_{c\alpha q} = -\frac{v_{s\beta}}{\Delta} q \quad \text{(III.24)}$$

$$i_{c\beta p} = \frac{v_{s\alpha}}{\Delta} p \qquad i_{c\beta q} = -\frac{v_{s\beta}}{\Delta} q \quad \text{(III.25)}$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha} \\ q_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha} \\ v_{s\beta} i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha p} \\ v_{s\beta} i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha q} \\ v_{s\beta} i_{c\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{\alpha p} \\ q_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{\alpha q} \\ q_{\beta q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.26)}$$

$$\begin{cases} p_{\alpha p} = \frac{v_{s\alpha}^2}{\Delta} \; p \qquad p_{\alpha q} = -\frac{v_{s\alpha} v_{s\beta}}{\Delta} q \\ p_{\alpha\beta} = \frac{v_{s\beta}^2}{\Delta} \; p p_{\beta q} = \frac{v_{s\alpha} v_{s\beta}}{\Delta} q \end{cases} \quad \text{(III.27)}$$

$p_{\alpha p}$: puissance instantanée selon l'axe α .

$p_{\beta p}$: puissance instantanée selon l'axe β.

$p_{\alpha q}$:puissance instantanée selon l'axe α .

$p_{\beta q}$: puissance instantanée selon l'axe β.

D'après les expressions (III.27) , on peut écrire :

$$p = p_{\alpha p} + p_{\beta p} + p_{\alpha q} + p_{\beta q} = p_{\alpha p} + p_{\beta p} \qquad \text{(III.28)}$$

L'anlyse de l'équation (III.28) nous ramène aux conclusions suivantes :

La somme des puissances instantanées $p_{\alpha p}$ et $p_{\beta p}$ coincide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanées qui dépend de q . Ces puissances $p_{\alpha q}$ et $p_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent acune contribution au transfert de puissance instantanées entre la source et la charge [39] .

Dans le cas ou les tension sont sinusoidales et aliment une charge non linéaire , les puissance instantanées p et q ont pour exxpresion **:**

$$\begin{cases} P = \tilde{p} + \bar{p} \\ q = \tilde{q} + \bar{q} \end{cases} \qquad \text{(III.29)}$$

Avec

$\bar{p}$: puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant .

$\bar{q}$: puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant .

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$: puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant .

En considérant les équations (III.23) et (III.29) , nous pouvons séparer le courant dans le repère (α_β) en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmonique . Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\nabla}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\nabla}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\nabla}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.30)}$$

- Séparation des puissances

il est évident , d'après la relation (III.30) , que pour identifier une des trois composantes , par exemple les courants harmonique , les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux méthodes de filtrage illustré sur la figure (III.21) [39].

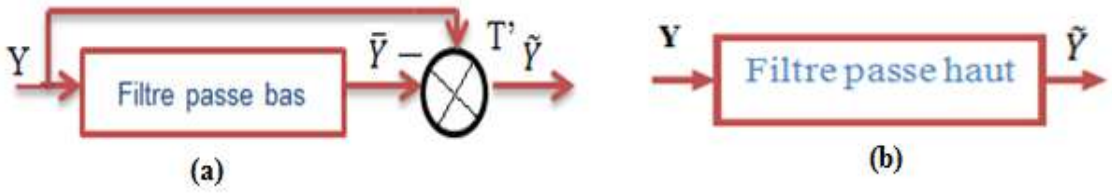


Figure III.17. *Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes alternatives de p et q*

Les courants harmoniques triphasés $i_{fk}^{*}(k=a,b,c)$ sont obtenue à partir des courants diphasés $i_{f\alpha}^{*}$et $i_{f\beta}^{*}$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^{*} \\ i_{fb}^{*} \\ i_{fc}^{*} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{*} \\ i_{f\beta}^{*} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.31)}$$

Si V et I_a représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamentale et ϕ_a, le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{p} = 3VI_{ca}\cos\phi_a \\ \bar{q} = 3VI_{ca}\sin\phi_a \end{cases} \qquad \text{(III.32)}$$

Les termes $\bar{p}$ et$\bar{q}$ sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle.

De cette manière, éliminer les courants harmonique revient à compenser les composants alternative $\tilde{p}$ et$\tilde{q}$. La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue [35.39].

- Cas d'un onduleur de tension deux niveux

Le circuit de puissance d'un onduleur de tension deux niveux à IGBT , placé entre un réseau triphasé et une charge non _ linéaire polluante en pont de Graetz à 6 thyristors , est représenté sur la figure. C'est un filtre actif à base de l'onduleur de tension deux niveaux étudié dans le Chap II [39].

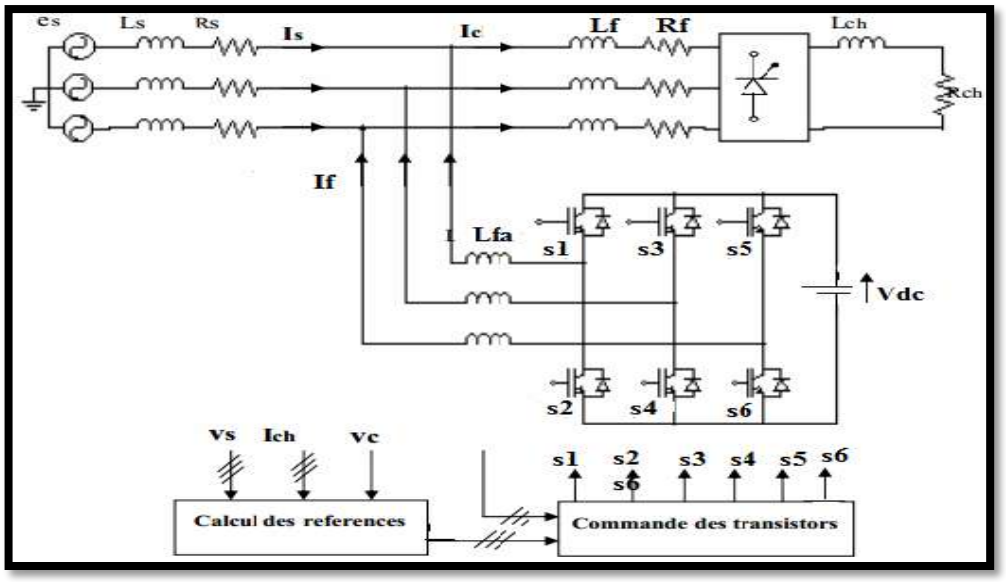


Figure III.18. *Circuit de puissance du filtre actif parallèle à deux niveaux propose*

Avec :

i_s, courant de la source d'alimentation.

v_s, tension au point de raccordement commun.

v_{FA}, i_{FA}, L_{FA}, Tension, courant et inductance du filtre actif.

i_c, L_F, id_c, Courant, inductance amont et courant aval au pont de Graëtz constituant la charge polluante.

- Algorithme "P_Q" d'extraction des courants harmoniques

Le schéma de la figure III.30 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [39].

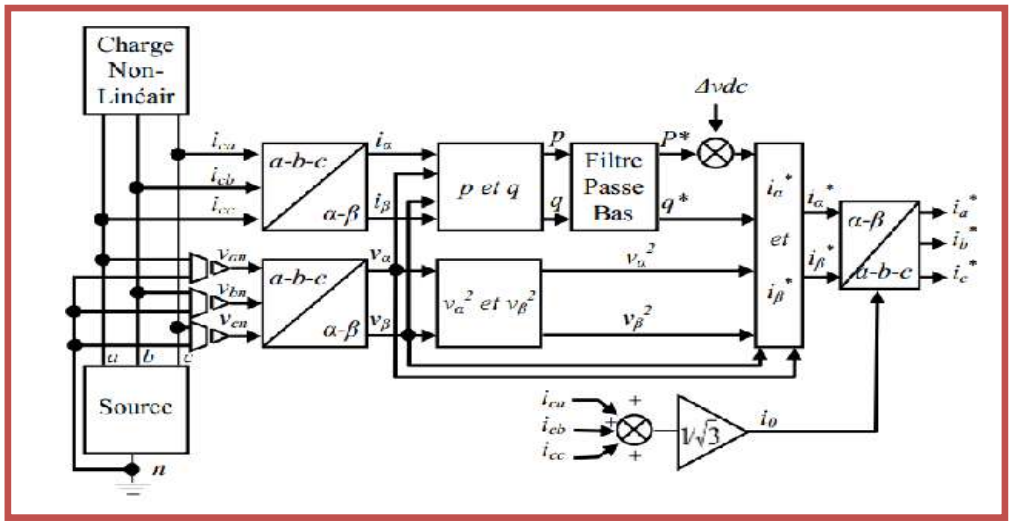


Figure III.19. *Algorithme "P_Q" d'extraction des courants harmoniques.*

La théorie″ p_ q″ présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire. L'extraction des courants des harmoniques dans les applications monophasées ne pas être réalisée par cette méthode .Elle est applicable dans le cas où les tensions V_{sabc} sont déformées, à condition des filtres les ondulations présentées sur le module du vecteur$V_{s\alpha\beta}$, ($\sqrt{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2}$).

- Résultats de simulation

Caractéristiques du courants de source avant filtrage actif

Cet algorithme d'identification est utilisé pour extraire les courants harmoniques générés par le redresseur de la figure (III.22) :

Le modèle du filtre actif paralléle (FAP) est développé le bloc MATLB/Simulink. Les graphes du courant de source avant application du filtre actif sont représentés sur les figures (III.24,25). On constate une distorsion symétrique du courant isa par rapport au point de demi période (figure III.24), ce qui signifie que les harmonique multiple de 2 et 3 sont inexistants dans le spectre de isa et que seuls ceux de rangs (6h $\pm$ 1) sont présents, ceci est confirmé par le spectre isa (figure III.24) représentant les 30 premiers harmoniques les plus significatifs, avec un THD (i_{sa}) de 20.12 % pour une durée d'observation de 0.1.

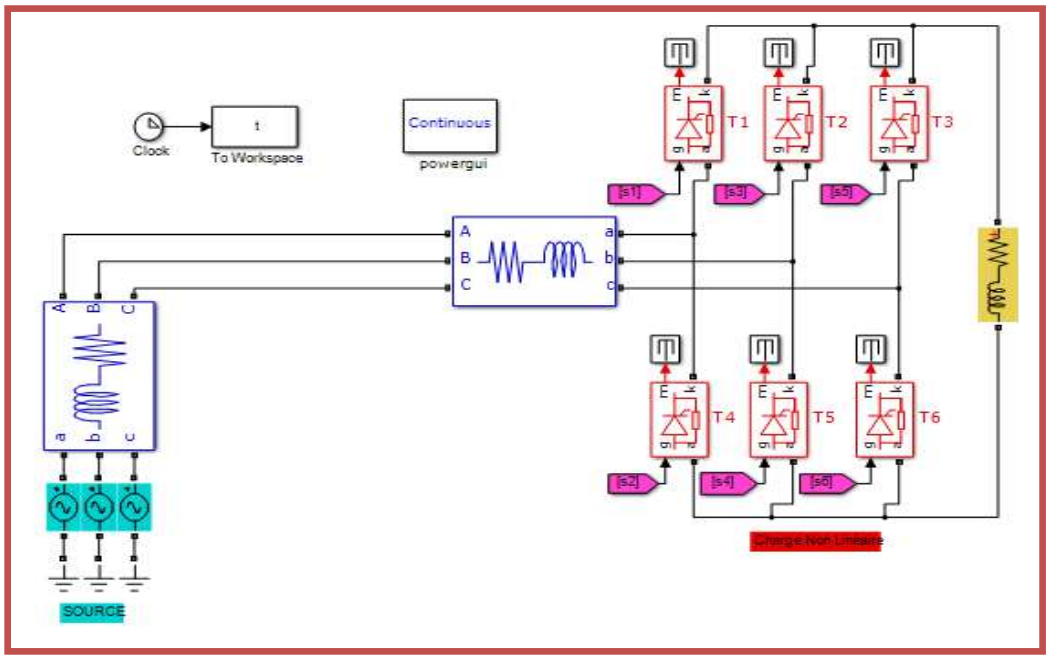


Figure III.20. *Alimentation direct dans une charge non linéaire sans filtre actif.*

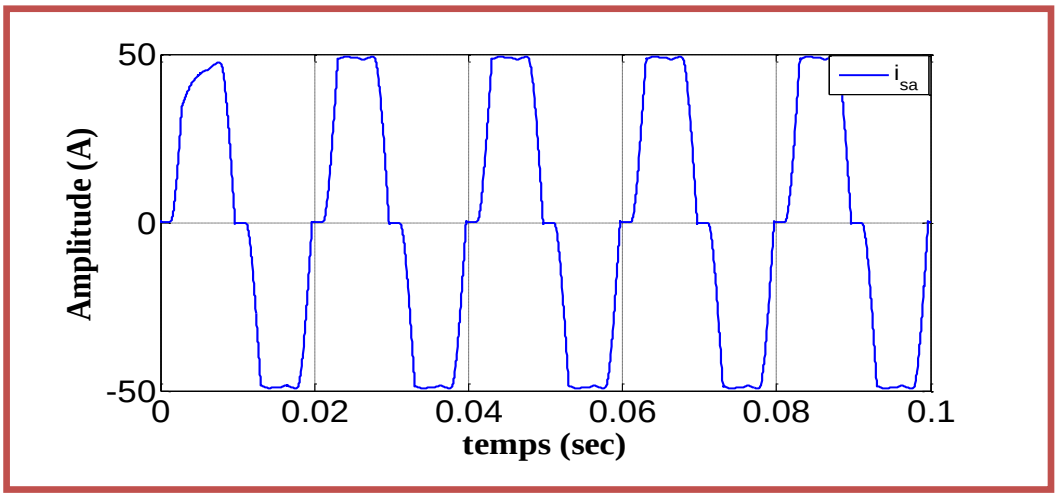


Figure III.21. *Allure de isa avant filtrage actif*

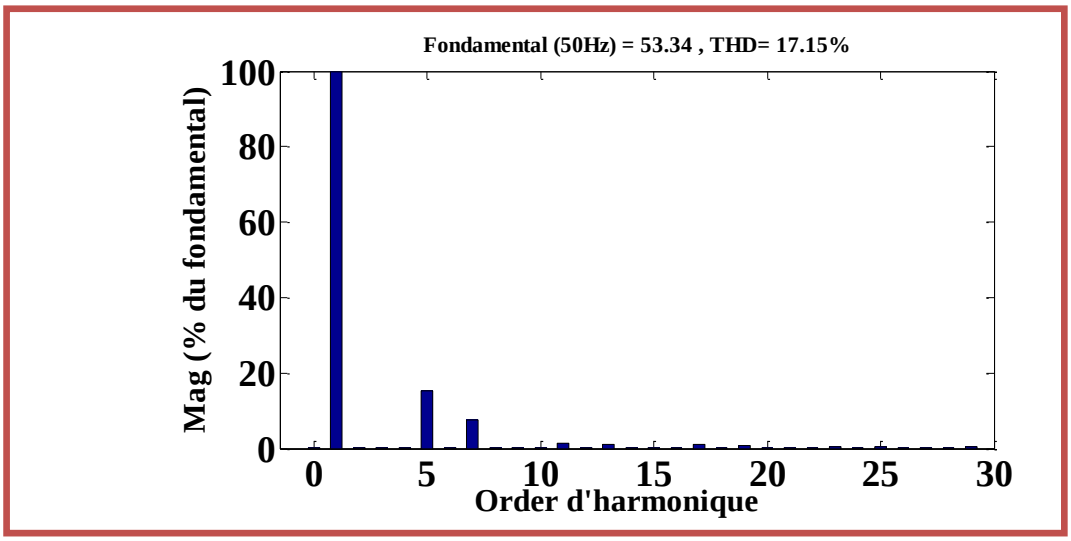


Figure.III.22. *Spectre harmonique de isa.*

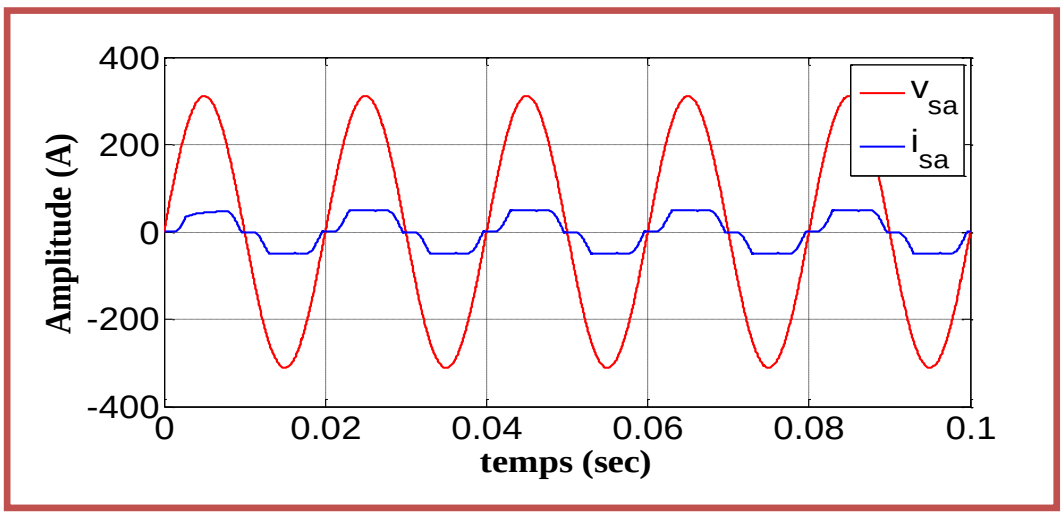


Figure III.23. *Courant de i_{sa} déphasé de la tension V_{sa}*

La distorsion harmonique n'est pas le seul problème rencontré ici car la figure (III.24) indique une dégradation au niveau du facteur de puissance (retard estimé à 0.02 s, φ=30° , soit cos φ=0.86), ainsi on peut s'attendre à une fluctuation dans l'énergie réactive du système.

- Caractéristique du courant de source après filtrage actif

Nous supposons que la tension d'alimentation est définie par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_a = 50 + \sqrt{2}.220\sin(wt) + \frac{\sqrt{2}.220}{7}\sin(7wt) \\ v_b = 50 + \sqrt{2}.220\sin(wt - \frac{2\pi}{3}) + \frac{\sqrt{2}.220}{7}\sin(7wt - \frac{2\pi}{3}) \\ v_b = 50 + \sqrt{2}.220\sin(wt - \frac{2\pi}{3}) + \frac{\sqrt{2}.220}{7}\sin(7wt - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{(III.33)}$$

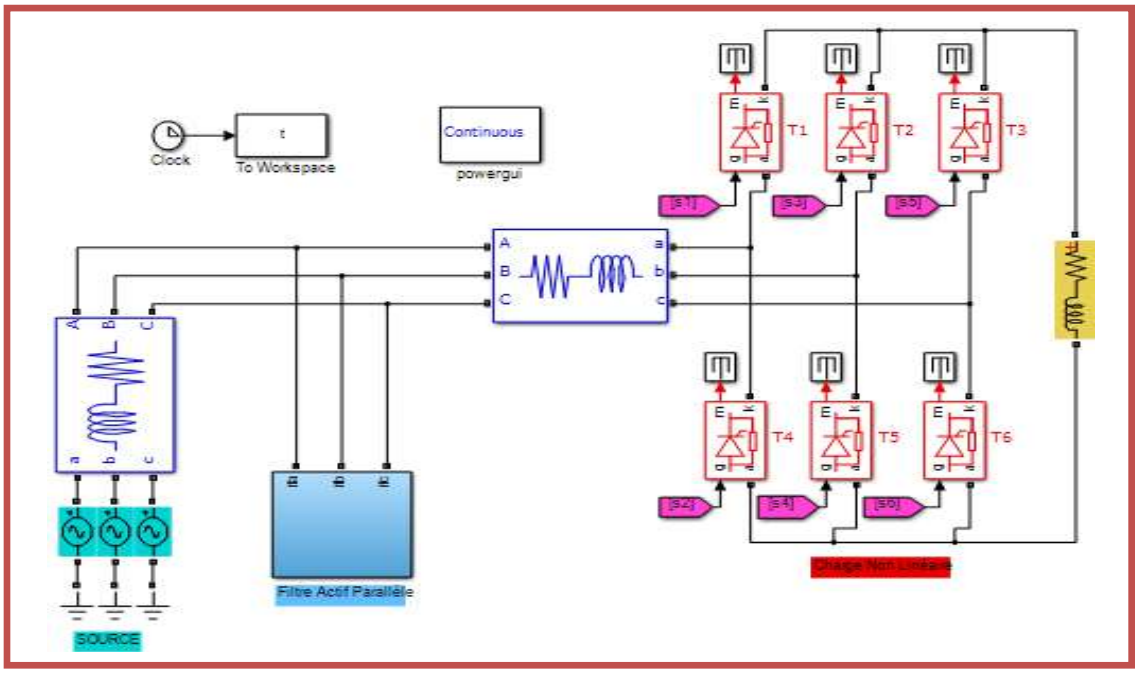


Figure III.24. *Modèle du filtre actif parallèle à deux niveaux établi sous Matlab –Simulink .*

Pour la simulation du modèle de la figure (III.26) sous Matlab –Simulink, on va se contenter de l'étude du courant et de la tension seulement dans la phase α , sachant que ceux des deux autres phases sont retardés par rapport à la phase a de 120° et 240° respectivement .

Pour améliorer la forme d'onde de i_{sa} , on a inséré l'inductance L_F de 1.7 mH en amont de la charge polluante , comme indiqué figure III.23. le résultat était satsfaisant puisque les déformations ont été réduites et il en est même pour le THD (i_{sa}) avec un nouveau taux de 2.58 % , comme illustré dans les figure (III.26 et 27).

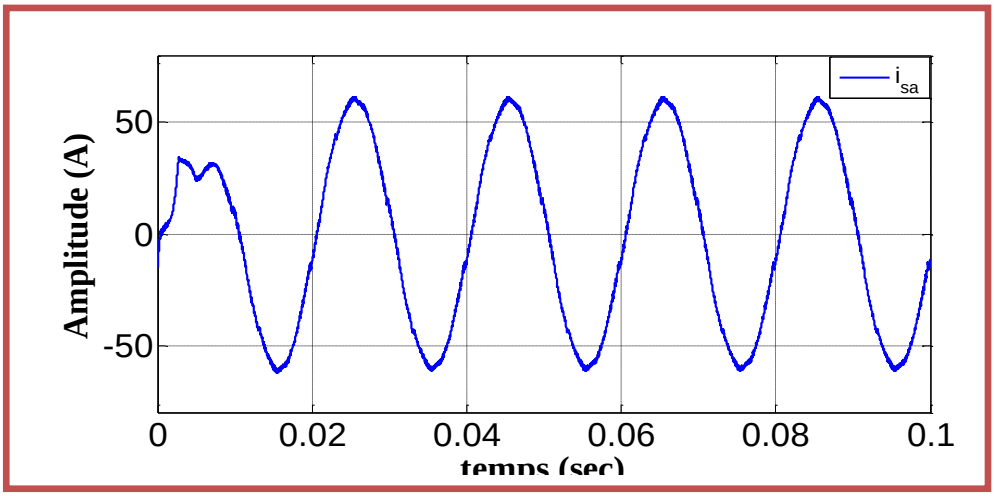


Figure III.25. *Allure de isa après filtrage actif deux niveaux*

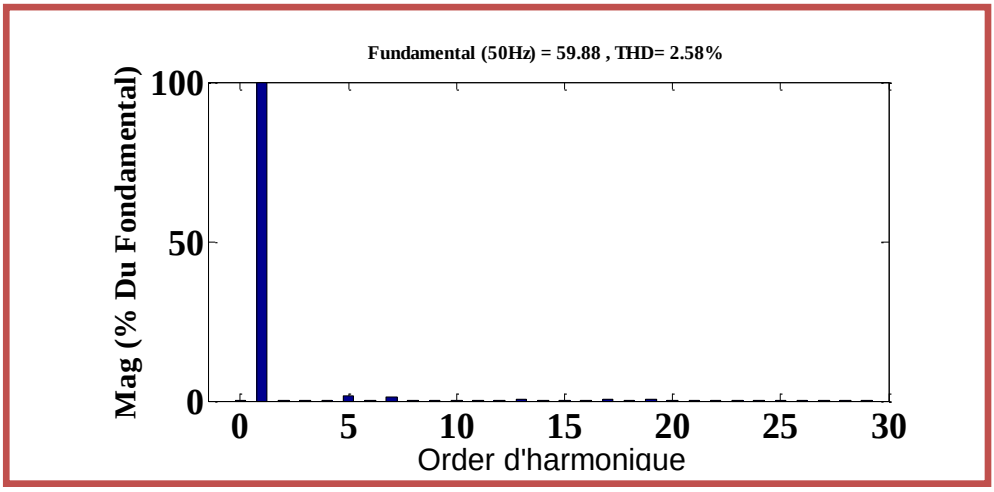


Figure III.26. *Spectre harmonique dei*$_{sa}$.

Du côté source , les deux courbes de la figure(III. 27),représentant le courant et la tension de source très proche de l'unité, indique un cosφ corrigé . par conséquent , on peut déduire que le réactif du réseau a été composé.

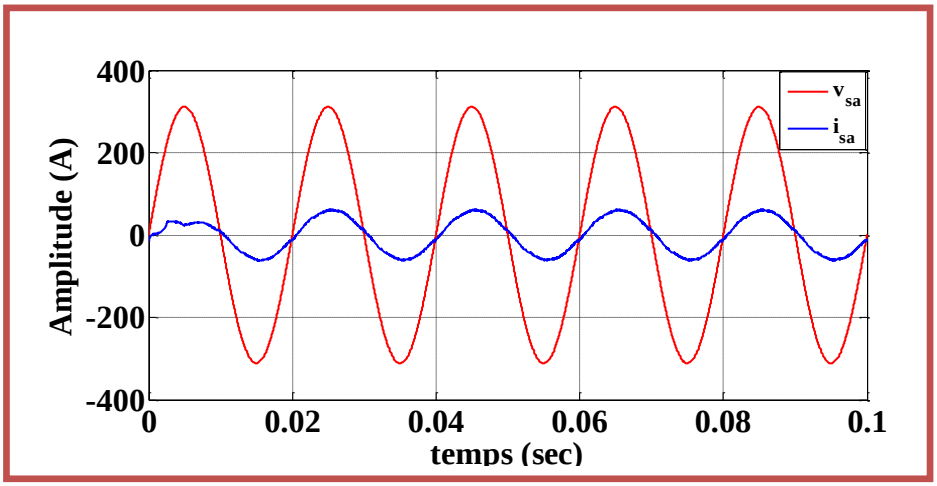


Figure III.27. *Allure de isa et vsa après filtrage actif.*

Dans la figure (III.27), on montre le nouveau courant i_{sa} et la tension de source vsa. les deux ondes sont en phase , malgré la présence d'un léger décalage (retard de isa par rapport à vsa) engendré par L_F. ceci induit un facteur de puissance proche de l'unité (cosφ =0.98), donc une bonne compensation de la puissance réactive de la source.

Le fait que i_{sa} ait récupéré son allure sinusoïdale nous rassure que le filtre actif a généré un courant i_{fa}^{*} qui suit bien sa référence i_{fa} , comme indiqué par les deux courbes de la figure(III.32).

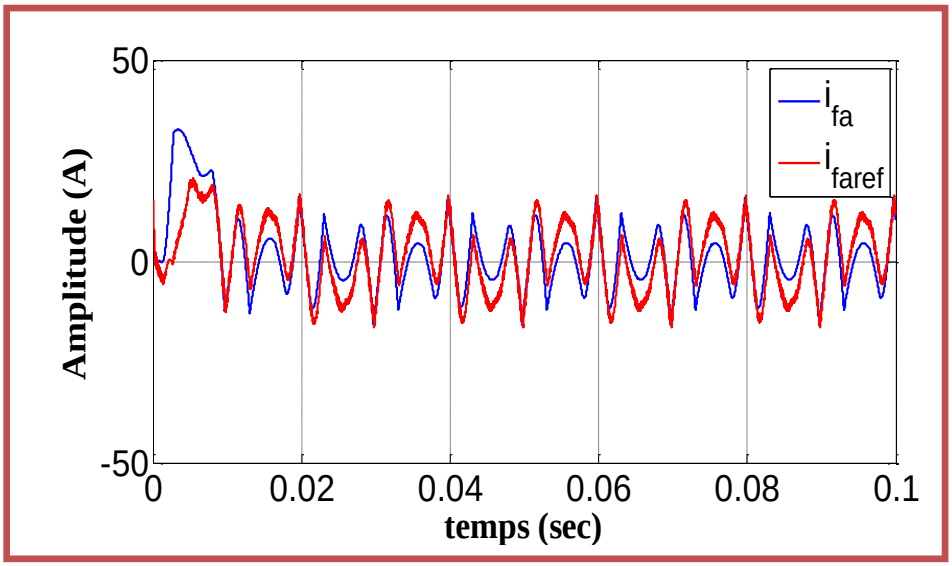


Figure III.28. *Courant généré par le filtre actif i_{fa} et sa référence i_{fa}^{*}*

La figure(III.29) représentent les formes d'ondes des courants et de la tension dans lesdifférentes branches du circuit de la figure (III.22), i_{ca}courant consommé par le redresseur, i_{fa}courant injecté par le filtre actif, i_{sa} courant fournit par la source (réseau).

Les déformation dans la forme de i_{sa} se situent dans les points d'intersection non nulles de i_{ca} et i_{fa} , comme on peut le voir dans la figure (III.28).

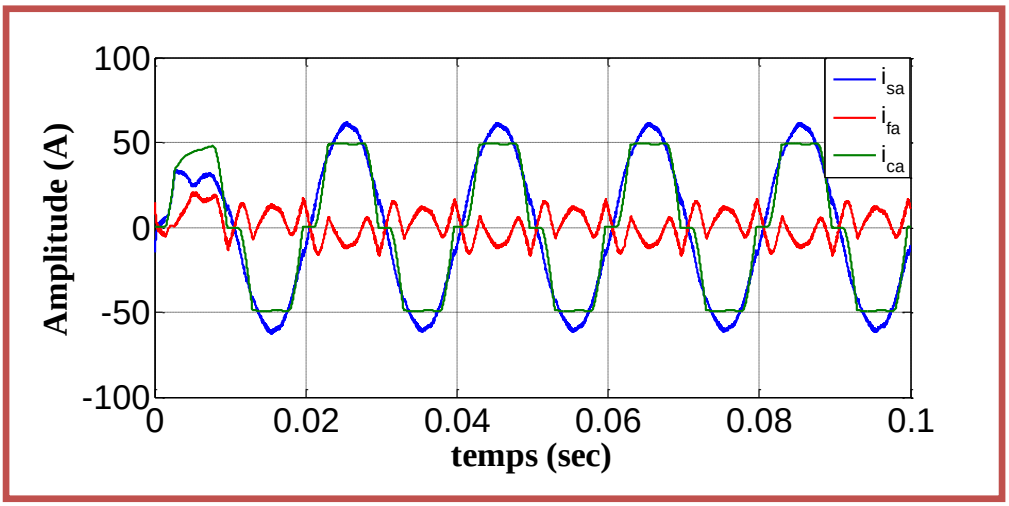


Figure III.29. *Courant de source i_{sa} ,de charge non-linéaire i_{ca} et celui du filtre actif i_{ha}*

La figure (III.25) Représente le spectre harmonique du courant de charge dont la valeur du THD est de 17.15 % cependant , spectre harmonique du courant de la source représenté par la figure (III.26), montre que le THD baisse à à 2.58 % et ce qui prouve la bonne qualité de filtrage.

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes (les filtres actifs parallèles).

Nous avons présenté le principe et simulation d'un filtrage actif parallèle. La méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées a été utilisée pour générer les courants de références. La méthode d'identification utilisée s'adapte bien aux variations de la charge non linéaire.

Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique en ce qui concerne les harmoniques générées par la charge non linéaire.

Chapitre IV :

Etude et analyse d'un système éolien connecter au réseau avec filtrage

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous associons au point de raccordement de l'éolienne un filtre actif parallèle. Le filtre actif parallèle va filtrer les harmoniques produites par les charges alimentées par le réseau. Dans notre cas, nous avons placé un pont redresseur à thyristor comme charge polluante ; le filtre compensera les courants harmoniques générés par cette charge.

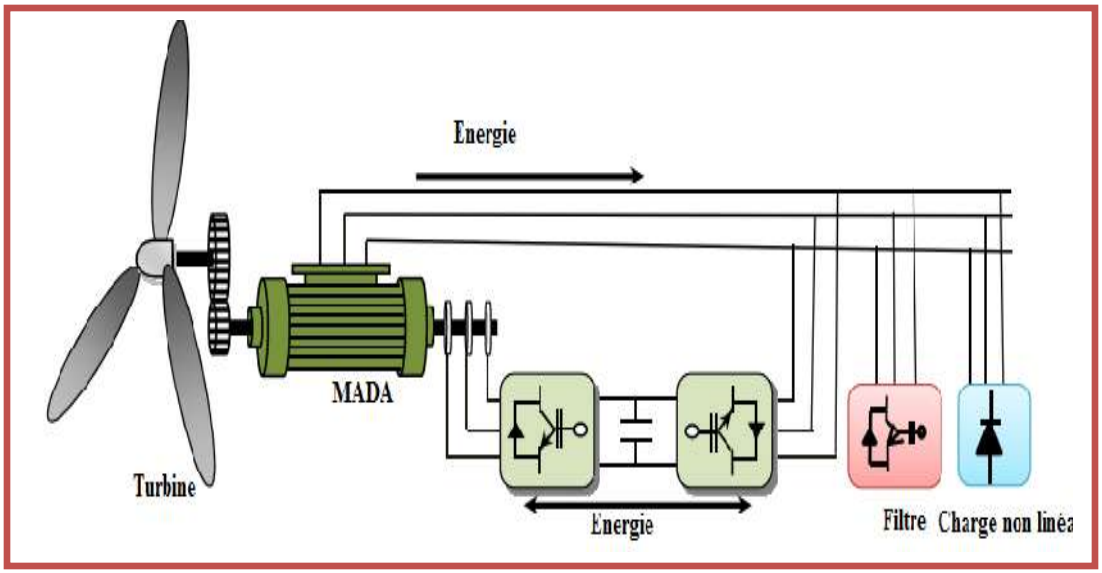


Figure IV.1. *Schéma du système avec filtre actif parallèle*

IV.2. Les résultat de la chaine éolienne

Le teste de performance de la chaine éolienne est fait en considérant un vent de vitesse variable qui touche aux trois zones de fonctionnement de l'éolienne. La machine étant raccordée à un réseau de grande puissance d'une tension nominale efficace de 400 V et d'une fréquence de 50 Hz. Les résultats de simulation de toute la chaine éolienne sont représentés sur les figures ci-dessous.

Le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne a plusieurs valeurs Le coefficient de puissance est obtenu pour différant angles de calage qui nous donne un Lambda = 8.1. On remarque que le Coefficient Cp atteint une valeur moyenne de 0.48, on cherche à le garder au maximum possible dont le but de maximiser la production. Il varie légèrement selon la variation de la vitesse du vent.

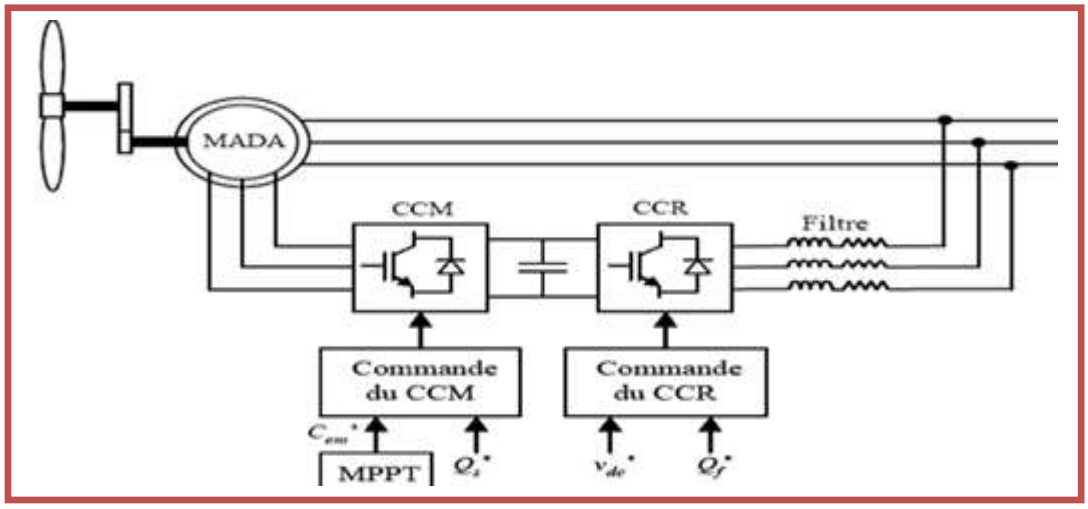


Figure IV.2. *Architecture de commande du système éolien.*

IV.2.1. Simulation de la PLL avec MATLAB-Simulink

Diverses perturbations peuvent survenir sur le réseau électrique (creux de tension, saut de phase, harmoniques, déséquilibre) ; le système de synchronisation a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale. L'étude de la synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau est à base de la PLL triphasée, qui consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe (q) générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park (θ_{est}). En régime établi l'angle (θ_{est}) est égal à l'angle θ du réseau.

Le schéma simplifié de régulation et de simulation de la PLL dans domaine de Park est donné par la (Figure IV.3) :

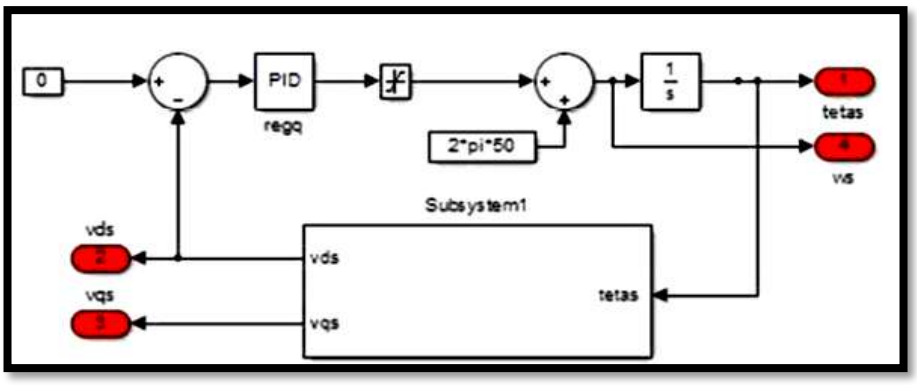


Figure IV.3. *Schéma block Simulink de la de la PLL*

Caractéristiques des tensions du réseau vdr et vqr exprimés dans le domaine de Park

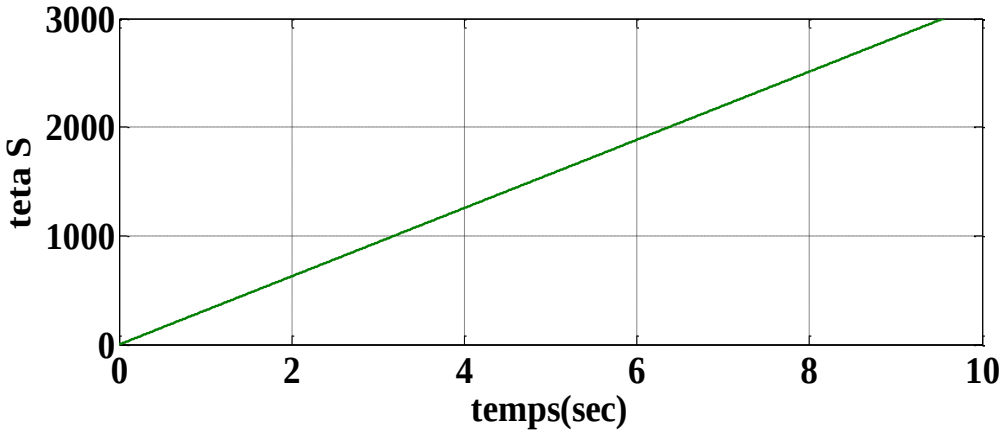


Figure. IV.4. *Caractéristique la position (rad)*

IV.2. 2 .Régulateur PI

La rapidité et la simplicité du régulateur PI constituent ses principales performances pour lesquelles on l'utilise dans la commande de la MADA.

Le schéma suivant montre la boucle de régulation du système corrigé par le PI, K_p et K_i représentent respectivement la constante de temps de dosage de la corrélation d'intégration et la constante de temps d'intégration [40].

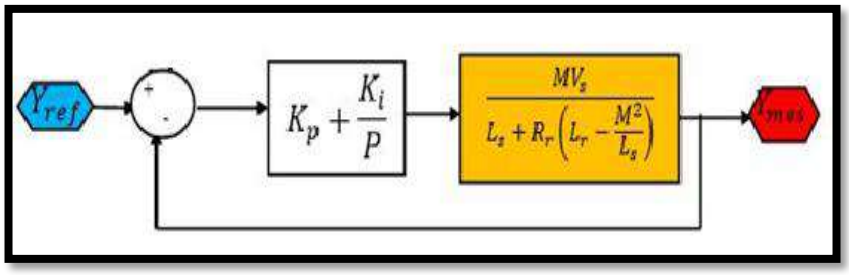


Figure IV.5. *Schéma de régulation par PI*

Sa fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) est de la forme:

$$FTBO = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} * \frac{\frac{MV_s}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{p + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \qquad \text{(IV.13)}$$

Afin de supprimer le zéro dans la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse de correcteur, ce qui se traduit par :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_r R_r}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)} \tag{IV.14}$$

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante:

$$FTBO = \frac{K_p \frac{MV_s}{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}}{p} \tag{IV.15}$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBO = \frac{1}{1+\tau_r p}\ , \tau_r = \frac{1}{K_p}\frac{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{s}\right)}{MV_s} \tag{IV.16}$$

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse:

$$K_p = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{s}\right)}{MV_s} \quad K_i = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_s R_r}{MV_s} \tag{IV.17}$$

IV.2.3. Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Cette technique consiste à ajuster la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice afin d'obtenir le maximum de puissance générée, donc le maximum du couple électromagnétique, qui correspond à la zone V de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne.

La puissance mécanique de la génératrice est donnée par :

$$p_{mec} = C_{mec}\Omega_{mec} \tag{IV.18}$$

On suppose que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence [40].

$$C_{em} = C_{emref} \tag{IV.19}$$

Le couple électromagnétique de référence C_{emref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est donné par la relation suivante :

$$C_{emref} = PI.(w_{ref} - \Omega_{mec}) \tag{IV.20}$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer($\Omega_{turbine-ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G\Omega_{turbine-ref} \tag{IV.21}$$

La référence de la vitesse de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximale du couple C_{pmax} est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{nom}.V_1}{R} \tag{IV.22}$$

Pour l'asservissement de la vitesse, nous utilisons un régulateur proportionnel intégral (PI).

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux taches :

- asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence ;
- atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entré perturbatrice.

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par (la figue IV.6).

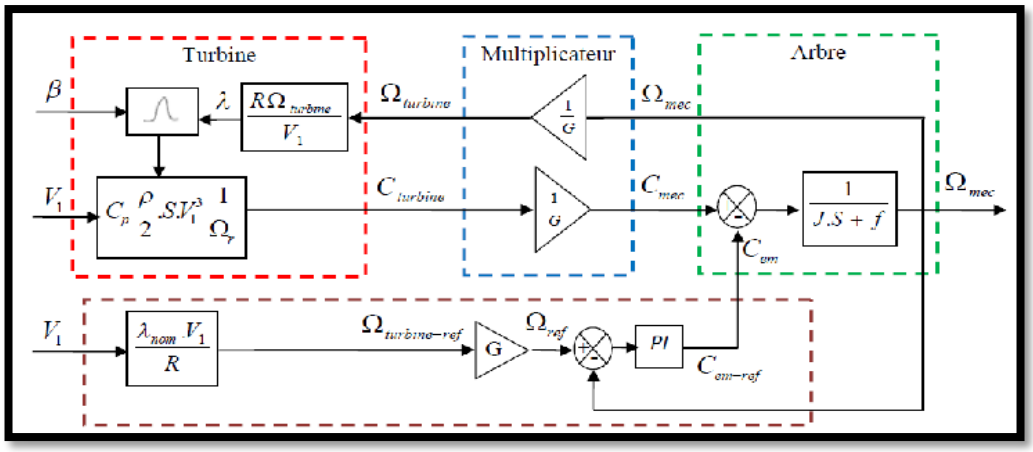


Figure IV.6. *Schéma bloc de maximisation de la puissance extraite avec asservissement de Vitesse*

On remarque que la variation de la puissance électrique est en permanence adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et ce dernier est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonctionne de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite. La puissance extraite est maximal pour les différentes variations de vitesse du vent jusqu'à une valeur limite correspondante à la vitesse nominal de la machine.

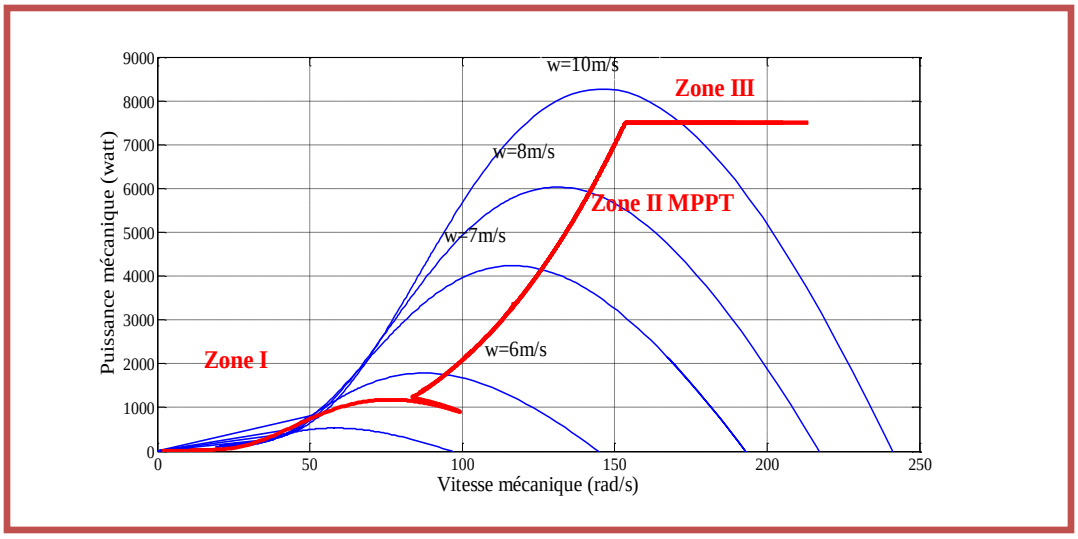


Figure IV.7. *Puissance mécanique de l'éolienne*

IV.2.4. Simulation et interprétation des résultats

Nous allons simuler notre système coté MADA et coté réseau à l'aide des contrôleurs PI et Flous, les résultats de simulation trouvé est indiqué comme suite.

A- Coté rotor « CCM »

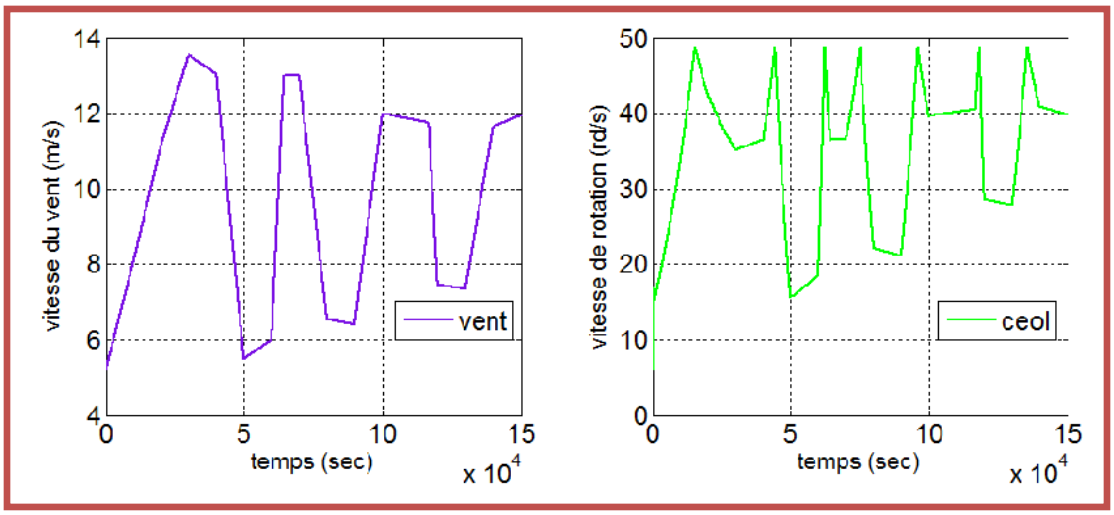


Figure IV.8. *Vitesse du vent de la MADA et la vitesse mécanique*

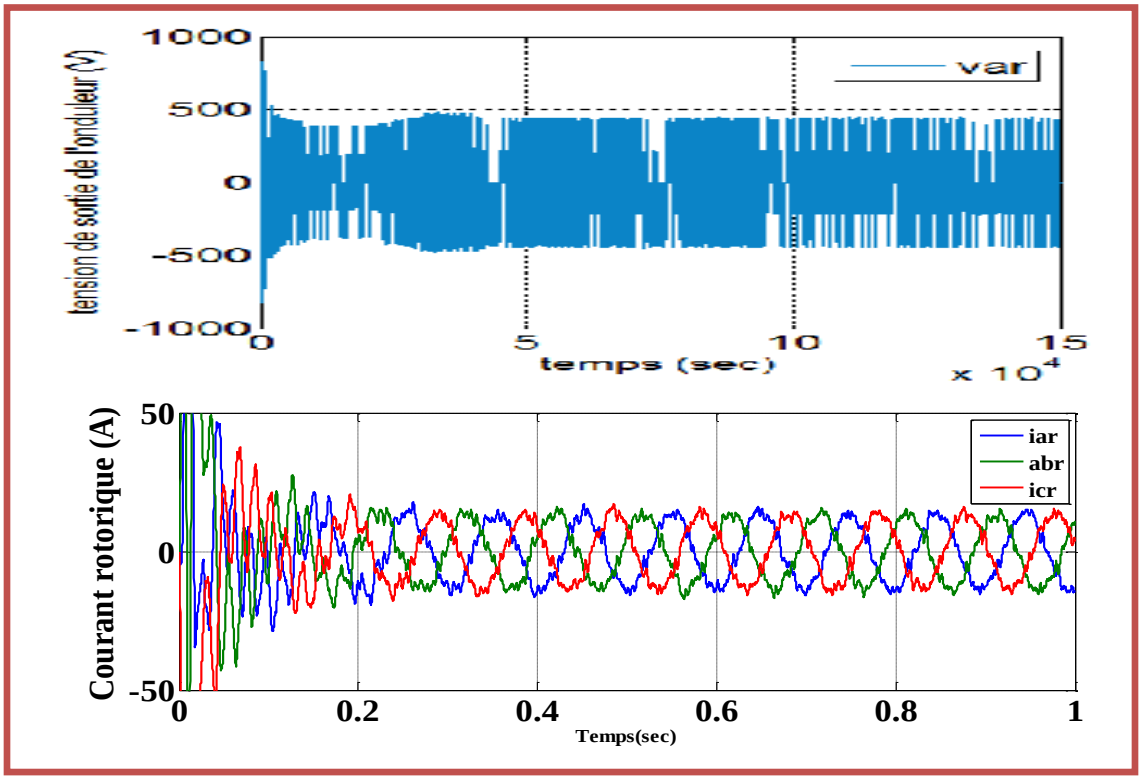


Figure IV.9. *Tension et courant rotorique de la MADA*

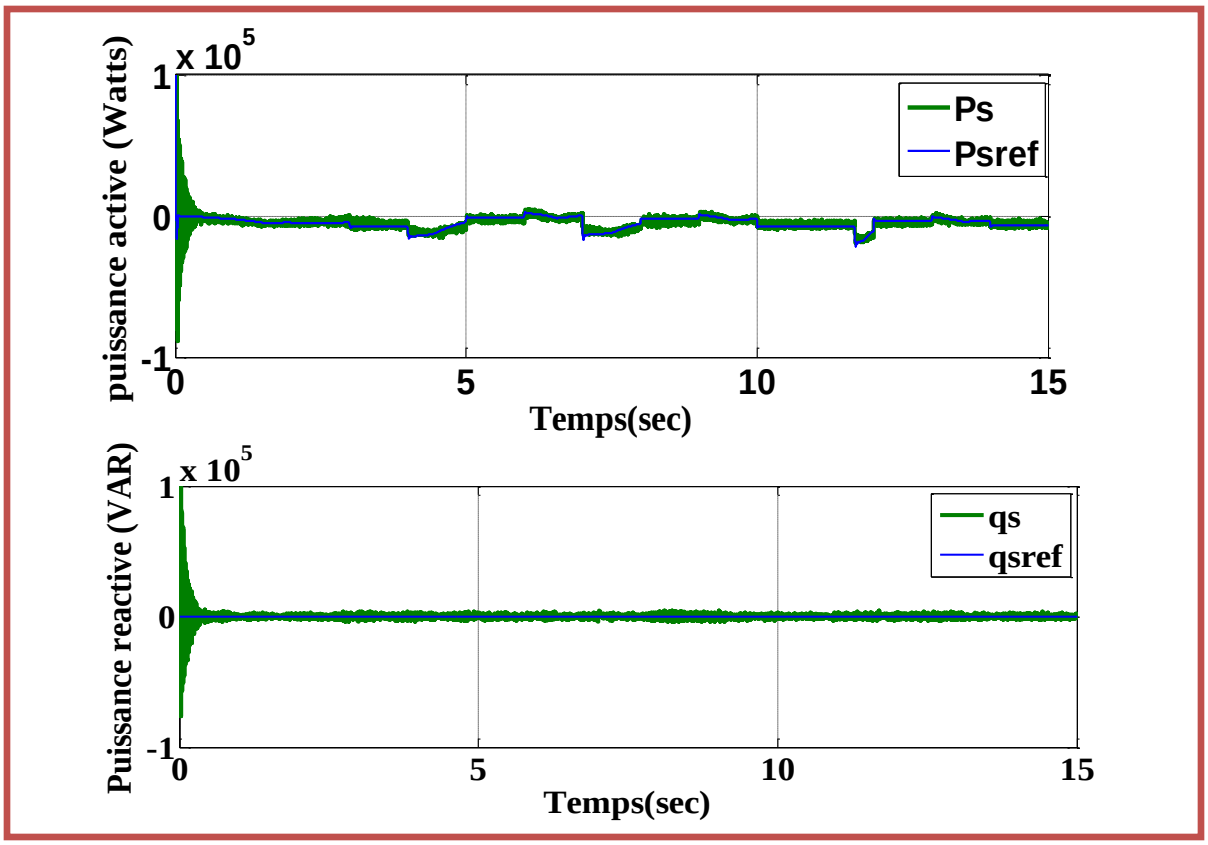


Figure IV.10. *Puissance active et réactive de la MADA*

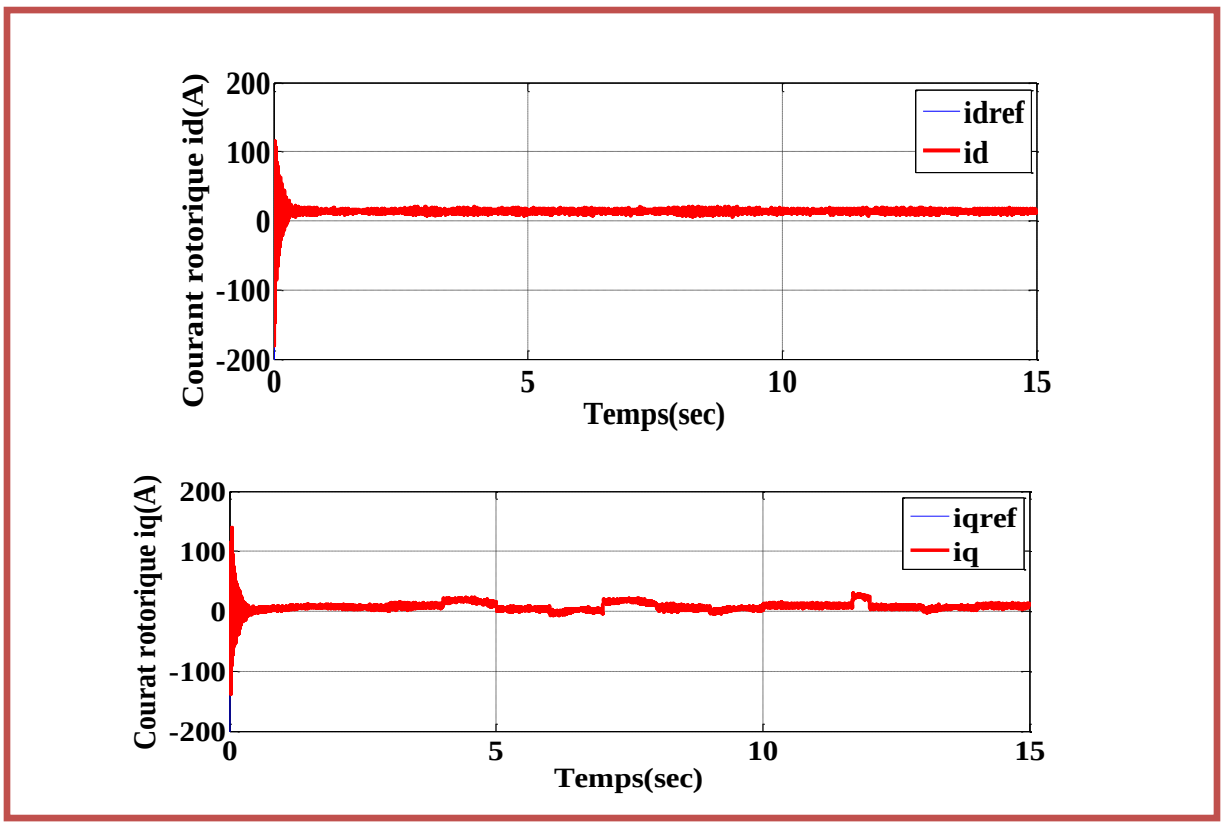


Figure IV.11. *Courant rotorique* de la MADA

Les Figures ci-dessus montrent les performances des contrôleurs MPPT et de la commande vectorielle en puissance actives et réactives statorique appliquée à la MADA intégrée dans un système éolien, la vitesse électrique du rotor suivent l'évolution de la vitesse du vent qui varie entre 5m/s et12.5m/s nous remarquons que les grandeurs de référence ont été bien suivies par la MADA pour les deux puissances active et réactive, la puissance active à la même allure que celle de la vitesse du vent, comme présente dans la figure (IV.8) .

Et même pour les courants rotorique déponds à l'allure de référence, celle-ci dépond de la vitesse du vent comme présente dans la figure (IV.11).

B- Coté réseau « CCR »

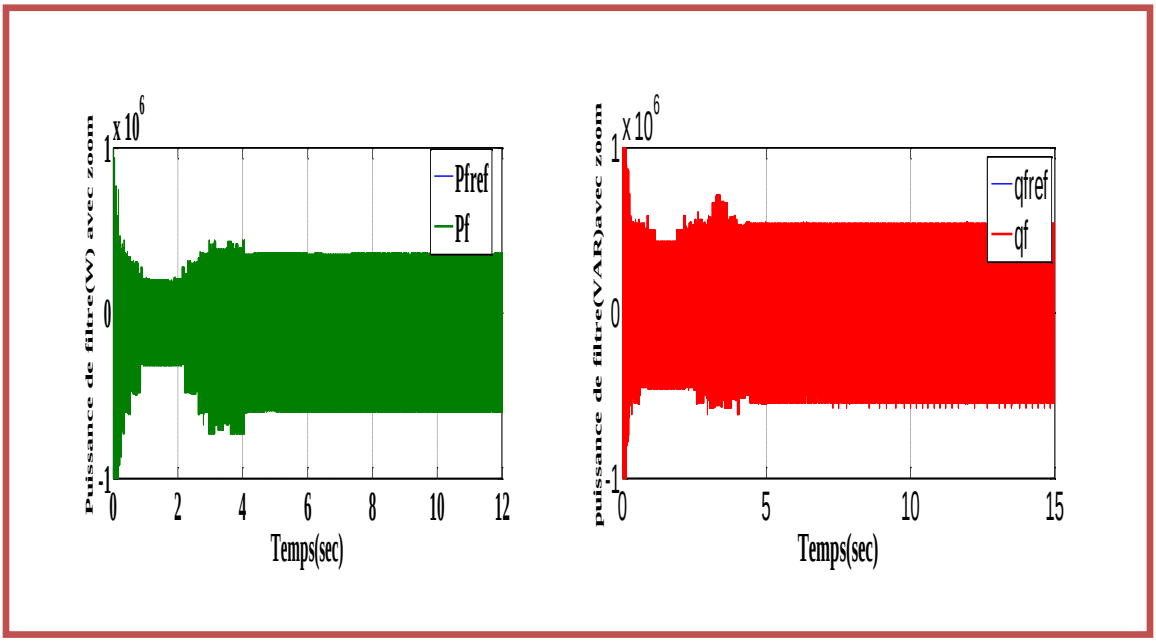


Figure IV.12. *Puissance active* et *reactive de filtre*

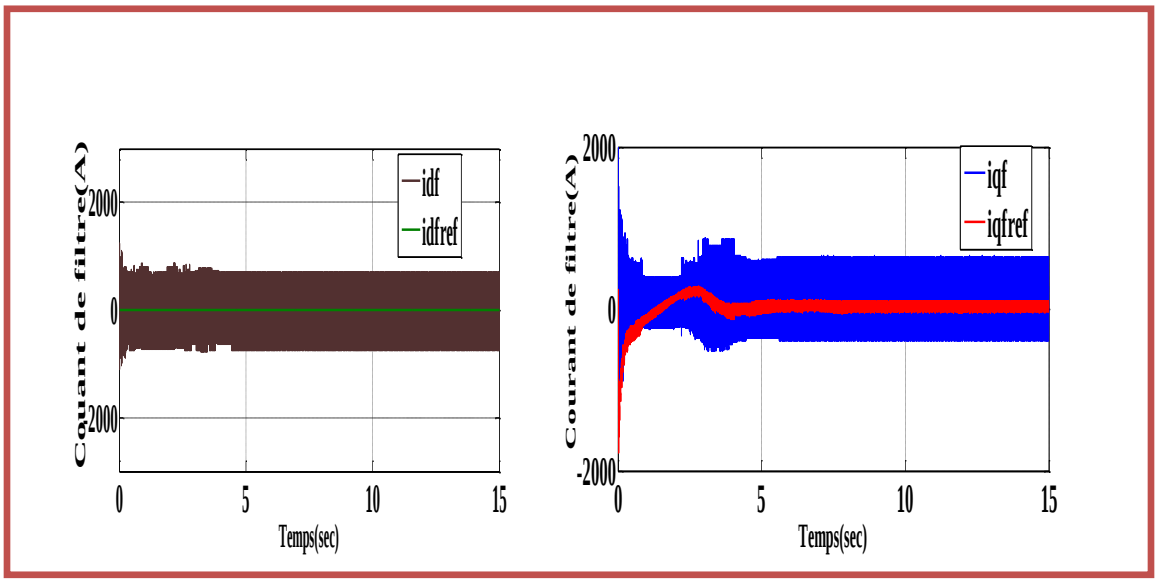


Figure IV.13. *Courant rotorique et statorique de filtre*

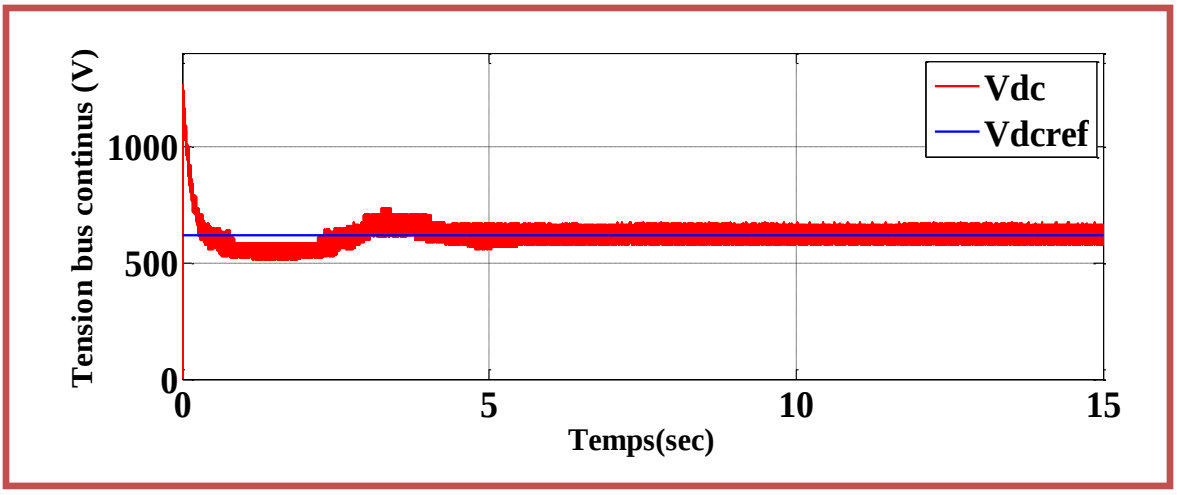


Figure IV.14. *Tension bus continus*

A partir de ces résultats de simulation, nous avons remarqué que tous les performances des grandeurs mesurées suivent bien l'évolution de ses références, et celui varie au profil du vent comme présentes les figures (IV.12), (IV.13) et (IV.14).

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

IV.2.5. Résultats de simulation du système éolien et sa charge non linéaire

Nous avons simulé le réseau électrique avec production éolienne et sa charge non linéaire, sans y connecter le filtre actif pour voir l'effet des harmoniques sur l'allure du courant absorbé.

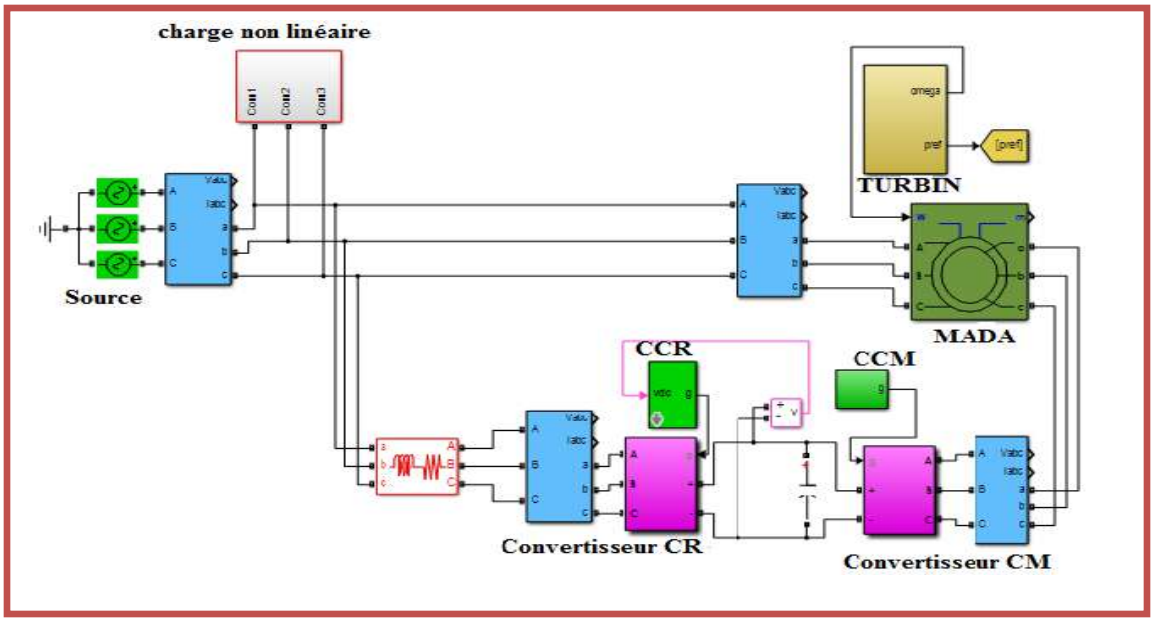


Figure IV.15. Le système éolien connecte au réseau sans filtre actif

On présente les résultats de simulation obtenus

Paramètres de la charge non linéaire R= 2Ω ; L= 0.0017 h.

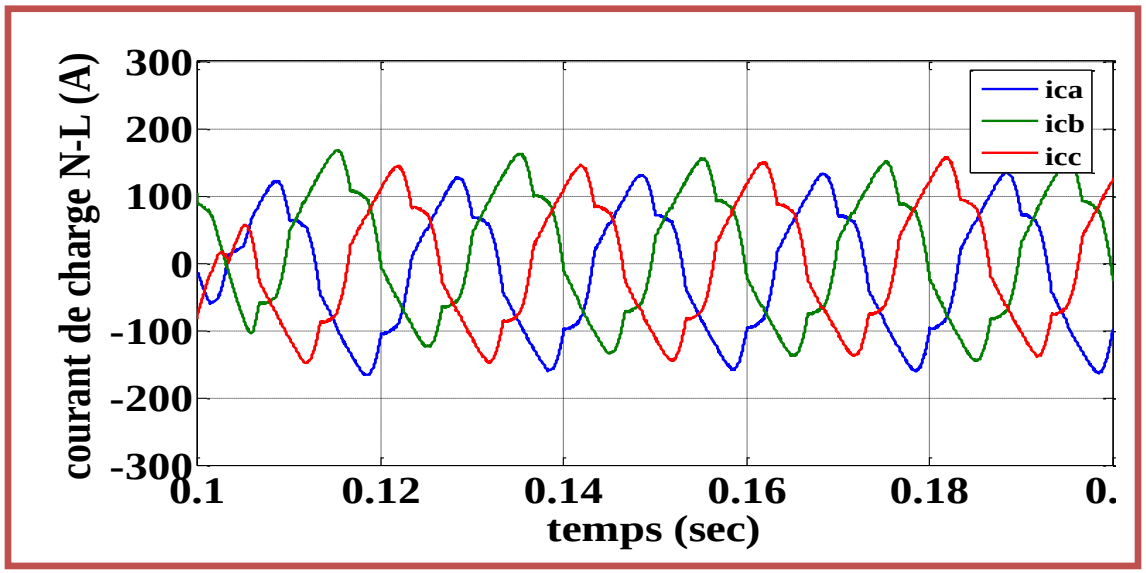


Figure IV.16. *Courant de charge N_L*

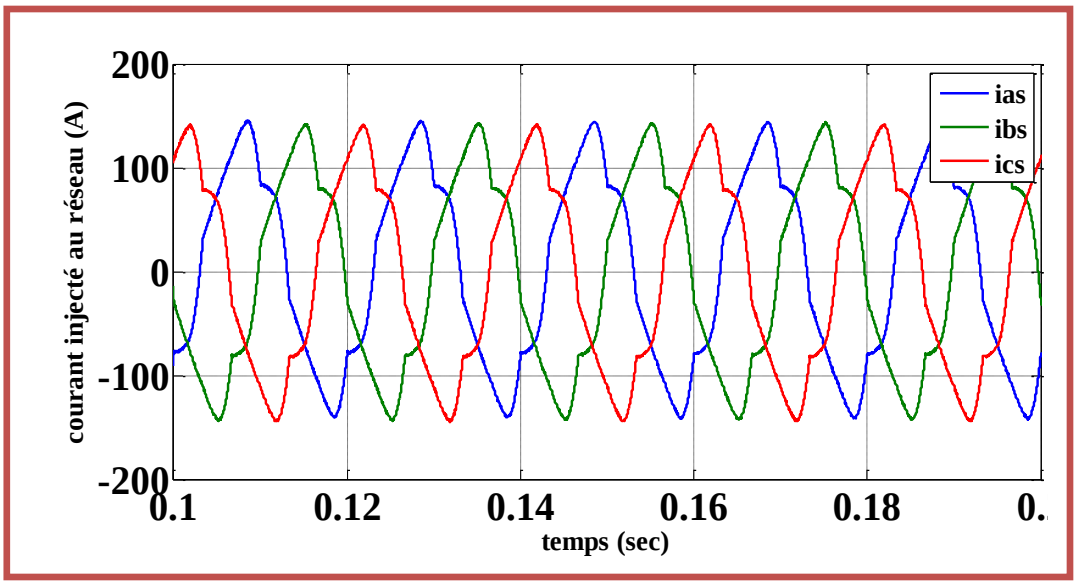


Figure IV.17. Courant de la source avant le filtrage

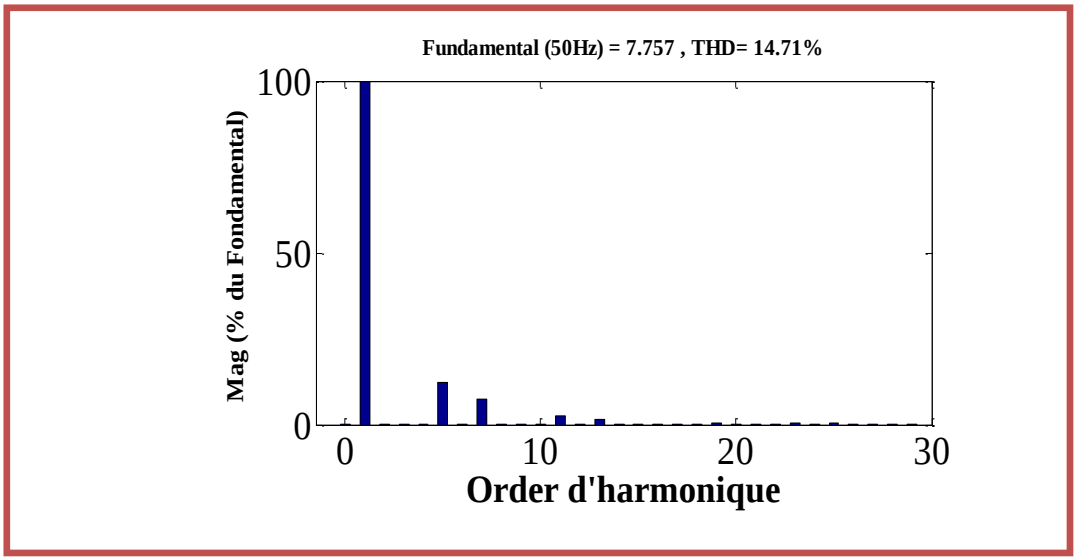


Figure IV.18. *Spectre harmonique du courant de la source*

Les figures précédentes présentent les courant absorbé par la charge polluante i_{ca} (Figure VI.16) et les courants de la source et son spectre harmonique (figures IV.17,18). Le THD de courant pour cette charge est de 14.71%, on voit que les harmoniques les plus dominants sont ceux des rangs 5, 7 et 11, c'est le cas d'un redresseur triphasé alimentant une charge RL. Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5 %.

IV.3. Les résultats de simulation avec le filtre actif

Maintenant, nous allons associe le filtre actif 2 niveaux connecté en parallèle sur le réseau où se trouve l'éolienne afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires.

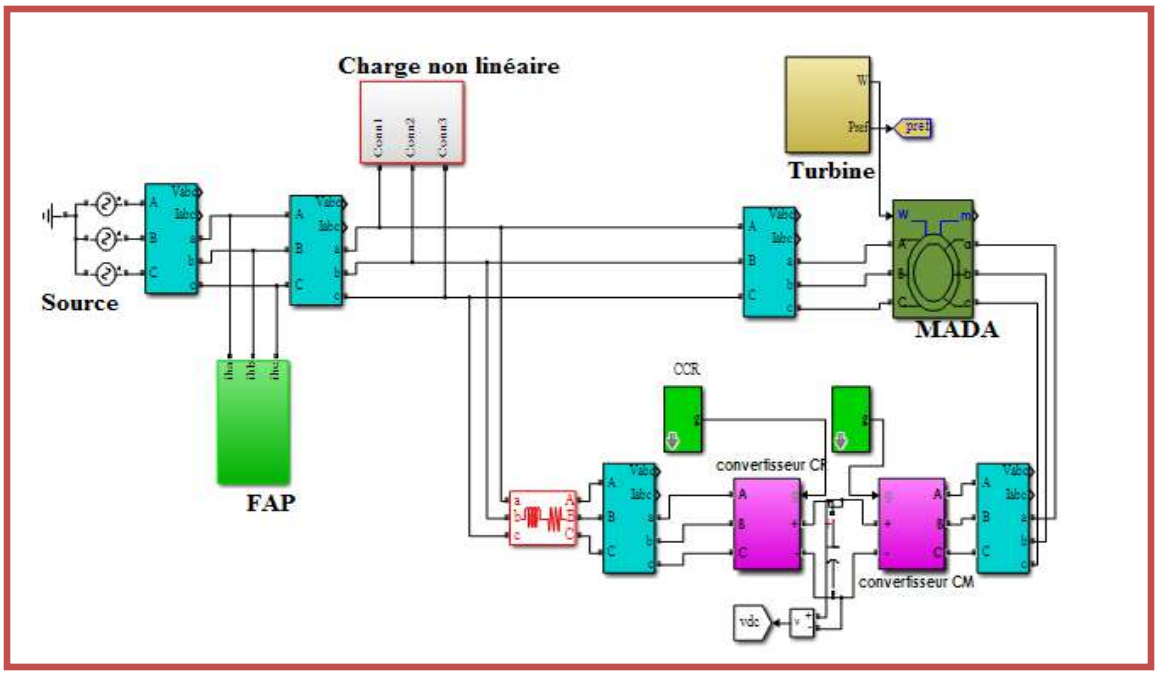


Figure VI.19. *Le système éolien avec le filtre actif*

- On présente les résultats de simulation

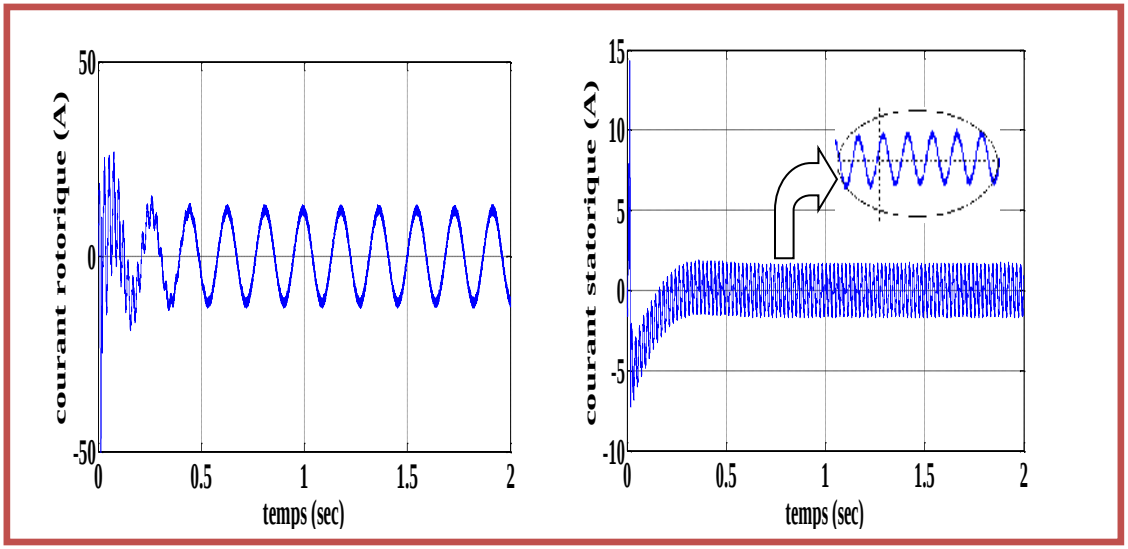


Figure VI.20. *Courant rotorique et statorique en fonction du temps*

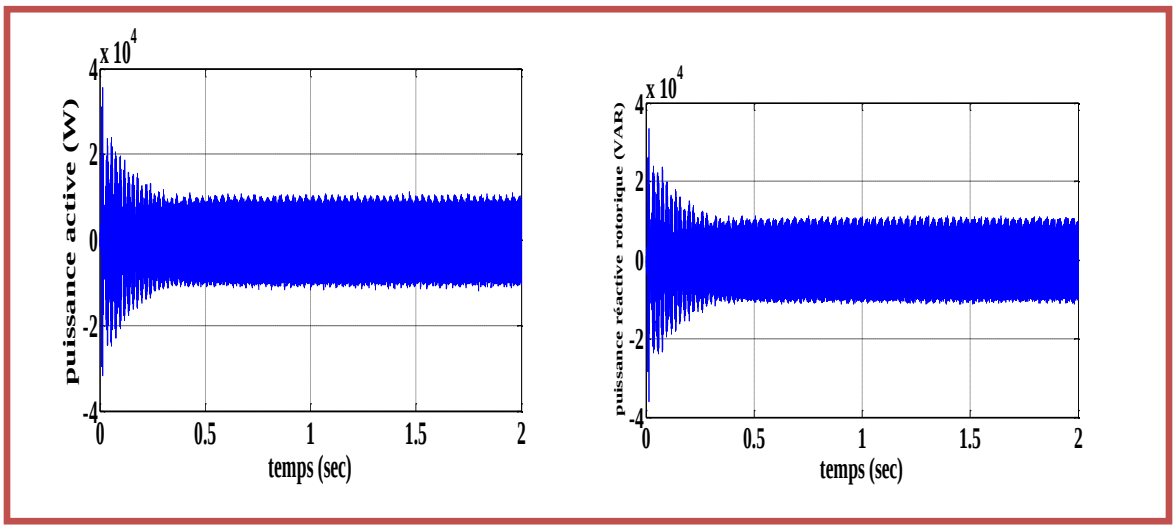


Figure VI.21. *Puissance active et puissance réactive rotorique en fonction du temps*

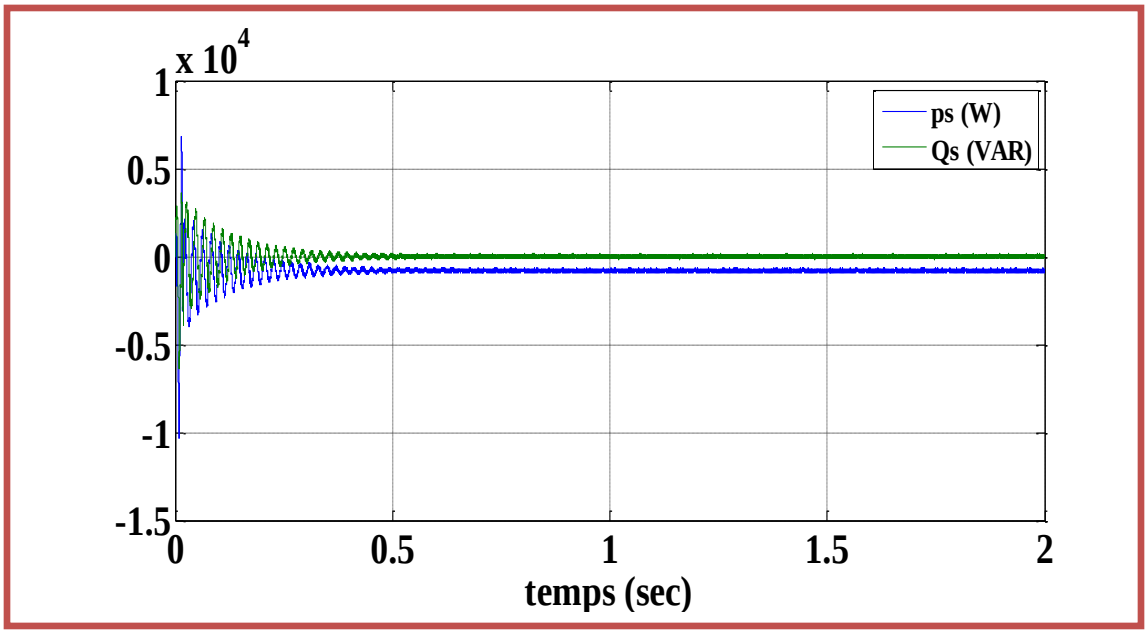


Figure VI.22. *Puissance active et réactive statorique*

La figure (VI.22) qui montre l'évolution des puissances réactives au niveau du rotor et du stator, la valeur de la puissance réactive reste nulle, et la puissance active elle varie, sa valeur est négative car notre MADA fonctionne en mode génératrice. La figure (VI.20) représente la courbe de courant rotorique et statorique en fonction du temps, On remarque que la valeur du courant rotorique varie en fonction de la variation de la vitesse d'entrainement de la turbine.

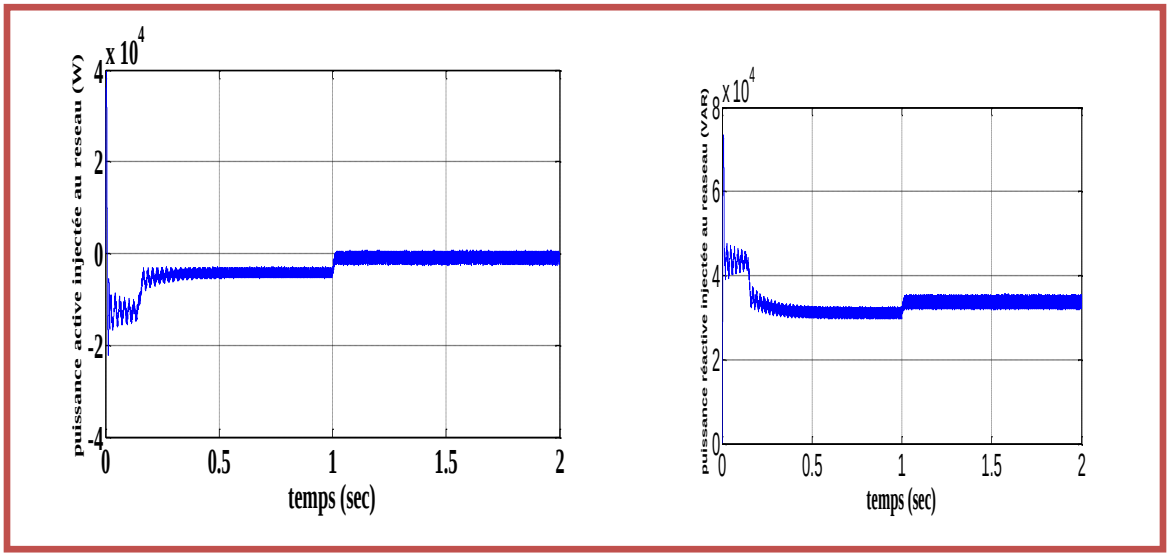


Figure IV.23. *Puissance réactive et active injectée au réseau (VAR)*

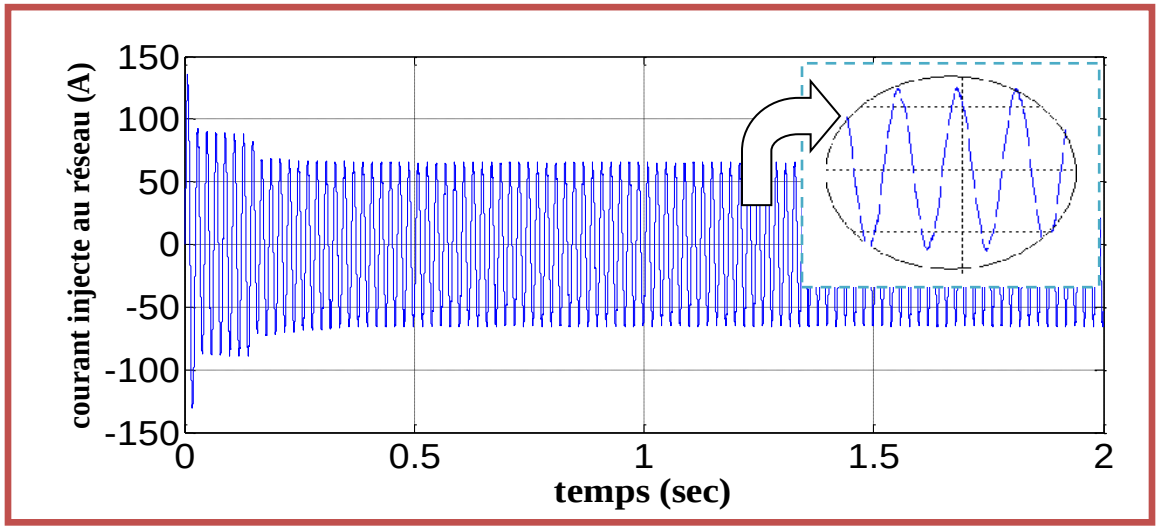


Figure VI .24. *La courbe du courant injecte au réseau (A)*

Dans la figure (IV.24), on montre le nouveau courant injecte au réseau récupéré son allure proche sinusoïdale nous rassure que le filtre actif a un bon fonctionnement.

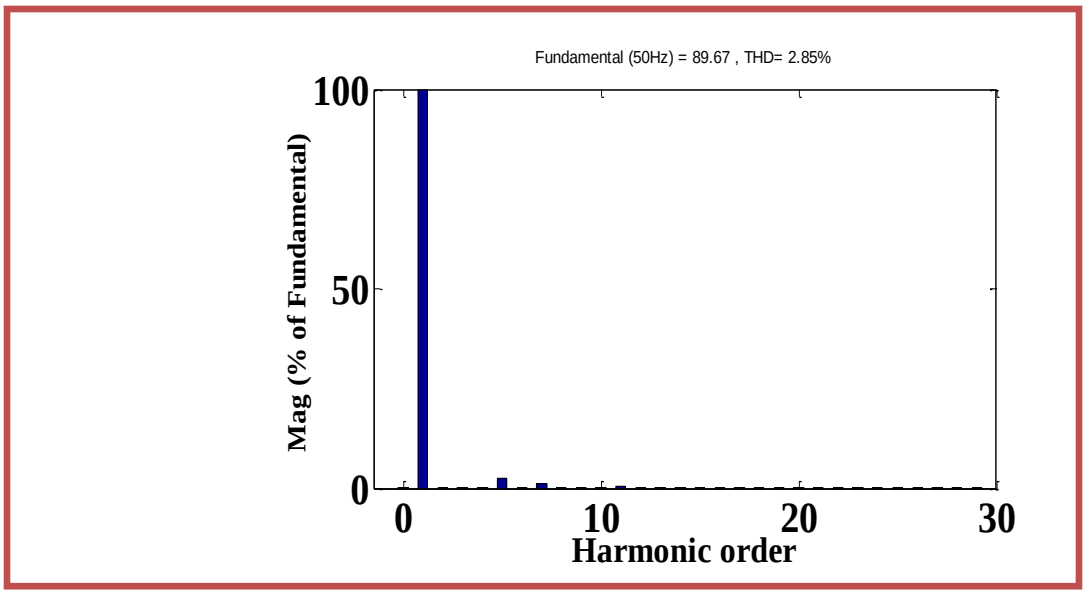


Figure IV.25. *Spectre harmonique du courant de la source*

La figure (IV.18) Représente le spectre harmonique du courant de charge dont la valeur du THD est de 14.71 % cependant , spectre harmonique du courant de la source représenté par la figure (III.25), montre que le taux de distorsion harmonique du courant de source est amélioré et vaut THD =2.85 % et ce qui prouve la bonne qualité de filtrage.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'éolienne est reliée à un réseau alternatif triphasé via une chaîne constituée d'une machine asynchrone double alimentation (MADA), d'un onduleur deux niveau, d'un redresseur ensuit nous avons présenté l'association d'un filtre actif a l'éolien, l'intérêt du filtrage actif d'annuler les courants harmoniques injectés par une charge non-linéaire connectée en parallèle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'amélioration de la qualité d'énergie à l'aide d'un filtre actif appliqué dans une chaine de production éolienne connecté au réseau électrique. On a effectué d'abord un rappel de notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite, on a présenté des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien dans le premier chapitre.

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

Nous avons exposé la modélisation de la MADA en utilisant la transformation de PARK. Ensuite, nous avons consacré l'utilisation d'une commande vectorielle à orientation du flux statorique. Nous avons introduit ensuite la commande vectorielle par orientation du flux statorique de la machine asynchrone à double alimentation. A la fin, nous avons applique la commande pour découpler le modèle de la MADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Deux méthodes sont envisagées: la commande directe et la commande indirecte. Nous avons effectué une synthèse du régulateur PI pour la commande.

Le troisième chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit. Nous avons alors présenté, de manière générale, les

solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées ainsi que leurs avantages et inconvénients. Particulièrement, le filtre actif parallèle qui présente la meilleure solution pour la compensation de tous les types de perturbation susceptibles d'apparaitre dans un réseau électrique basse tension.

La méthode d'identification des puissances instatanées a été choisie ici pour identifier le plus grand nombre de perturbations en courant, tels que les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs. Cette méthode exige une tension de réseau sans perturbation, pour pouvoir fournir uniquement les pertubations en courant émises, par la charge polluante. Cette méthode est très efficace, simple et facile à implanter.

Nous avons présenté dans le dernier l'association d'un filtre actif a l'éolien, l'intérêt du filtrage actif d'annuler les courants harmoniques injectés par une charge non-linéaire connectée en parallèle.

Bibliographie

Bibliographie

[1]. D. BERIBER "Optimization et Gestiond'Energie de Système de Production Photovoltaïque-Eolienne avec Stockage". de Doctorat en Science, Université de Houari Boumediene,09 / 12 / 2010.

[2]. Z. Mansar "Identification Paramétrique De La Machine Asynchrone A Double Alimentation" . Mémoire de Magister, Ecole tionale Nationale Polytechnique,10, Avenue Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie.30/11/2011.

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

[4]. Melle. Hiber Wafa « Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne» Mémoire de Magister,Université de Sétif,19/03/2013

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

[6]. M. BOUDIA Sidi Mohammed, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie", Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-BakrBlekaïd dans 2011.

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

[8]. F. PITIERS « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat, Université de NANTES, 2003

[9]. E. HAU. « Wind turbines ». 2nd Ed Springer 2006.

[10]. N.MEKKAOUI « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée » Thèses de Magister, UNIV DE BATNA 2004.

[11]. Le guide de l'éolien, techniques et pratiques, Corinne DUBOIS, Éditions Eyrolles / Février 2009

[12]. MELLOUL Ahmed« Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne » Thèse de Magister, UNIV de sétif 2011

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

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

Bibliographie

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

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

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

[18]. CHERFIA NAÏM, "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens",Mémoire de ingénieur de Université Mentouri Constantine, Algérie dans 07/ 06 / 2010.

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

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

[21].G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double Alimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Mars 2007.

[22]. R. Ghosn, "Contrôle vectoriel de la machine asynchrone à rotor bobine à doublealimentation", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre2001.

[23]. H. Bühler, "Electronique de réglage et de commande, traite d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique", Vol.16, Edition Georgi, 1979.

[24]. S. El-Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robyns, "Modelling and Simulation of Doubly Fed Induction Generators For Variable Speed Wind Turbines Integrated in a Distribution Network", EPE 2003,Toulouse, France, 2003.

[25]. Y. Djeriri, "Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien". Mémoire de magister,2009, Université de Sidi Bel.Abbés, Algérie.

[26]. R. Ghosn, "Contrôle vectoriel de lamachine asynchrone à rotor bobine à double alimentation, "Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre 2001.

[27]. J.Labbé, "L'hydrogene électrolytique comme Moyen de Stockage d'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles", Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, pp. 5-17-18-21-50-68-69, 21 décembre 2006.

[28]. A. ABDELLI, " Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique De Toulouse, p 9-13,15 octobre 2007.

Bibliographie

[29]. A. Boyette, ″Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double alimentation avec Système de Stockage pour la Production Eolienne″, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université d'Henri Poincaré, Nancy-I, France,2006.

[31]. E. Muljadi and C.P. Butterfield, "Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbine Generator", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.37, N°.1, pp.240-246, 2001.

[30]. S. El-Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robyns, "Modelling and Simulation of DoublyFed Induction Generators for Variable Speed Wind Turbines Integrated in a DistributionNetwork", EPE 2003, Toulouse, France, 2003.

[32].F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, machine asynchrone a cage autonome; machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.

[33] A. OMEIRI, «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ». thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba, 2007.

[34] D. Ould Abdeslam « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » thèse de doctorat,Université de Haute, Mulhouse, French., 2005.

[35] S. Tadjer « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque – GPV ». Mémoire de magister en Génie Electrique, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, Algérie. 2008.

[36] M. A. E. Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat, 2002, Université LouisPasteur, Strasbourg I, France.

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

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

[39] A. Morsli, Ould Cherchali, A. Tlemçani, M.S. Bouchrit, « Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un filtre actif parallèle à deux niveaux contrôlé par l'Algorithme "P_Q" ». ACTA ELECTROTECHNICA, vol 10, num 2,2012.

[40]: **A. Medjber*, A. Moualdia****, A. Mellit***, A. GuessoumCommande PI- flou d'un Générateur Asynchrone Double Alimentée Appliquer dans un Système de Conversion Eolien, International Conference on Electrical Energy and Systems, October 21-23, 2014, Annaba, Algérie

[41]. F. Bouchafaa, **D. Beriber**, M. S. Boucherit, "Enslavement and Control of the Multi DC

Bibliographie

Bus Link Voltages Using Adaptive Fuzzy", Electromotion 2009 – EPE Chapter 'Electric Drives', Lille, France, 1-3 July 2009.

Annexe

Annexe1Controle conventionnel par hysteresis :

La commande conventionnelle par hysteresis est tres couramment utilisee de par sa simplicite d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette strategie assure un controle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussee du modele du systeme a controler ou de ses parametres. La figure 4.15 expose son principe qui consiste a etablir dans un premier temps le signal d'erreur, difference entre le courant de reference $i_f{}^*$ et le courant produit par l'onduleur i_f . Cette erreur est ensuite comparee a un gabarit appele : bande d'hysteresis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande presente cependant un inconvenient majeur : elle ne permet pas de controler la frequence de commutation des semi-conducteurs, d'ou la presence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants generes.

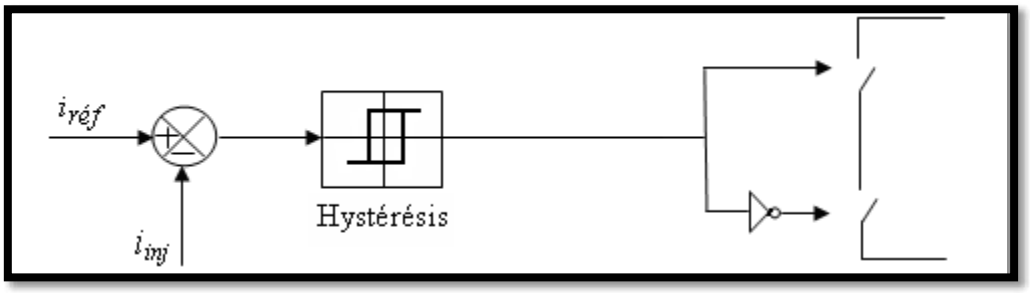


Figure .1 Commande conventionnelle par hysteresis

Annexe 2 : Paramètres du système éolien :

PARAMETRES DE LA MADA
Valeurs nominales : 7.5KW ; 220/380V- 50Hz ; 15/8.6A ; 1440tr/min.
Résistance du stator R_s=1.2Ω
Résistance du rotor R_r=1.8Ω
Inductance stator L_s=0.1554H Inductance rotor Lr=0.1568H
Inductance Mutuelle M=0.15H Couple résistant Cr=15Nm
Moment d'inertie J=0.3126 Kg.m2
Coefficient de frottement f_r=0.00673 Nm.s/rad
Nombre de paire de pôles P=2

PARAMETRES DE LA TURBINE EOLIENNE
Puissance nominale P_n=7.5kW
Nombre de pale=3
Rayon d'une pale R=3m

Gain du multiplicateur G=5.4
Inertie J=0.0017Kg.m2
Coefficient de frottements visqueux f=0.0024Nm.s/rd

PARAMETRES DE FILTRE

Réseau d'alimentation

Tension efficace V_s 220V

Résistance de ligne R_S 0.25V

Inductance de ligne L_S 19.4

Fréquence f 50 Hz

Charge non lineaire

Puissance apparente 23 kVA

Angle de retard à l'amorçage α 0°

Charge linéaire

Resistance de charge DC R_C 6.5

Inductance de charge DC L_C 20

$V_{dc=}620V$

$L_{fa} = 4.1mH$

$L_f = 1.5\text{Mh}$

$R_f = 2\Omega$

$T_S = 0.1s$