الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 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 : Électrotechnique

THEME

étude d'un système de conversion d'énergie éolien avec l'utilisation du filtrage actif pour l'amélioration la de qualité d'énergie

Proposé et dirigé par,

Dr.MOUALDIA Abdelhafidh

Mr. MORSLI Abdalkhader

Préparé et présenté par,

Melle. BELAID Amina.

Melle. BOUHEDDA Lina.

Dédicaces

Je dedie ce travail a ma mere et a mon père ,

A mon frere et a ma sœur,

A ma famille ,

A mes amies ,

A tous mes etres chers .

Lina

Dédicaces

Je dedie ce travail a mes chères parents.

A mes freres et a mes sœurs .

A ma familles .

A Mr. BAHI pour sa patience et Mr. MEKI ,

A mes amis,

Amina

Remerciements

Nous tenons a remericier tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donne la force et la volante afin d'accomplir ce travail.

Nous remericions tres sincerement Monsieur A.MOUALDIA notre promoteur pour sa patience et sa disponibilite durant ce travail ,nous remercions aussi notre co-promoteur A.MORSLI.

Nous remercions nos tres chers parents pour leurs indulgence a notre egard.

Nous remercions aussi tous les chercheurs du CDER qui nous avoir accordes un peu de leurs temps Mr BOUHARCHOUCHE ,Mr BOUDIA et particulierement Mr A.BAKHTI .

On remercie Mme Salima BOUHEDDA, Mlle Bouthaina BELAID et Mr Oussama BENAIAD pour leurs participation a ce travail.

Nos remerciments vont aussi a tout personne ayant participe de loin ou de pres a l'elaboration de cette thése .

الخلاصة

تناقش هده الاطروحة تحويل الطاقة في نظام طاقة الرياح موصول مباشرة بالشبكة الكهربائية استنادا على الة لامتزامنة ثنائية التغدية ، نظام تصفية لتحسين نوعية الطاقة ، في البداية و قمنا بدراسة فنية حول نظام تحويل طاقة الرياح ، متبوع بنمدجة مختلفة مكونات نظام تحويل طاقة الرياح بعدها عالجنا تلوث الشبكة الكهربائية ، تاثيره و حلوله الممكنة ،و لحل هدا المشكل قمنا بادراج مقارنة بين نوعين من نظام التصفية النشيطة المتوازي (FAP) و في الاخير قمنا بدراسة وتحليل تصرف نظام طاقة الرياح مع و بدون نظام التصفية النشيطة المتوازي (FAP).

كلمات مفتاحيه:
آلة لا متزامنة ثنائية التغذية ، نظام تحويل طاقة الرياح ، نظام التصفية النشيطة المتوازي

RESUME

Ce travail a pour but de traiter de la conversion énergétique dans un système éolien connecté au réseau à base d'une machine à double alimentation d'un système de filtrage dans le rôle est d'améliorer la qualité d'énergie de ce système. En premier lieu nous avons présenté une étude l'état l'art des systèmes de conversion d'énergie éolien. Suivit de la modélisation et l'étude des méthodes de commande de ce système, puis en traitera depollution dans le réseau électrique de ses effets et des solutions possible afin de résoudre ce problème on effectuera une étude comparative sur deux différents filtre actif. Enfin on étudiera et on analysera le comportement du système éolien sans puis avec filtre actif parallèle.

Mots clés :

machine à double alimentation , systèmes de conversion d'énergie éolien , filtre actif parallèle.

ABSTRACT

This work aims to address the energy conversion in a wind system connected to the network based on a doubly-fed induction machine of a filtering system to improve the power quality of the system. First we presentthe state of the art of wind energy conversion systems. Followed by a modeling and a study of the control methods of this system, then deal with pollution into the grid , its effects and possible solutions to solve this problem; we will conduct a comparative study of two different actives filters. Finally the behavior of the wind system will be studied and analyzed with and without the active parallel filter.

Key words:

doubly-fed induction machine , wind energy conversion systems , active parallel filter.

Table de matière

CHAPITRE .I. L'ETAT DE L'ART SUR LE SYSTEME DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.1 Introduction **5**
I.2 l'énergie électrique éolienne **5**
I.2.1 le potentiel en Algérie 6
I.2.2 Impact sur l'environnement 7
I.3 L'aérogénérateur **9**
I.4 Types d'aérogénérateurs **9**
I.4.1 Eoliennes à axe vertical 9
I.4.2 Eolienne à axe horizontal 10
I.4.2.1 Les éoliennes à marche lente 11
I.4.2.2 Les éoliennes à marche rapide 12
I.5 Principaux éléments constituants une éolienne **13**
I.6 Technologie d'éoliennes de grande puissance **15**
I.6.1 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 15
I.6.2 Eolienne à vitesse fixe 15
I.7.Intérêts de la vitesse variable **16**
I.7.1 Eolienne isolée (autonome) 17
I.7.2 système hybride 17
I.7.2. Eolienne connecté au réseau 17
I.8. Description de la Machine A Double Alimentation **18**
I.8.1. Classification des machines à double alimentation 18
I.8.1.1 Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard) 18
I.8.1.2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone 19
I.8.1.3 Machine à double alimentation sans balais 19
I.9 Comparaison entre les différentes variantes de la Machine A Double Alimentation **20**
I.10 Mode de fonctionnement de la MADA **21**
I.11.Mise en œuvre des éoliennes **23**
I.11.1. Recherche du rendement maximum MPPT 23
I.11.2. Gestion du réseau électrique 24
I.12. Conclusion **25**

CHAPITRE .II. Modélisation et méthodes de commande dy systéme éolien sur la machine à double alimentation

II.1. Introduction **27**
II.2. Modèle de la Turbine **27**
II.2.1. Modèle des pales 28
II.2.2. Modèle du multiplicateur de vitesse 29
II.2.3. Modèle de l'arbre mécanique 29
II.3. Stratégie de maximisation de puissance MPPT **29**
II.3.1.Réglage de vitesse par régulateur de type classique PI 30
II.3.2 profile du vent 31
II.4. Modèle de la machine asynchrone a double alimentation **32**
II.4.1. Résultats de simulation du comportement de la MADA 33

II.4.1.1. Résultats du test en mode hyposynchrone 34
II.4.1.2. Résultats du test en mode hypersynchrone 40
II.4.2. Modèle de la MADA avec choix du repère adéquat dq (Park) 46
II.4.3. Intérêt de la transformation de PARK 47
II.4.3.1. Relations entre les tensions et courants rotoriques 48
II.4.4. la transformation de inverse PARK 49
II.5. la commande vectorielle : 50
II.5.1.Commande découplée directe en P et Q 50
II.5.1.2. Synthèse du régulateur PI 50
II.5.2. Résultats de la commande découplée directe 51
II.5.3. Commande découplée indirecte en P et Q 52
II.5.3.1. Résultats de la commande découplée directe 53
II.6. Commande découplé indirecte avec boucle de puissance 54
II.6.1. Résultats de la commande découplé indirecte avec boucle de puissance 55
II.7. Structure et modélisation du convertisseur statique NPC (redresseur - onduleur). 56
II.7.1.commande de l'onduleur par modélisation de longueur d'impulsion MLI 57
II.7.1.1.Algorithme de commande 58
II.7.2. Résultats de simulation du comportement de l'onduleur 3 niveaux NPC 58
II.7.2.1. Les résultats pour la variation de l'indice de modulation 58
II.7.2.2 Les résultats pour la variation de l'indice d'amplitude 61
II.8.2. la commande par hystérésis 63
II.8.2.1.les résultats de la commande par hystérésis 65
II.9. la boucle à verrouillage de phase " PLL" 66
II.9.1.les résultats de la boucle à verrouillage de phase 67
II.10. Conclusion 68

CHAPITER III : POLLUTION DANS LE RESEAU ELECTRIQUE (EFFETS ET SOLUTIONS)

III.1 Introduction 70
III.2.Qualité de l'énergie électrique 70
III.3. Généralité sur les harmoniques 71
III.3.1 Définition des harmoniques 71
III.3.2 Origine des harmoniques 71
III.3.3 Caractéristiques des harmoniques 72
III.3.4Mesure des harmoniques 73
III.4.Effets des harmoniques 74
III.5 Préventions et normes en vigueur 75
III.7 Compensation des courants harmoniques 76
III.8.Elimination des harmoniques 76
III.8.1.Solutions traditionnelles 76
III. 8.1.1 Les filtres passifs 77
III.8.1.2.Solutions modernes 80
III. 9 Structure du Filtre Actif Parallèle 83
III.9.1. Identification des courants harmoniques 83
III.9.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées 84
III.9.2dimensionnement des paramètres du filtre parallèle actif 87
III.9.2.1 Dimensionnement du condensateur 87
III.9.2.2. Dimensionnement des paramètres du régulateur PI 88

III.9.2.2 Dimensionnement du filtre de sortie 88
III.10.1. résultats de simulation du système sans filtre 90
III.10.2. résultats de simulation du système avec filtre 92
III.11 Conclusions 99

CHAPITER IV : ETUDE ET ANALYSE D'SYSTEME EOLIEN RACCORDE AU RESEAU AVEC FILTRAGE

IV.1 Introduction 101
IV.2 le principe de fonctionnement du système éolien 101
VI.2.2 les résultats de simulation 102
IV.3 le principe de fonctionnement du système éolien avec filtre actif parallèle 108
VI.3.1 les résultats de simulation 109
IV.4 résultats de simulation du système éolien avec filtre actif parallèle 111
VI.4.1 les résultats de simulation 112
IV. 5 Conclusion 117

Liste des figures

figure I. 1 : statistiques annuelles de l'energie eolienne installee par regions 6

figure I.2 : la carte des vents 7

figure I.3 : les types d'aerogenerateurs 9

Figure I. 4 : eolienne de type darrieus 10

figure I.5 : eolienne de type savonius 10

figure I.6 : eolienne a axe horizontal 11

figure I. 7 : eolienne a marche lente 12

figure I. 8 : la courbe de l'evolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse specifique des eoliennes 12

figure I. 9 : les principaux elements constituants une eolienne 13

figure I. 10 : les principaux elements constituants dela nacelle 14

figure I. 11 : le principe de conversion de l'energie cinetique du vent en energie mecanique 15

figure I. 12 : eolienne a vitesse fixe 16

figure I. 13 : la courbe de la puissance mecanique de la turbine en fonction de la vitesse de la turbine 16

figure I. 14 : machine a double alimentation a rotor bobine (standard) 18

figure I. 15 : machine a doub le alimentation en cascade asynchrone 19

figure I. 16 : machine a double alimentation sans balais 20

figure I. 17 fonctionnement en mode moteur hypo synchrone 22

figure I. 18 fonctionnement en mode moteur hyper synchrone 22

figure I. 19 fonctionnement en mode generateur hypo synchrone 23

figure I. 20 fonctionnement en mode generateur hyper synchrone 23

figure II.1: le schema de la partie macanique de la turbine eolienne 27

figure II.2 courbe de la puissance delivree par la turbine en fonction de la vitesse du vent 30

figure II.3 structure du regulateur de vitesse 31

figure II.4 le profil du vent 32

figure II.5.resultats de la variation du frequence 35

figure II.6. resultats de la variation du frequence 36

figure II.7. resultats de la variation du tension 38

figure II.8. resultats de la variation du tension 39

figure II.9. resultats de la variation du tension 41

figure II.10. resultats de la variation du tension 43

figure II.11. resultats de la variation du tension 44

figure II.12. resultats de la variation du tension..... 46

figure II.13 passage du repere triphase au repere biphase dq..... 47

figure II.14.schema bloc de la commande decouplee directe en p et q..... 50

figure II.15. schema bloc de la regulateur pi 51

figure II.16:resultats de la commande decouplee directe (ps et qs)..... 52

figure II.17. schema bloc de la commande decouplee indirecte en p et q. 53

figure II.18 : resultats de la commande decouplee directe 54

figure II.19 : schema bloc de la commande decouplee indirecte avec boucles de puissance. 54

figure II.20 : resultats de simulation resultats de la commande decouple indirecte avec boucle de puissance 55

figure II.21 : la structure d'un convertisseur trois niveaux..... 56

figure II.22. resultats de la variation de l'indice de modulation:(a) la tension simple va .(b) la tension compose vab (c) le thd..... 59

figure II.24. resultats de la variation de l'indice de modulation 61

figure II.25. resultats de la variation de l'indice d'amplitude..... 62

. figure II.26. resultats de la variation de l'indice d'amplitude..... 63

figure II.27:la structure de la commande par hysteresis..... 64

figure II.28:latension au borne du condensateur et sa reference en fonction du temps 65

figure II.29:le courant de la phase a et sa reference en fonction du temps..... 65

figure II.30 : la tension de la phase a en fonction du temps 66

figure II.31 : le bloc du pll 67

figure II.32 : la frequence estimer par la pll 67

figure II.33 :la courbe de la vitesse de rotation en fonction de temps 68

figure III.2 : les solutions traditionnelles d'elimination des harmoniques..... 77

figure III.3 :filtre passif serie 78

figure III.4 : filtre actif parallele..... 78

figure III.5 :filtres amortis passe-haut 79

figure III.6 : filtre passif amortie 80

figure III.7 : les methodes d'identification des grandeurs harmoniques 83

figure III.8 : algorithme p-q d'extraction des courants harmoniques 85

figure III.9 :schema du systeme etudie..... 89

figure III.10 :courbe du courant de charge non-lineaire de la phase a en fonction du temps 90

figure III.11 :courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps 90

figure III.12 :courbe du courant et de la tension de source de la phase a en fonction du temps ... 91

figure III.14 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtredeux niveaux..... 92

figure III.15 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtretrois niveaux..... 92

figure III.16 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux 92

figure III.17 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux..... 92

figure III.18 : courbe du courant harmonique mesure et le courant harmonique de references de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux..... 93

figure III.19 : courbe du courant harmonique mesure et le courant harmonique de references de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux. 93

figure III.20 : le thd avec filtre deux niveaux. 93

figure III.21 : le thd avec filtre trois niveaux. 93

figure III.22 : Courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux..... 94

figure III.23 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux..... 94

figure III.24 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux 95

figure III.25 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux..... 95

figure III.26 : courbe du courant harmonique mesure et le courant harmonique de references de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux..... 95

figure III.27 : courbe du courant harmonique mesure et le courant harmonique de references de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux 95

figure III.28 : courbe la tension v_{dc} mesure et la tension v_{dc} de references en fonction du temps avec filtre deux niveaux. 96

figure III.29 : courbe la tension v_{dc} mesure et la tension v_{dc} de references en fonction du temps avec filtre trois niveaux..... 96

figure III.30 : le thd avec filtre deux niveaux 96

figure III.31 : le thd avec filtre trois niveaux. 96

figure IV.1 :le systeme eolien connecte au reseau sans filtre actif 101

figure IV.2 :la courbe de la puissance active et de la puissance reactive statorique en fonction du temps..... 103

figure IV.11 :le systeme eolien connecte au reseau avec filtre actif parallele (2/3niveaux)..... 109

figure IV.10 :lacourbe de la vitesse de la turbine en fonction du temps 111

figure IV.11 :la puissance active statorique en fonction du temps 112

figure IV.12 :la puissance active rotorique en fonction du temps 112

figure IV.13 :la puissance reactive statorique en fonction du temps..... 113

figure IV.14 :la puissance reactive statorique en fonction du temps..... 113

figure IV.15 :la puissance reactive injectee au reseau en fonction du temps..... 114

figure IV.16 :la puissance active injectee au reseau en fonction du temps 114

figure IV.17 :le courant injecte au reseau en fonction du temps 115

figure IV.18 :le courant statorique en fonction du temps..... 115

figure IV.19 :le courant rotorique en fonction du temps..... 116

List des tableaux

TABLEAU I. 1 : Comparaison Entre Les Differentes Variantes De La Mada..... 21
TABLEAU III.1 :Principales Charges Polluantes 72
TABLEAU III.2 :Les Criteres De Mesure Des Harmoniques 73
TABLEAU III.3 : Differentes Configurations De Filtres..... 80
TABLEAU III.4 : Tableau Comparatif Des Performances Des Systemes De Filtrage..... 98
TABLEAU IV.1 : Parametres Mecaniques Et Electriques Du Systeme Eolien Etudie. 102
TABLEAU IV.2 : Parametres des Commandes Du Systeme Eolien Etudie..... 103
TABLEAU IV.3 : Tableau Comparatif Des Taux De Distorsion Du Systeme 109

List des annexes

Annexe A: 122

Nomenclature

Cp	Coefficient de puissance
λ	Ratio de vitesse
Ps	Puissance active statorique
Pr	Puissance active rotorique
g	Glissement (%)
C_{aero}	Couple aérodynamique
P_v	Puissance du vent
S	L'air balayé
ρ	Densité de l'air
Ω_t	Vitesse angulaire de la turbine
f (Hz)	Fréquence du réseau
V	Vitesse du vent
β	L'angle d'orientation de pale
R	Rayon de la turbine
Ω	Vitesse angulaire de la génératrice
G	Gain du multiplicateur
Cg	Couple du générateur
J	Inertie total
Jg	Inertie de la génératrice
Jt	Inertie de la turbine
Cmec	Couple mécanique
Cvis	Couple des frottements
Kf	Coefficient de frottement visqueux
Pn	Puissance nominale
Vm	Vitesse de vent maximale
VD	Vitesse de démarrage
Cem	Couple électromagnétique
Rs,Rr	Résistance statorique et rotorique
Ls,Lr	l'inductance statorique et rotorique
Lm	Inductance mutuelle
σ	Coefficient de fuites, σ = 1 – M2/LsLr ;
ωr, (ωs)	Pulsation rotorique et statorique
p	Nombre de pair de pôles
V_{sq},V_{sd},V_{rq},V_{rd}	Tensions statoriques et rotoriques d'axes d et q
i_{sq}, i_{sd},i_{rd},i_{rq}	Courants statoriques et rotoriques d'axes d et q
$\emptyset_{rd}$,$\emptyset_{rq}$,$\emptyset_{sd}$,$\emptyset_{sq}$	Flux statoriques et rotoriques d'axes d et q
Qr ,Qs	Puissances réactives statorique et rotorique
Kp ,Ki	Gain du régulateur (proportionnel, intégrateur)
τ_r	Temps de réponse du système
Vdc	Tension du bus continu
Rf, Lf	Résistance et l'inductance du filtre RL
Sa Sb Sc	Séquence de commande du convertisseur à MLI
Ts	Période de commutation
fc	Fréquence de coupure
THDv :	Voltage Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en tension)

THD_i :	Current Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en courant)

Abréviation

MADA	**M**achine **A**synchrone à **D**ouble **A**limentation
AC	**A**lternative **C**urrent
DC	**D**irect **C**urrent
PI	**R**égulateur **P**roportionnel **I**ntégrateur
CCM	**C**onvertisseur **C**oté rotor de la **M**achine
CCR	**C**onvertisseur **C**oté **R**éseau électrique
MLI	**M**odulation à **L**arge **I**mpulsion
PLL	**P**hase **L**ocked**L**oop (boucle à verrouillage de phase)
MPPT	**M**aximum **P**ower **P**oint **T**racking
FAP	**F**iltre**A**ctif**P**arallèle

Introduction générale

Introduction générale

Le réchauffement climatique ,ce phénomène d'augmentation des températures sur la plus grande partie des océans et de l'atmosphère terrestre, mesuré à l'échelle mondiale sur plusieurs décennies, traduit une augmentation de la quantité de chaleur retenue à la surface terrestre.

Pour éviter que notre climat ne s'emballe, beaucoup de scientifiques recommandent que la température moyenne n'augmente pas de plus de 2 °C d'ici 2100 par rapport à 1850. Cela signifie que la quantité de gaz à effet de serre dans notre atmosphère doit immédiatement diminuer. Sans cela, les bouleversements risquent d'être irréversibles. À ce propos une réelle volonte politique existe dans la plupart des pays afin de développer l'installation des énergies vertes. Comme l'a montrée la cop 21 cette grande conférence internationale qui a eu lieu au Bourget du 30 novembre au 11 décembre 2015. Les représentants de 196 pays se sont réunis pour négocier un accord dont l'objectif est justement de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C d'ici 2100 et pour cela l'accent a éte mis sur les énergies renouvelables.

Parmi ces énergies vertes l'énergie éolienne est l'une des plus compétitive d'après les dernières statistiques, l'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables les plus installées dans le monde.

La plupart des éolienne sont installé en ferme éolienne afin d'en faire une centrale électrique, donc nous avons, dans ce travail, étudie un système éolien connecté au réseau avec filtrage actif ;

Le premier chapitre est consacre a des notions théoriques sur l'énergieéolienne. Les différentstypes et composants de l'éolienne, ainsi que les avantages de cette énergie suivi par un rappel sur les différentes classifications des machines à double alimentation et leur mode de fonctionnement et des généralités sur la gestion du réseau électrique .

Dans le second chapitre, nous présentons la chaîne de conversion électromécanique du système éolien basee sur la machine asynchrone à double alimentation sur laquelle reposent les travaux de cette thèse. Nous rappelons que cette chaine de conversion est constituée d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs à MLI statiques de puissance et un filtre triphasé de courant. La turbine éolienne entraine la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu. En premier lieu, nous présentons la

modélisation des différents éléments constituant le système afin d'établir les différentes commandes associées. Nous entamons par la modélisation du multiplicateur de vitesse qui fait la liaison entre l'hélice et la génératrice qui nous permettra par la suite de faire des simulations de notre éolienne.

De plus, la commande en double alimentation va nous permettre de réaliser une commande indépendante des puissances actives et réactives de la MADA. Deux commandes vectorielles sont développées ici, l'une appelé commande vectorielle directe qui effectue la régulation directement sur les puissances sans prendre en compte les couplages internes existants entre les puissances dans la MADA. La deuxième commande est l'indirecte qui a pour role de réguler les courants rotoriques de la MADA. Ce chapitre se termine donc sur la présentation des résultats de simulation de ces deux commandes.

Dans le troisième chapitre, on donnera des notions de base sur les harmoniques et les moyens de mesure de cette grandeur , on développera les différentes technologies de filtrage qui excitent ; en premier lieu les différentes configurations des filtres passifsexcitanst puis différentes types de filtres actifs. On étudiera l'algorithme pq , on comparera en suite les performance d'un filtre actif parallèle deux niveaux et trois niveaux dans un système contenant une charge non linéaire et on analysera les résultats obtenu.

Dans le dernier chapitre, on étudiera les performances du système complet avec et sans filtrage actif.On comparera les taux d'harmonique de distorsion pour différentes technologies de filtre actif parallèle ; deux niveaux et trois niveaux et différents modes de fonctionement : avec source continue puis avec bus continu afin de connaitre celle qui nous donne les meilleures résultats.

Chapitre I

L'état de l'art d’un système de conversion éolienne

I.1 Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toute fois aléatoire dans le temps et son captage nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences, l'évolution technologique qui s'est traduite par l'augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux alliées à la baisse continue des coûts de production font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives.

Pour toutes ces raisons, l'énergie issue du vent fait déjà partie intégrante du paysage et la tendance s'annonce irréversible.

Ce premier chapitre sera donc destiné à la partie éolienne : son principe de fonctionnement, son exploitation, sa constitution ainsi que les différentes structures d'aérogénérateurs existantes.

I.2 l'énergie électrique éolienne

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.

Au 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 16ème siècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois.

En 1891, le danois Poul La Cour inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité. Les débuts du 20ème siècle, ont été marqués par la conception de la première éolienne à axe vertical, 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.**[16]**

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 ce qui permet l'augmentation de la part de l'énergie éolienne dans la production électrique mondiale .Selon les chiffres publiés par le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC – Global Wind Energy Council), le parc éolien mondial a connu une croissance de 44% en 2014 par rapport à 2013 avec presque 370 GW de puissance installée dans le monde fin 2014.
Dans le peloton de tête, la Chine dépasse les Etats-Unis, avec 114,6 GW contre 65,8GW, suivis de l'Allemagne (39 GW), classée au 3e rang mondial **[20].**

D'après la figure I. 1 en 2015 cette tendance a perduré de manière remarquable en Asie et en Amérique du nord.Cependant la puissance éolienne installée en Afrique et dans les régions du Pacifique reste faible mais connait une croissance timide.

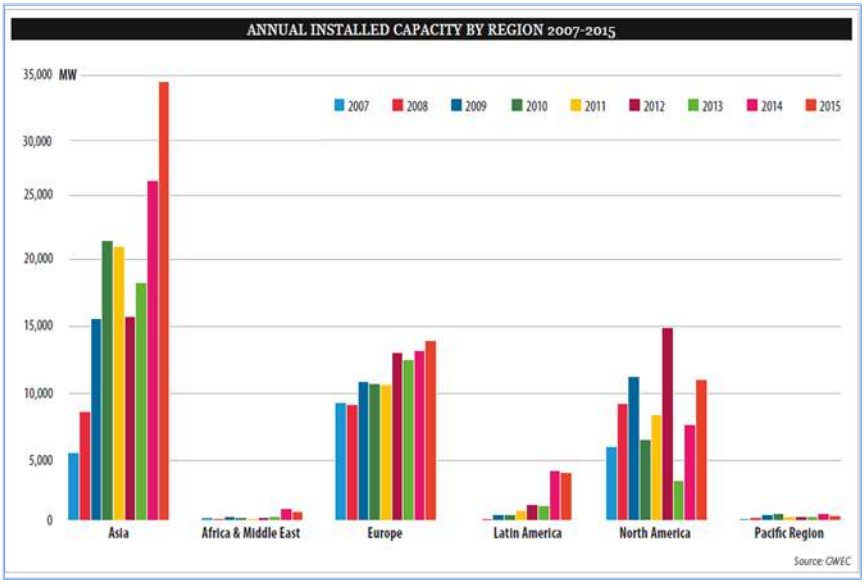


Figure I. 1 : statistiques annuelles de l'énergie éolienne installée par régions

I.2.1 le potentiel en Algérie

En utilisant les données météorologiques collectées en premier lieu sur les 63 sites en Algérie, puis en deuxième lieux, en ajoutant les données météorologiques des 24 sites près

des frontières dans les pays voisins.[19]

En utilisant les points de mesure à l'intérieur du pays, la carte des vents évaluée à 10m de hauteur est donnée dans la Figure .[19]

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des micro climats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau et l'électrification rural particulièrement sur les Hauts Plateaux. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar .[1] Quant a la ville de Médéa elle ce distingue avec un faible potentiel qui varie entre 3.38m/s et 2.63m/s; le mois le plus venteux dans cette ville est le mois d'Avril comme le montre le tableau de l'annexe A.

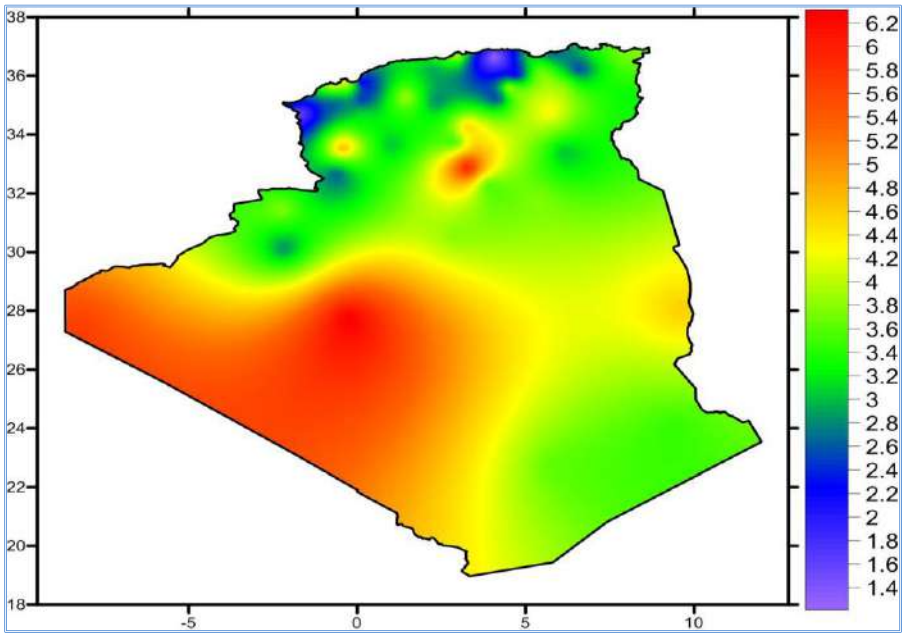


Figure I.2 : la carte des vents

I.2.2 Impact sur l'environnement

L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchet. Or, elle a un impact sur l'environnement :

- ***L'impact visuel*** : il reste un thème subjectif. Selon les enquêtes réalisées en Europe, la perception d'une éolienne n'est pas négative et varie selon le type de paysage initial, de la disposition de la quantité, de la taille des machines, du nombre de pales. Dans tous les cas une étude paysagère est indispensable lors du montage du projet. [16]
- ***Le bruit*** : il a une double source :

✓ la première, d'origine mécanique liée aux machines tournantes dans la nacelle (génératrice, etc.)

✓ la seconde, d'origine aérodynamique, liée à la rotation des pales.

Le bruit mécanique a pratiquement disparugrâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant àlui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée. Les mesuresmontrent que le bruit d'une éolienne est très limité, 50 dB à 150 m, 45 dB à 200 m et imperceptible à 400 m. Dans la plupart des cas, lebruit du vent couvre celui des éoliennes.[16]

- ***L'impact sur les oiseaux***. : Les éoliennes peuvent avoir un effet négatif de deux façons :

✓ des collisions au niveau du mât, des pales, des câbles électriques,

✓ des perturbations des territoires de nidification et de séjour des oiseaux.

Il faut cependant noter que les dégâts provoqués par les éoliennes sont insignifiants comparés aux routes ou aux lignes à haute tension.[16]

Avantages de l'éolien **:**

- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pourl'exploitation agricole, l'élevage et autres utilisations.
- Une énergie renouvelable : Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Une énergie sans risque : Contrairement à l'énergie nucléaire, elle ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on ne connaît pas la durée de vie.

- Une énergie qui n'émet quasiment pas de gaz à effet de serre. Chaque MWhd'électricité produit par l'énergie éolienne réduit de 0.8 à 0.9 tonnes les émissions de CO2 produites chaque année en comparaison de la production d'électricité avec le charbon ou le diesel.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces [16]

I.3 L'aérogénérateur

L'aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est le dispositif qui transformeune partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. [1]

I.4 Types d'aérogénérateurs

Les aérogénérateurs peuvent être classifiés selon plusieurs critères tel que mentionné dans lafigure I. 3

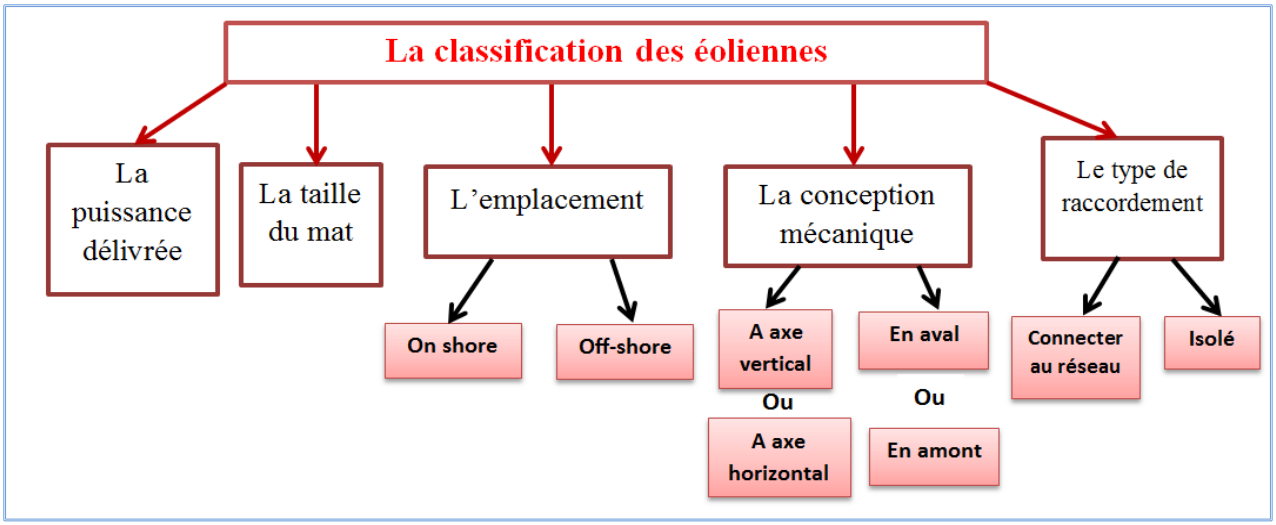


Figure I.3 : les types d'aérogénérateurs

I.4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les

années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade del'industrialisation[1]

Il en existe deux types :

- ✓ Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus figure I. 4
- ✓ Les éoliennes à axe vertical de type Savonius figure I. 5

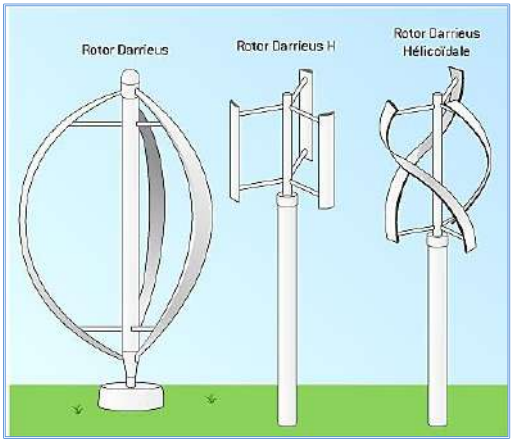


Figure I. 4 : éolienne de type Darrieus



Figure I.5: éolienne de type Savonius

- ➢ ***Avantages d'une éolienne à axe vertical***

1) La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.[2]

2) Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.

3) Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

- ➢ ***Inconvénients d'une éolienne à axe vertical***

1) Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.

2) La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.**[8]**

I.4.2 Eolienne à axe horizontal

Toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec unrotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire un arbre principal

horizontal).Leur principal avantage revient sur leur rendement très supérieur à celui des autres types. **[5]**

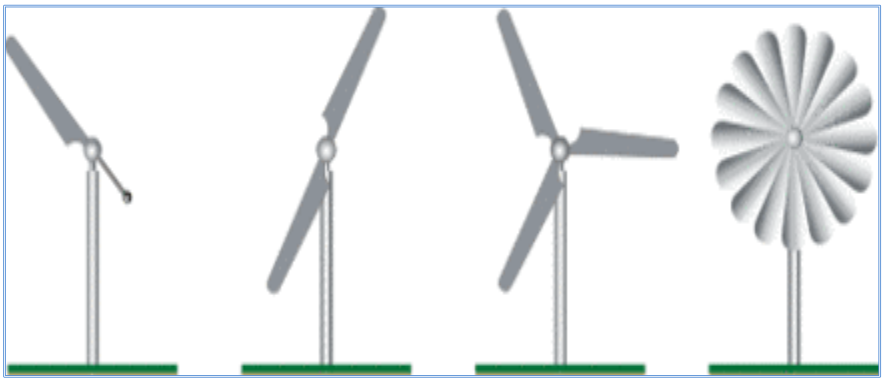


Figure I. 6 : Eolienne à axe horizontal

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

1) Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.

2) Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.

3) Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.[5]

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

1) Coût de construction très élevé

2) L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident [24].

I.4.2.1 Les éoliennes à marche lente

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. [18]



Figure I. 7 : Eolienne à marche lente

I.4.2.2 Les éoliennes à marche rapide

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible comme le montre la figureI.8.[9]

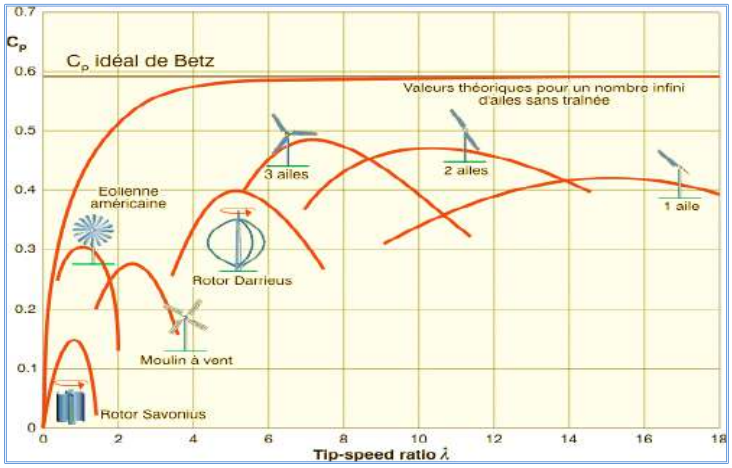


Figure I. 8 : La courbe de l'evolution du coefficient de puissance en fonction de la vitesse specifique des eoliennes .

I.5 Principaux éléments constituants 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 :

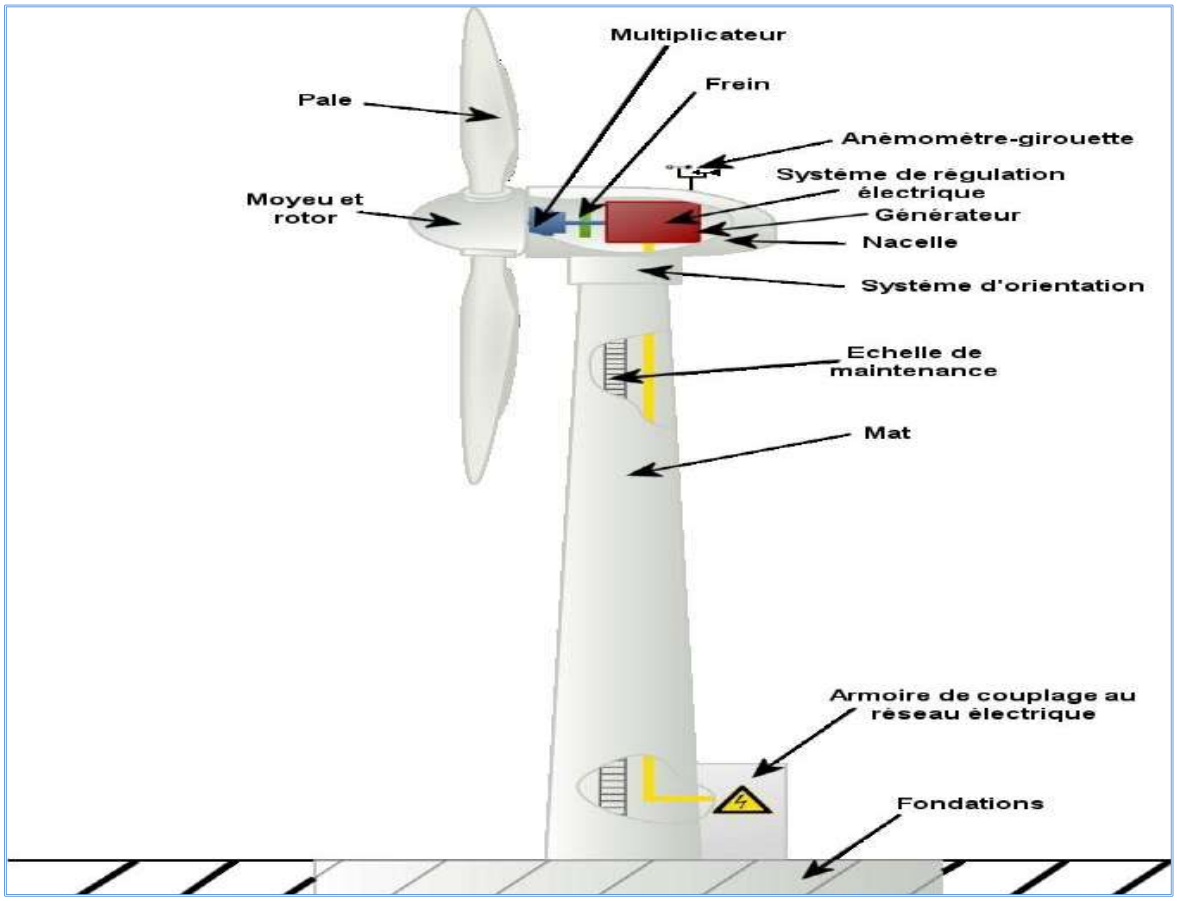


Figure I. 9 : Les principaux éléments constituants une éolienne

- ***Le mât*** : c'est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, qui doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toute fois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [14]

- ***La nacelle :*** elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.[9]

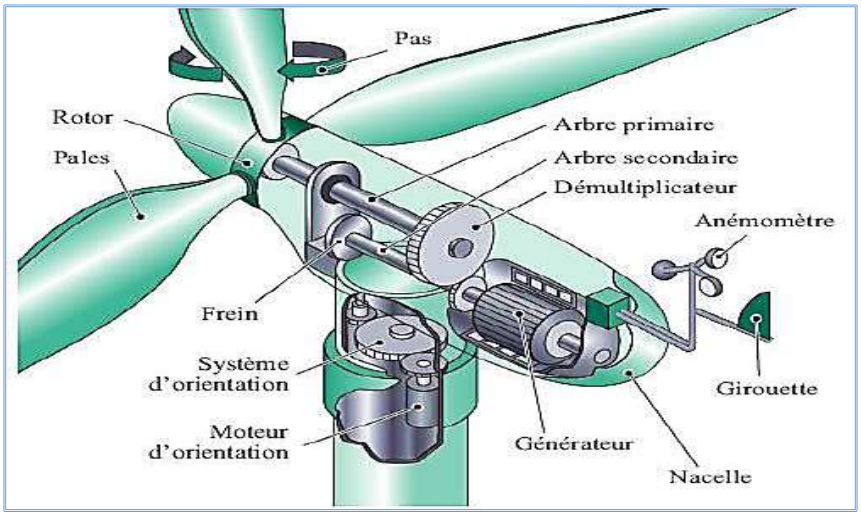


Figure I. 10 : Les principaux éléments constituants dela nacelle

- ***Le rotor :*** formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la palepermettant à la génératrice de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance[3]. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientationdes pales est simplifié voirsupprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont

elles sont constituées. Actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique.[14]

I.6 Technologie d'éoliennes de grande puissance

Dans cette section, la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sera brièvement présentée. Les trois technologies d'éoliennes de grande puissance couramment utilisées seront ensuite discutées en se focalisant sur la machine asynchrone à double alimentation.[18].

I.6.1 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'énergie éolienne est caractérisée par des déplacements de masse d'airà l'intérieur de l'atmosphère[7]. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui engendre la rotation des pales de l'éolienne .Cette énergie et transmise à l'arbre lent puis à l'arbre rapide, enfin la génératrice transforme l'énergie de ce dernier en énergie électrique.

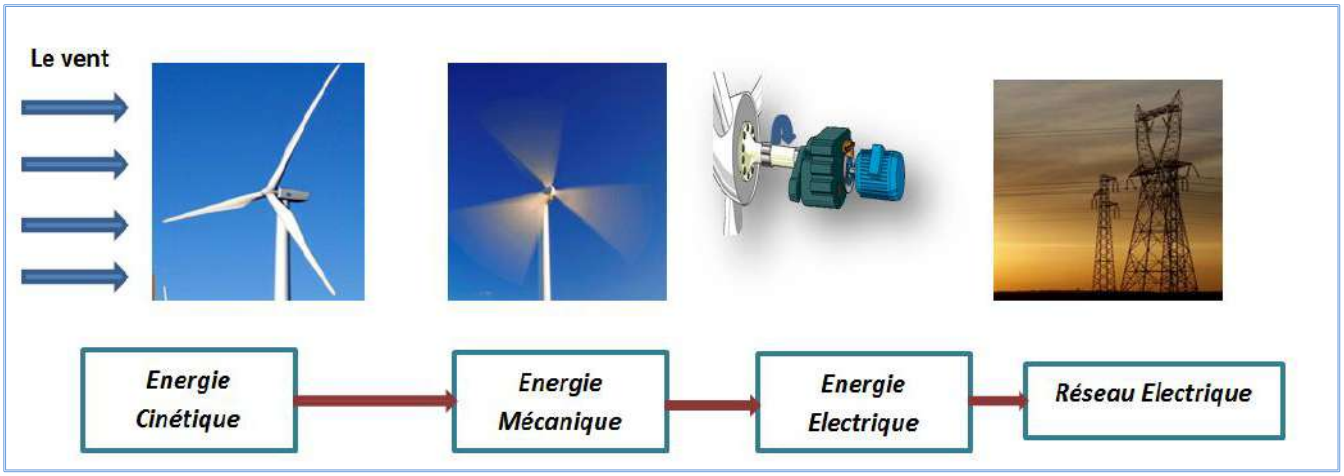


Figure I. 11 : Le Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

I.6.2 Eolienne à vitesse fixe

Les éoliennesà vitesse fixe sont les premièresà avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. [40]

Le couple mécanique entrainant (produit par la turbine)tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une vitesse mécanique supérieure à la vitesse de synchronisme de la génératrice il est nécessaire d'ajoute un multiplicateur pour adaptée la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.[40]

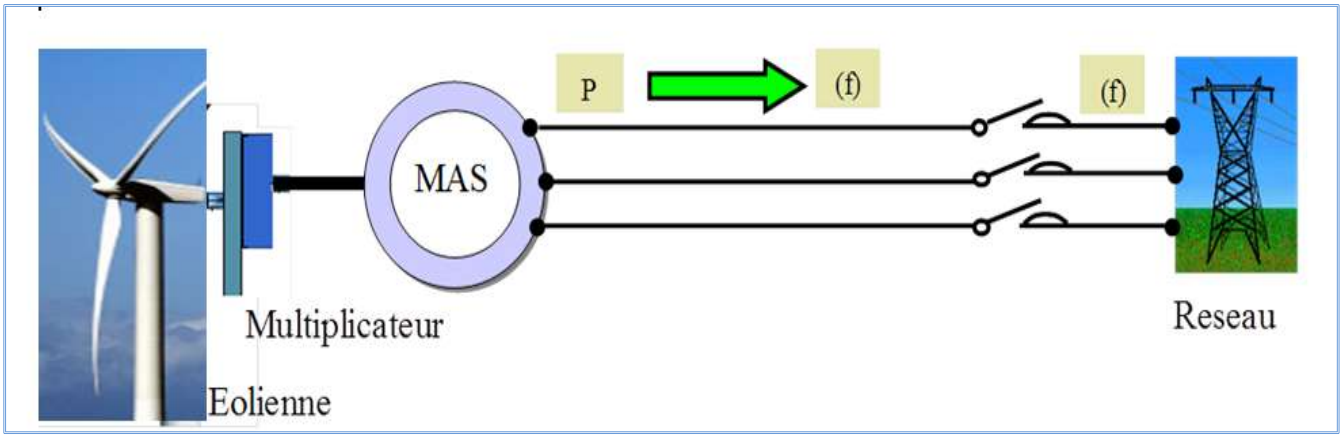


Figure I. 11 : Eolienne à vitesse fixe

I.7.Intérêts de la vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable consiste à faire tourner la machine à une vitesse de telle sorte que la puissance extraite sera toujours maximisée ; il suffit de suivre le tracé parabolique de la figure(I .12). On parle alors d'un algorithme de poursuite du point maximal (maximisation de puissance), encore appelé algorithme d'MPPT (Maximum Power Point Tracking**).[8]**

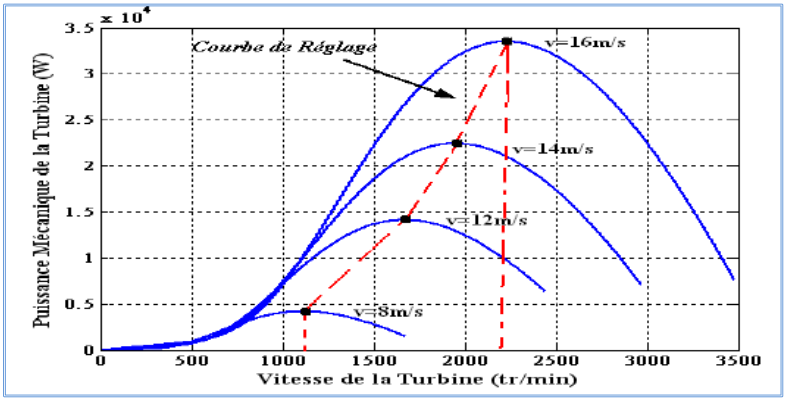


Figure I. 12 : lacourbe de la puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de la turbine

I.7.1 Eolienne isolée (autonome)

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de Watt à quelque dizaine de kW.

- Les plus petites sont destinées à l'alimentation de domicile, de camping ou encore de station radio.
- Les éoliennes de puissance plus grandes sont destinées à alimenter des villages isolés.Toutefois elles sont toutes deux des éoliennes qui délivrent de petites puissances et sont donc associées à une unité de stockage. [15]

I.7.2 système hybride

Les éoliennes peuvent être intégrées dans des systèmes hybrides .Ce sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie commeexemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques. On a le plus souvent recours à ces systèmes pour alimenter des iles et des zones isolées.Or l'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur. [25]

I.7.2. Eolienne connecté au réseau

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

La puissance des turbines éoliennes ne doit pas être nécessairement commandée en fonction de la demande instantanée d'un client spécifique, Le manque de puissance délivrée par les éoliennes est compensé par les centrales conventionnelles, Ainsi, le fonctionnement des turbines éoliennes connectées aux réseaux est techniquement moins complexe que son application individuelle isolée.[24]

Cependant l'énergie éolienne reste une source aléatoire donc le stockage d'énergie joue un rôle flexible et multifonctionnel dans le réseau d'alimentation d'énergie électrique, en assurant un management plus efficace des ressources disponibles. En combinaison avec les systèmes de production d'énergie électrique par la conversion des énergies renouvelables, les Systèmes de Stockage d'Energie (SSE) peuvent augmenter la valeur de l'énergie électrique générée par les centrales éoliennes , en fournissant de l'énergie pendant les périodes de pointe et en accumulant l'énergie pendant les périodes où la demande d'énergie est réduite .[9]

I.8. Description de la Machine A Double Alimentation

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables, Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent**.** [40]

I.8.1. Classification des machines à double alimentation

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées, leurs principes et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous.

I.8.1.1 Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente unstator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes[43].

LaFigure I.13 illustre le schéma de principe de ce type de machines, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. [18].

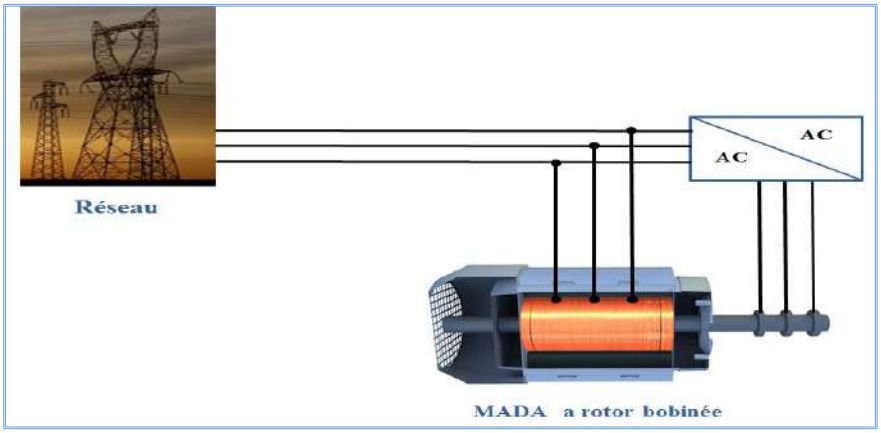


Figure I. 13 : Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)

I.8.1.2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste en deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement. Le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/AC de fréquence comme il est montré par la Fig. I.14. Il est également possible de piloter l'ensemble du système à travers le stator alimenté par le convertisseur. Ce type de machines offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances actives et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard.[18]

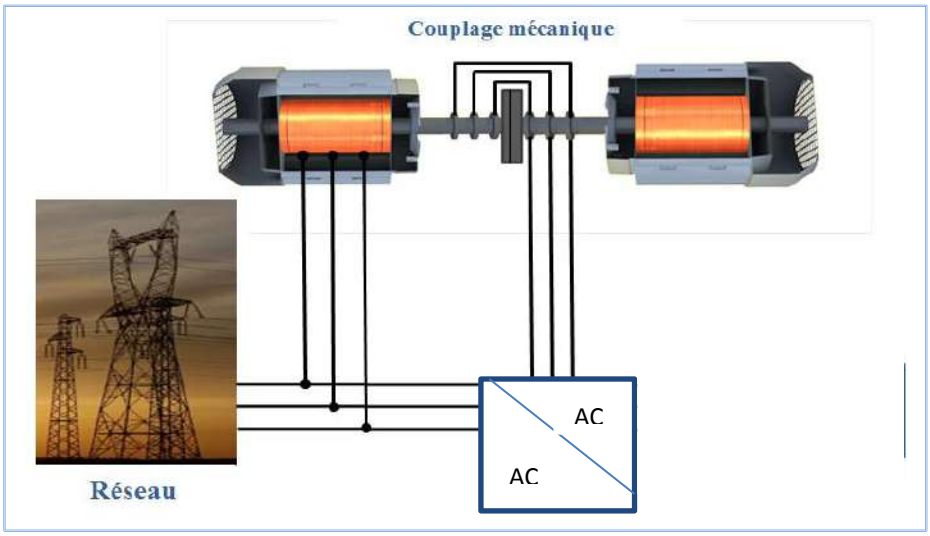


Figure I. 14 : Machine à doub le alimentation en cascade asynchrone

I.8.1.3 Machine à double alimentation sans balais

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC Fig. I.15.Le rotor de cette machine possède un nombre de paires de pôles des deux enroulements statoriques. [18].

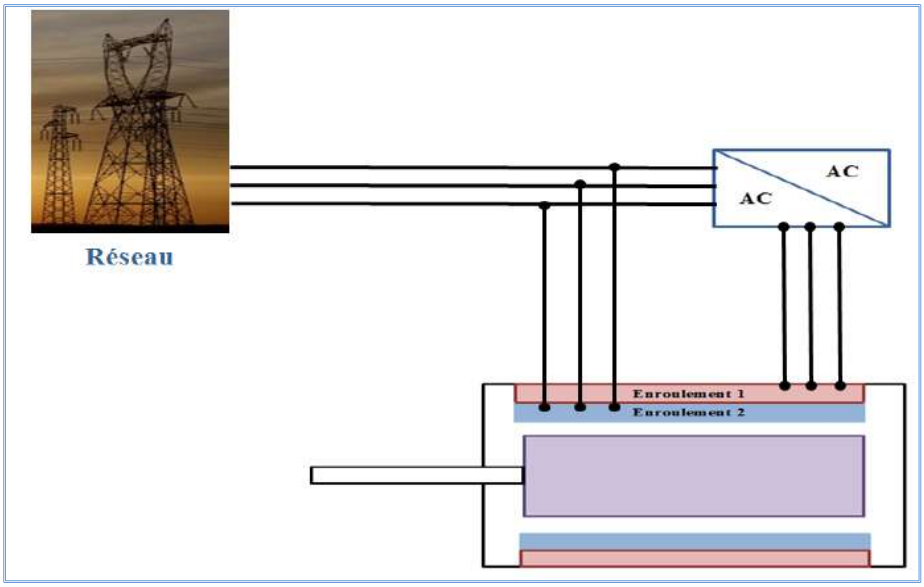


Figure I. 15 : Machine à double alimentation sans balais

I.9 Comparaison entre les différentes variantes de la Machine A Double Alimentation

Le tableau I.1 donne une brève classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives dans la littérature. Dans ce cas, les critères de comparaison sont fondés sur : la complexité de la construction de la machine, la puissance traitée par le convertisseur associé à la machine et la stratégie de contrôle.

On peut conclure que, toutes les machines à double alimentation citées dans le tableau I.1 doivent fonctionner pour une vitesse autour de celle de synchronisme et nécessitent pour leur commande un convertisseur bidirectionnel de puissance. Dans cette condition, plus la gamme opérationnelle est étroite (qui doit être autour de la vitesse de synchronisme) plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite. De point de vue stratégie de commande il n'y a pas de grande différence entre ces variantes**.** [18]

Tableau I. 1 : Comparaison entre les différentes variantes de la MADA

Type de la machine à double alimentation	Construction de machine	Convertisseur de puissance	Méthode de commande
Machine à rotor bobine	Etablie	Dépend de la vitesse opérationnelle	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine en cascade asynchrone	Difficile	Comme la machine à rotor bobiné	Orientation du flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive
Machine sans balais	Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche	Comme la machine à rotor bobiné	Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la machine à rotor bobiné

I.10 Mode de fonctionnement de la MADA

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants. C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur. [18]

➢ ***Fonctionnement moteur hypo synchrone (g > 0)***

Pour ce cas la machine, en mode de fonctionnement moteur ,qui tourne à une vitesse faible inferieure a la vitesse de synchronisme.la puissance Ps fournie par le réseau au stator, la puissance P_r (la puissance de glissement) transite par le rotor est réinjectée au réseau (**Figure I.16.)**

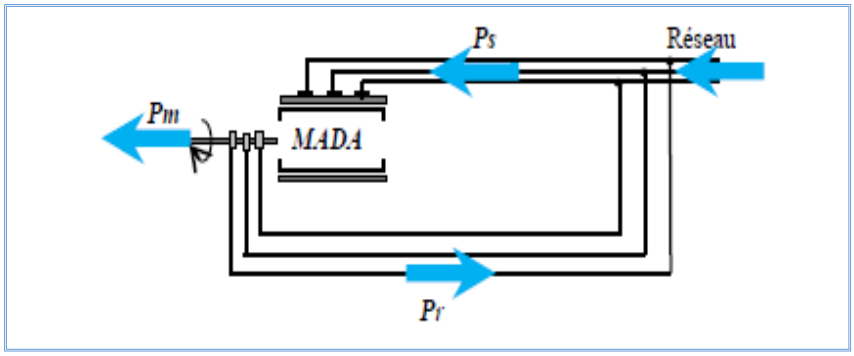


Figure I. 16 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

➢ ***Fonctionnement moteur hyper synchrone (g < 0)***

La **figure (III.2.)** montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et au rotor, on a donc un fonctionnement a vitesse supérieure aux vitesses de synchronisme.

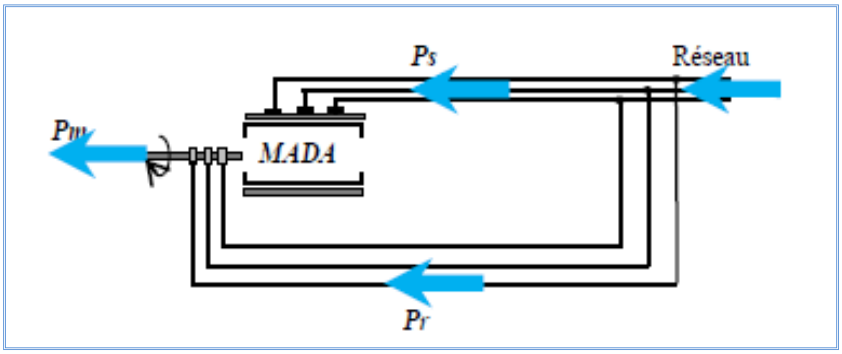


Figure I. 17 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

➢ ***Fonctionnement générateur hypo synchrone (g>0)***

En mode de fonctionnement hypo synchrone, la vitesse mécanique est faible alors le réseaureçoit une puissance statorique $P_s$et envoie une puissance rotorique vers la machine.

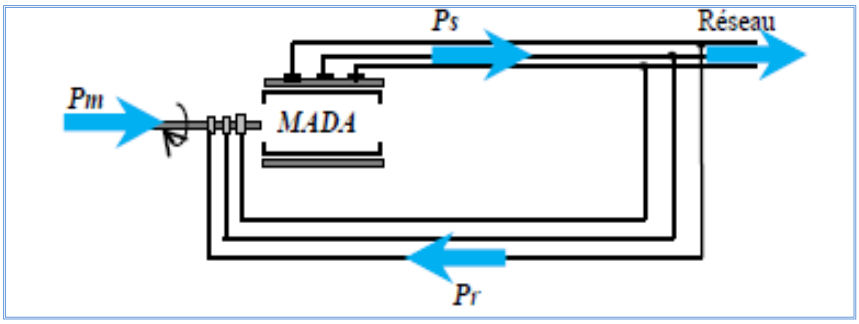


Figure I. 18 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

- ***Fonctionnement générateur hyper synchrone (g<0)***

En mode de fonctionnement hyper synchrone la vitesse mécanique augmente jusqu'à une vitesse supérieure à celle de synchronisme, dans ce cas les deux puissances sont envoyées de la machine vers le réseau.

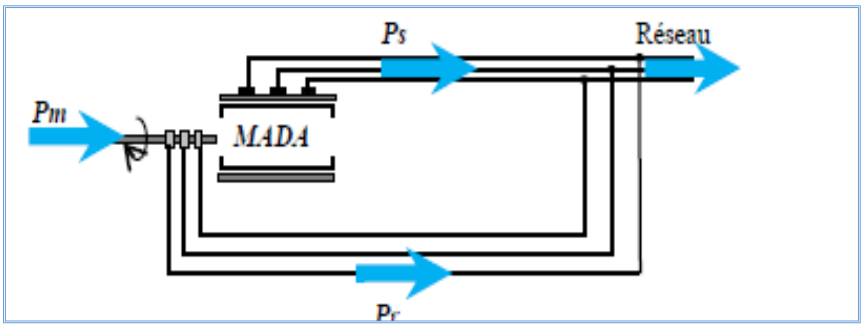


Figure I. 19Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

I.11.Mise en œuvre des éoliennes

I.11.1. Recherche du rendement maximum MPPT

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient Cp. Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique $C_{p,}$ n'est pas connue ;

• La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales. [11]

I.11.2. Gestion du réseau électrique

Pour pouvoir fonctionner correctement et produire de l'énergie électrique, la majorité des éoliennes ont besoin :

- d'un réseau puissant qui impose la fréquence.
- La tension que le réseau puisse fournir la puissance réactive nécessaire aux génératrices asynchrones par exemple et pouvoir absorber en permanence toute la puissance produite par l'éolienne, Tout ceci est très complexe à gérer car la puissance produite par les éoliennes est très fluctuante à cause des aléas du vent. Une éolienne d'1MW ne peut pas produire en permanence cette puissance nominale ; on ne peut compter que sur 20 à 30% de cette puissance en moyenne. C'est pour cela qu'il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites entre elles afin d'avoir une production qui puisse se stabiliser.

Par contre, de par leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, les éoliennes peuvent fournir des services système. En effet, il est possible de régler la puissance produite en modifiant le pas des pales de l'hélice.

Si pendant une période de fort vent il y a un excédent d'énergie électrique au niveau du réseau, pouvant conduire à une déstabilisation de la fréquence, il est possible de limiter la puissance produite par les éoliennes :

Ceci est effectué par l'action sur la commande de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de diminuer le rendement de l'hélice.De plus, en intervenant sur la commande des onduleurs associés à la génératrice, on peut faire varier la valeur de la puissance réactive produite par un parc éolien.

Ainsi, en fonction de la chaine de conversion choisie, il est possible d'absorber ou fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau. Le gestionnaire de réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à la correction du facteur de puissance du réseau. Cette option est désormais incorporée à la plupart des éoliennes utilisant des machines asynchrones à double alimentation.

Cependant, s'il y a une période sans vent, où on ne peut rien faire et l'exploitant du réseau électrique ne peut donc pas compter sur les éoliennes comme source de production fiable. On peut cependant prédire les conditions de vent et donc de production d'énergie électrique avec quelques jours d'avance. Ceci reste de la prédiction météorologique et ne change rien.[18]

I.12. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les différents types d'aérogénérateurs, leurs différentes configurations ainsi que leur domaine d'applications. Les technologies d'éoliennes de grande puissance tel que les différentes machines asynchrones ont été exposées en soulignant leurs capacités de réglage de la puissance générée. Un intérêt particulier a été consacré à cette dernière technologie d'éoliennes basée sur la machine asynchrone à double alimentation. Car elle réduit le dimensionnement des convertisseurs statiques à 30 % en véhiculant seulement la puissance de glissement. En outre, elle permet un réglage de la puissance réactive.D'après cette étude, on constate que la MADA offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste, notamment dans les systèmes de génération de l'énergie électrique.La dernière partie de ce chapitre présente un autre domaine de recherche qui concerne la gestion du réseau électrique en intégrants une énergie renouvelable : l'énergie éolienne. Nous allons, dans notre étude, nous intéresser à ces différents aspects en modélisant une éolienne connectée au réseau de distribution.



ChapitreII

Modélisation et méthodes de commande de système éolien basé sur la machine à double alimentation

II.1. Introduction :

La plupart des systèmes de génération d'énergieélectriqueà base d'aérogénérateur sont constitués d'une génératrice asynchrone a double alimentation car elle possède des avantages adaptes a la production électrique de grande puissance.

Le système de conversion éolien base sur la MADA est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre passif triphasé de courant.

La turbine éolienne entraine la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu.

La présentation de la modélisation des éléments de ce système éolien ainsi que leur étude et l'analyse de ses résultats, fera l'objet de ce chapitre.

II.2. Modèle de la Turbine:

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[26].

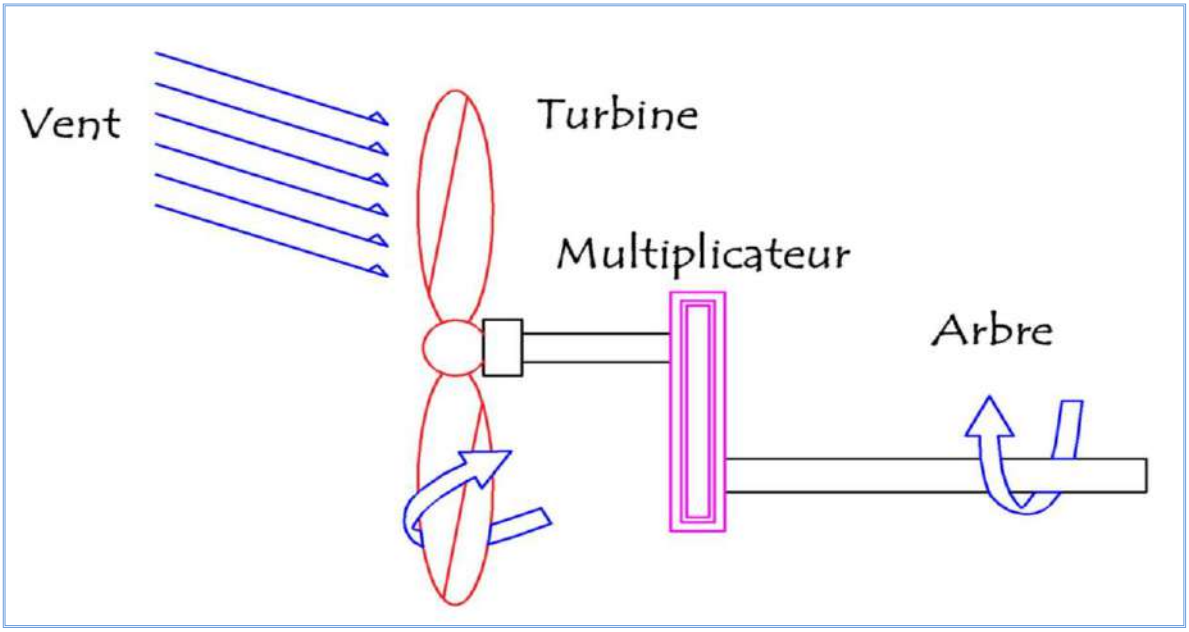


Figure II.1: Le schema de la partie macanique de la turbine éolienne.

II.2.1. Modèle des pales

La puissance cinétique du vrnt est donnée par :

$$P_v = \frac{\rho \,.\, s.V^3}{2} \tag{II.1}$$

L'énergie du vent ne peut pas être totalement extraite, On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de performance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écritalors[25] :

$$P_{aéro} = C_p(\lambda\,,\beta)P_V = C_p(\lambda\,,\beta)\frac{\rho S v^3}{2} \tag{II.2}$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique $C_p$est donné par l'expression suivante :

$$C_{aéro} = \frac{1}{2\,\Omega_t} C_p(\lambda\,,\beta)\rho S v^3 \tag{II.3}$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{R\,\Omega_t}{V} \tag{II.4}$$

Nous choisissions une turbine de 4KW, l'équation générale pour exprimer le coefficient de performance $C_p(\lambda\,,\beta)$est donnée par :

$$C_p = f(\lambda\,,\beta) = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_I} - C_3 - C_4\right) exp\left(\frac{C_5}{\lambda_I}\right) + C_6\lambda \tag{II.5}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_I} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{II.6}$$

$C_1 = 0.5176$ $C_1 = 116$ $C_1 = 0.4$ $C_1 = 5$ $C_1 = 21$ $C_1 = 0.0068$

II.2.2. Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour objectif d'adapter la vitesse de la turbine Ω_t, assez lente, à la vitesse de la génératrice **,**il est modélisé par les deux équations suivantes :

$$\Omega_t = \frac{1}{G}\Omega \tag{II.7}$$

$$C_g = \frac{1}{G}C_{aéro} \tag{II.8}$$

II.2.3. Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{turbine} et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [43]

$$J = \frac{J_{\text{turbine}}}{G^2} + J_g \tag{II.9}$$

La turbine génère un couple aérodynamique transmis au multiplicateur . Ce couple peut être calculé à partir des valeurs de la vitesse du vent et le coefficient de performance C_p optimal déterminé en fonction de l'angle d'orientation des pales β et la vitesse spécifique λ.

Le multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple aérodynamique respectivement en vitesse mécanique et couple de l'arbre moteur. La vitesse de rotation de la turbine peut être ainsi commandée soit par l'action du couple électromagnétique de la machine électrique, soit par action sur l'angle d'orientation des pales[26].

II.3. Stratégie de maximisation de puissance MPPT

L'objectif de la régulationest double : d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance [40]. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_nà une vitesse de vent nominale V_n, au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale $V_m$qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement[18].

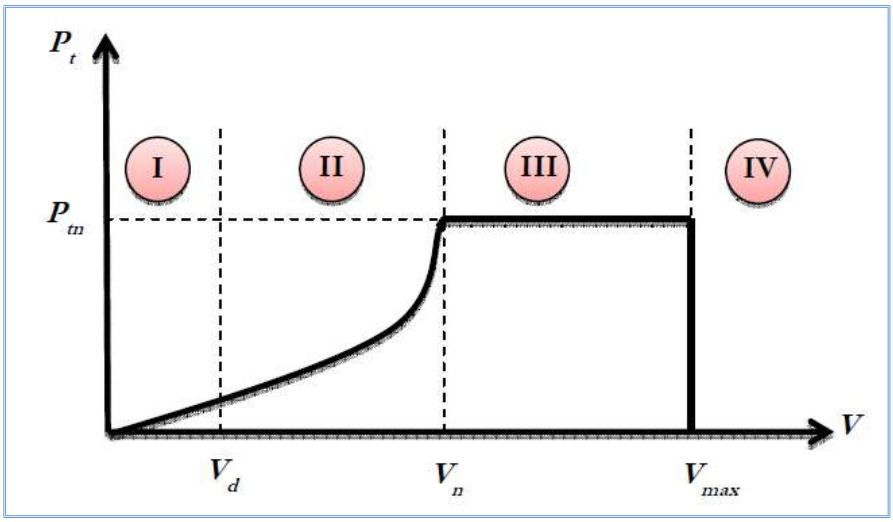


Figure II.2 courbe de la puissance delivree par la turbine en fonction de la vitesse du vent

- ✓ La zone I, ou P = 0, la vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergieàcapter est trop faible ;
- ✓ La zone II, le maximum de puissance est capte dans cette zone pour chaque vitesse de vent ;
- ✓ La zone III, ou la vitesse de rotation est maintenue constante et ou la puissance P fournie resteégale a Pm ;
- ✓ La zone IV, la vitesse du vent devient trop forte, la turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

II.3.1.Réglage de vitesse par régulateur de type classique PI

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé . Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur. La vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique. La structure du régulateur de vitesse est montrée sur la figure (II.3)

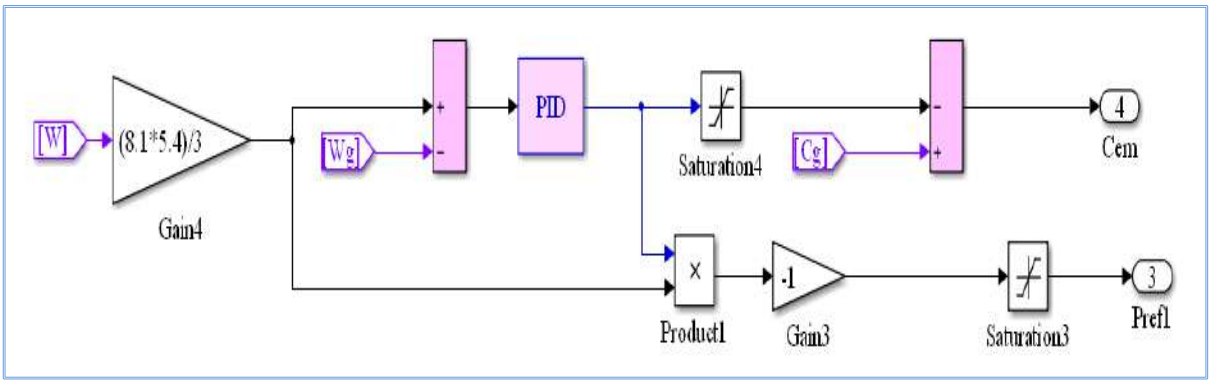
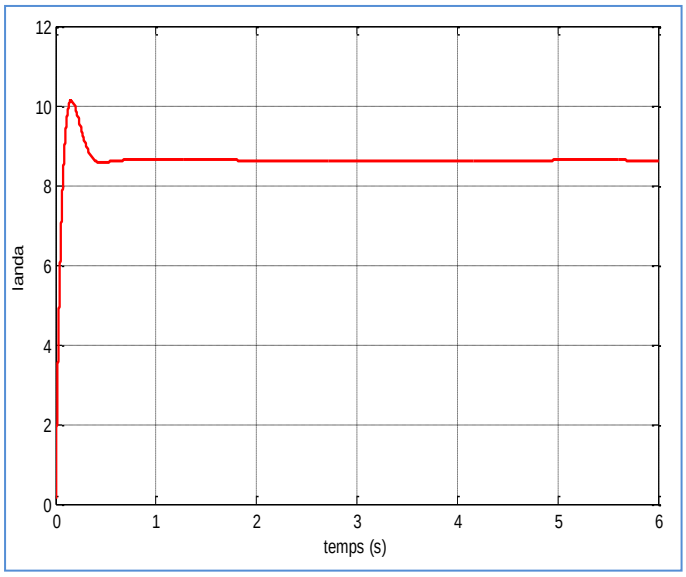


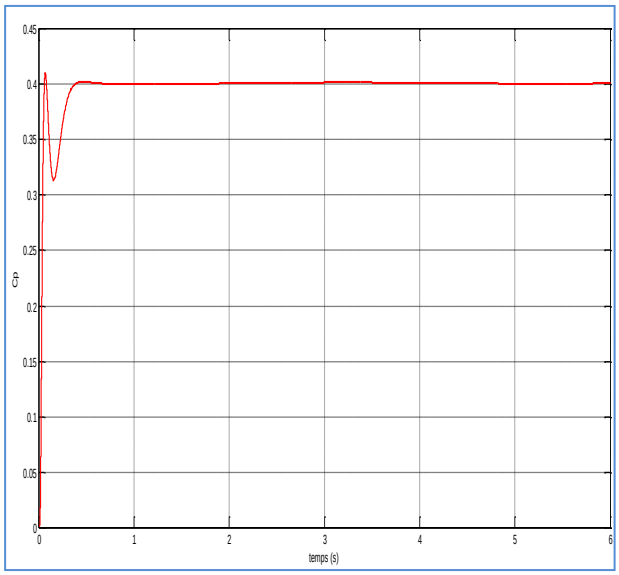
Figure II.3 structure du régulateur de vitesse

II.3.2 profile du vent

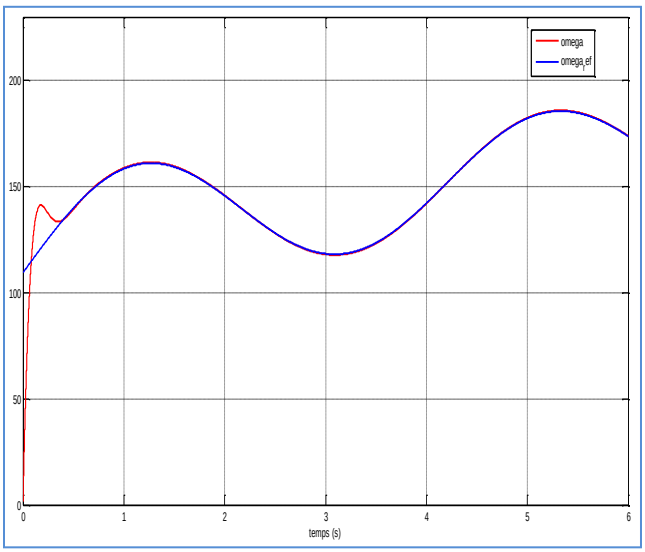
Afin d'étudier le comportement de notre aérogénérateur nous allons l'entrainer à l'aide des paramètres suivants :



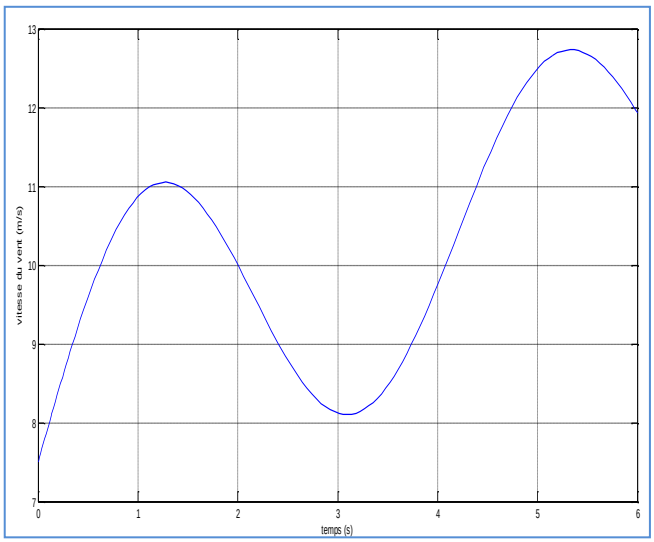
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.4 le profil du vent :(a) Le ratio de vitessespecifique. (b) le coefficient de performance ou coefficient de puissance (Cp) .(c) la vitesse de rotation et sa référence .(d) la vitesse du vent

La figure (**II.4.d)** représentele vent qui varie de la valeur minimale de 7m/s à la valeur maximale de 12m/s donc le vent est maintenu dans la plage de fonctionnement de l'éolienne.

Le ration de vitesse tend vers une valeur de 8.1 quireprésente le ratio de vitesse optimale comme le montre la figure (**II.4.a)**

Le coefficient de puissance montre sur la figure (**II.4.b)** va vers Cp optimal qui prend la valeur 0.4.

La figure (**II.4.c)** représente la variation des valeurs de la vitesse angulaire mesurée et de vitesse angulaire dereference en fonction du temps. On peut constater que grâce à la méthode MPPT utilisée les deux courbes de la vitesse de rotation mesurée et la référence de la vitesse de rotation se superposent.

II.4. Modèle de la machine asynchrone adouble alimentation

La génératrice asynchrone à double alimentation est classiquement modélisée dans le repère de Park, donnant lieu aux équations suivantes :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \quad \text{(II.10)}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \quad \text{(II.11)}$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\emptyset_{rd}}{dt} - \omega_r \emptyset_{rq} \quad \text{(II.12)}$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\emptyset_{rq}}{dt} + \omega_r \emptyset_{rd} \quad \text{(II.13)}$$

$$\emptyset_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad \text{(II.14)}$$

$$\emptyset_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad \text{(II.15)}$$

$$\emptyset_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad \text{(II.16)}$$

$$\emptyset_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad \text{(II.17)}$$

Le couple électromagnétique est exprimer par :

$$C_{em} = p(\emptyset_{sd} i_{sq} - \emptyset_{sq} i_{sd}) \quad \text{(II.18)}$$

Les puissances active et réactive statorique et rotorique de la MADA sont respectivement.

$$P_S = (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad \text{(II.19)}$$

$$Q_S = (v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}) \quad \text{(II.20)}$$

$$P_r = (v_{rd} i_{rd} + v_{rq} i_{rq}) \quad \text{(II.21)}$$

$$Q_r = (v_{rq} i_{rd} - v_{rd} i_{rq}) \quad \text{(II.22)}$$

II.4.1. Résultats de simulation du comportement de la MADA

Les simulations ont été réalisées avec le logiciel Matlab de la société MathWorks ainsi qu'avec les bibliothèques associées à Matlab : SymPowerSystems et Simulink. Afin d'évaluer les performances apportees par la machine asynchrone double alimentation, nous avonsprocéde à divers simulations.

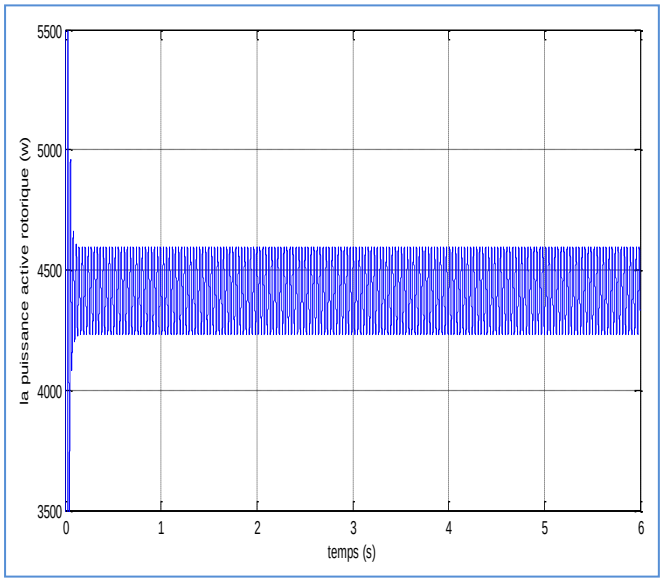
La machine est alimentée directement par deux sources de tensions triphasé parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau 50Hz et une valeur efficace de 380V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude et une fréquence que nous allons varier. Le rotor de la machine est entrainé à une vitesse de 100 rd/s puis 140 rd/s ,afin de faire les tests suivants :

Le premier test consiste à étudier le fonctionnement de la machine en mode hyposynchrone, dans le deuxième nous présentons le fonctionnement de la machine en mode hypersynchrone.

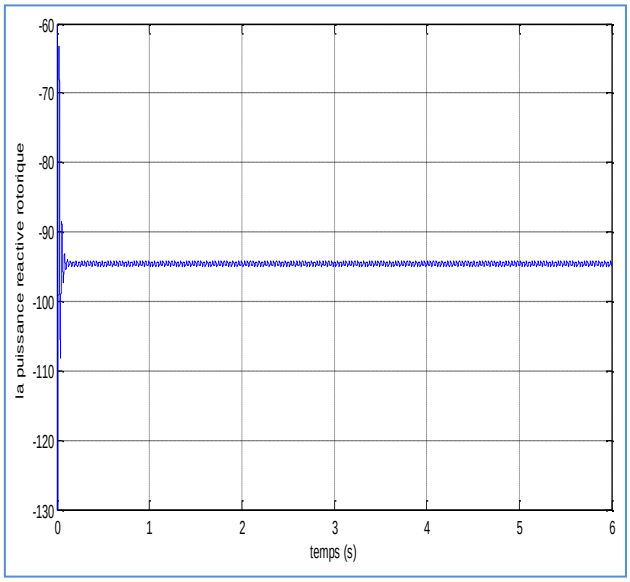
II.4.1.1. Résultats du test en mode hyposynchrone

En premier lieu on va fixer la tension et varier la fréquence comme suit:

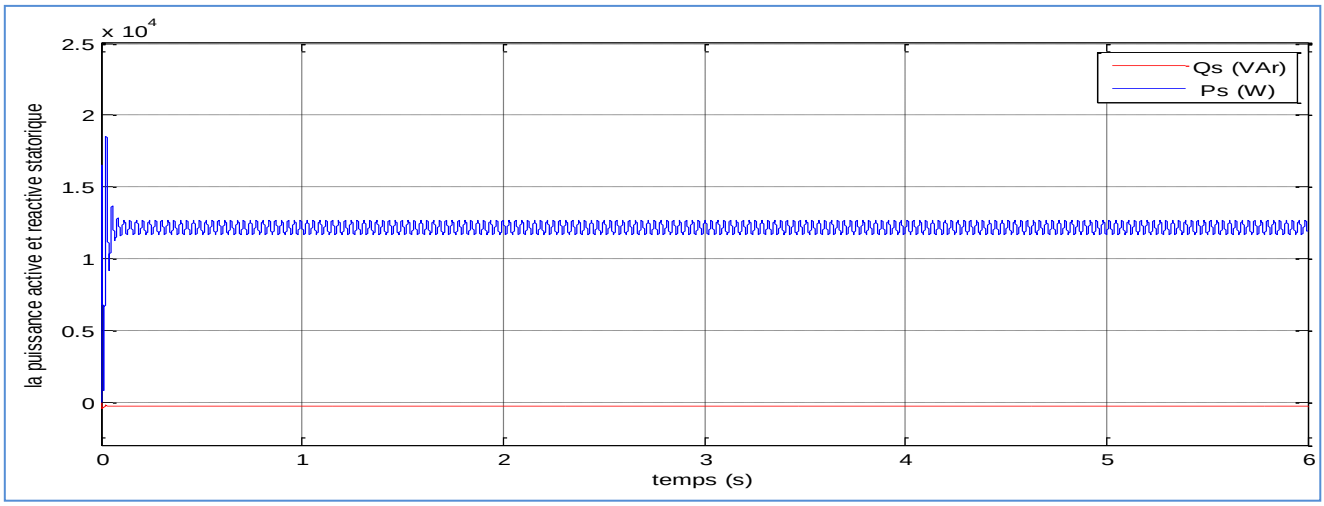
- ***pour Vr =5v et f =50 HZ ω=100 rad/s :***



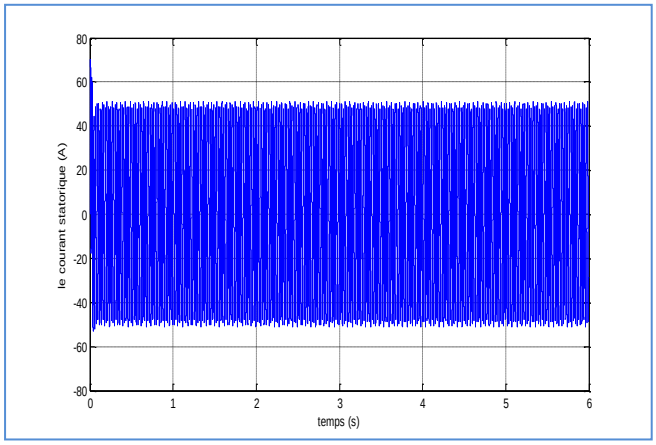
(a)



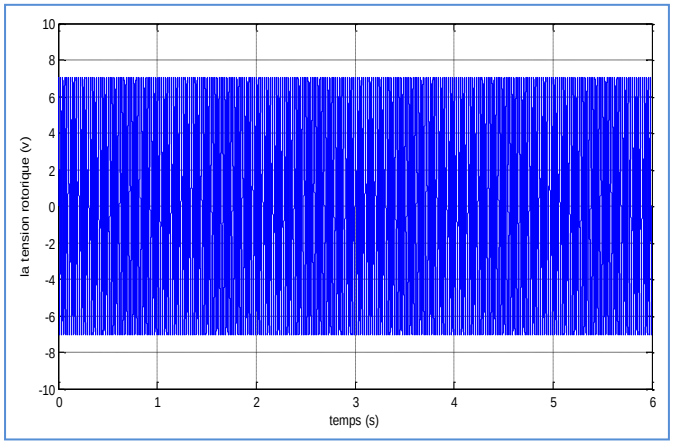
(b)



(c)



(d)

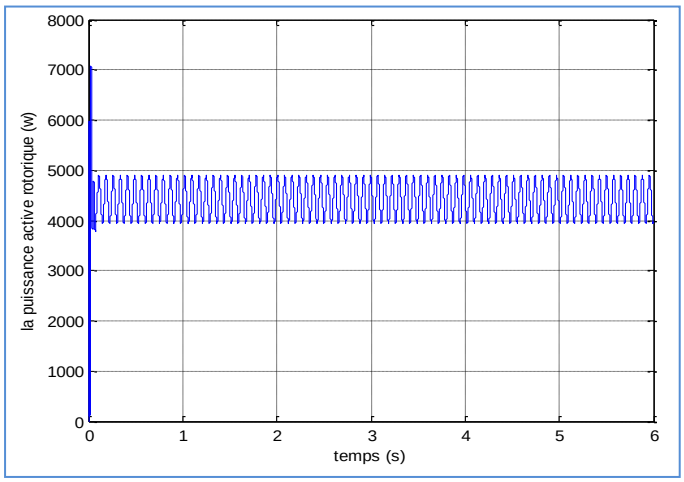


(e)

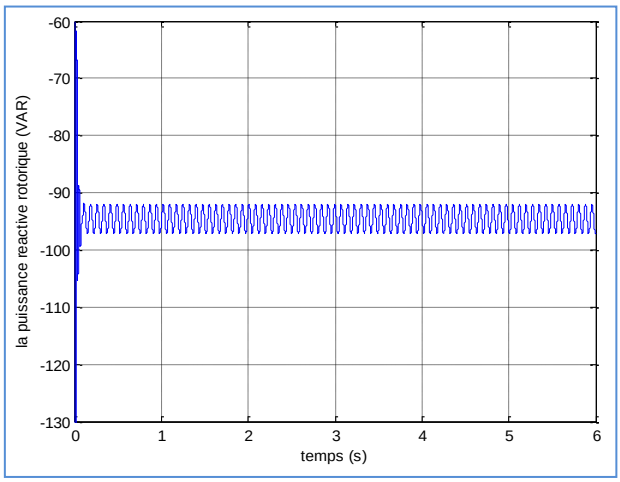
Figure II.5.résultats de la variation du fréquence: (a) la puissance active rotoriques. (b)la puissance réactiverotoriques .(c) la puissance active et réactive statorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique.

D'après la figure (**II.5)** on note que: la puissance active rotorique varie entre 4600 w et 4250 w et la puissance réactive prend la valeur -95 Var.Ces puissances cote statoriques vont alors prendre des valeurs plus élevees. la puissance réactive elle va diminuer de manière notable jusqu'à prendre la valeur -300v .Quand a la tension rotorique elle est alternative et varie entre 7v et -7v . Le courant statorique est très pulsatoire.

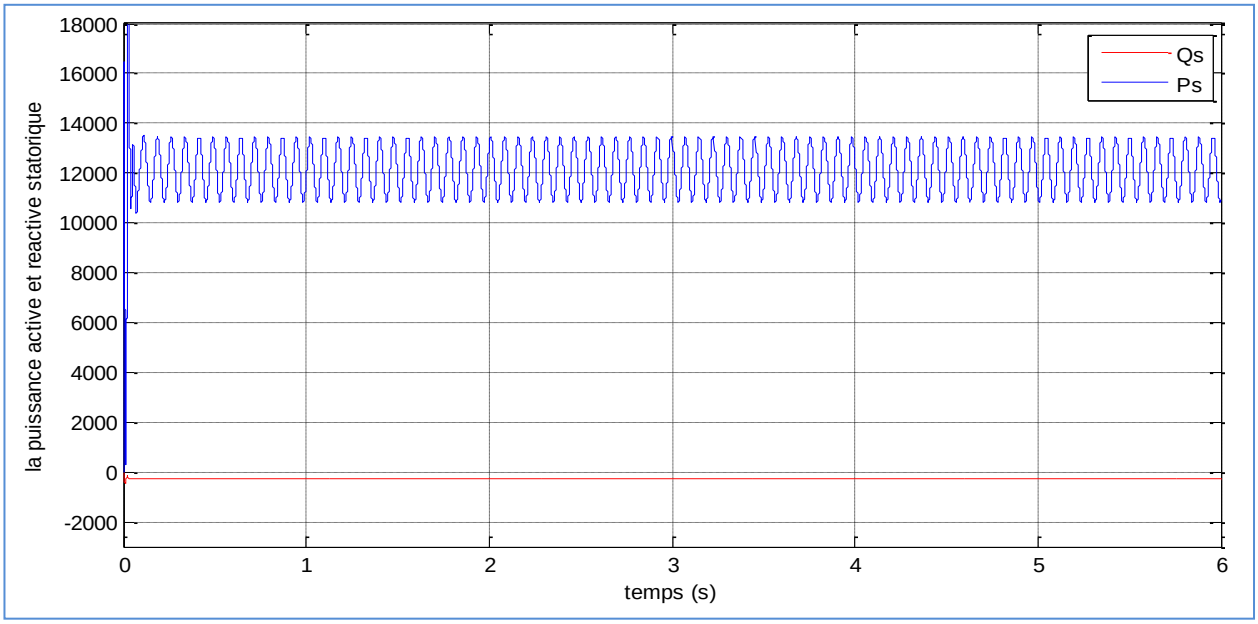
- ***Pour Vr =5v et f =5HZ ω=100 rad/s :***



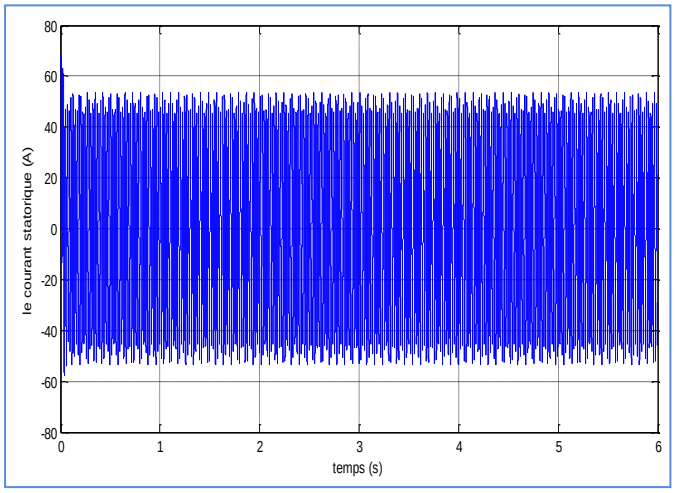
(a)



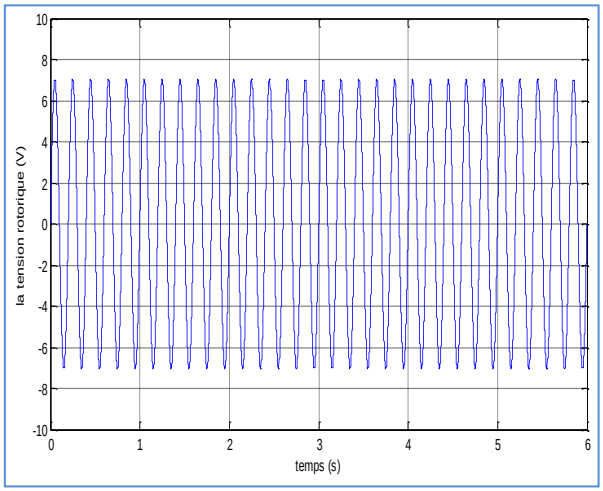
(b)



(c)



(d)



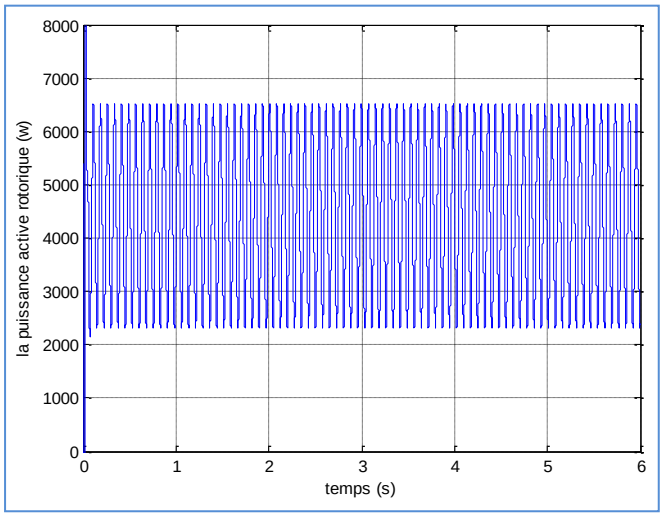
(e)

Figure II.6. résultats de la variation du fréquence : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance réactive rotorique .(c) la puissance active et réactivestatorique. (d)le courant statorique(e) la tension rotorique.

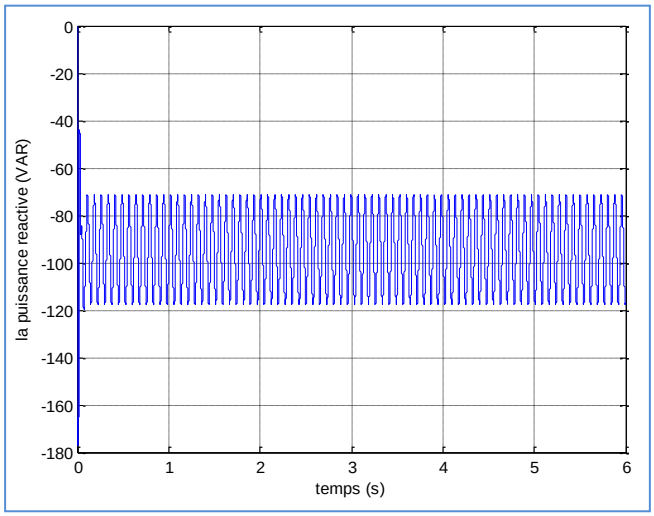
D'après la figure (**II.6)**: onnote quela variation de la fréquence n'affecte pas sur l'amplitude des puissances actives et réactives statorique et rotorique ainsi que la tension rotorique et le courant statorique.On note que la variation de fréquence affecte l'aspect pulsatoire des puissances actives ainsi que la tension rotorique et le courant statorique.

Ensuite, on va fixer la fréquence et varier la tension comme suit.

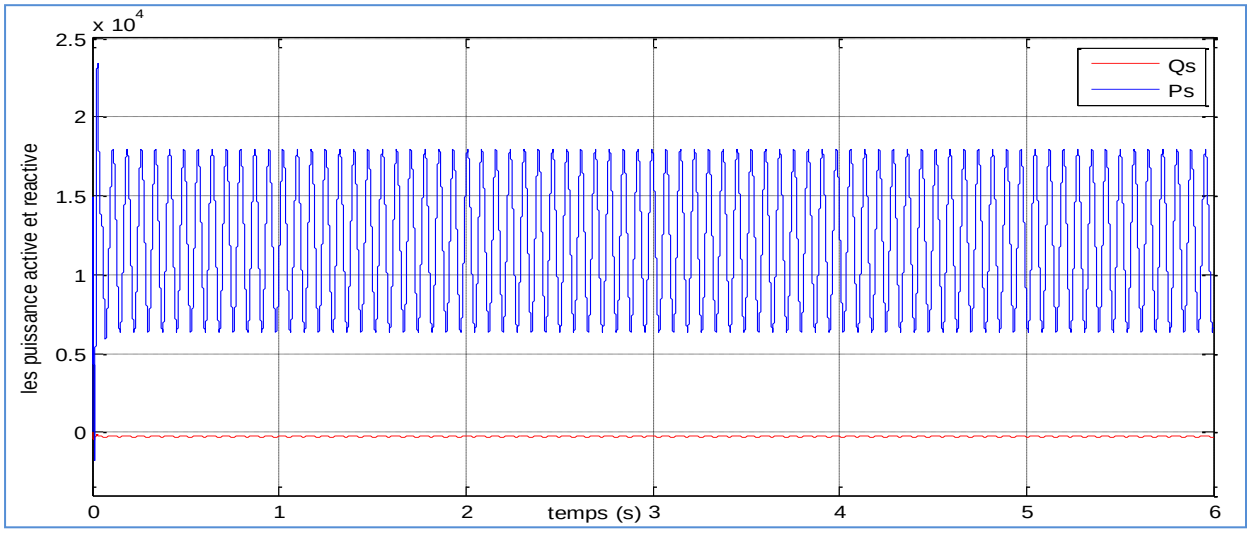
❖ ***pour Vr=22v et f=5 HZ ω=100 rad/s :***



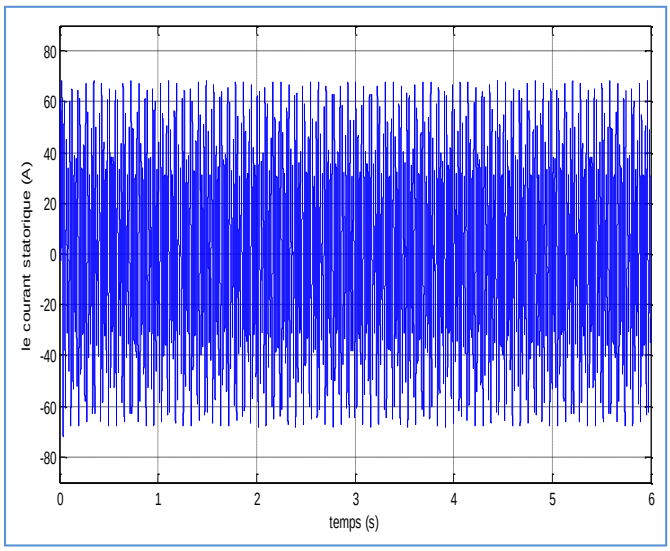
(a)



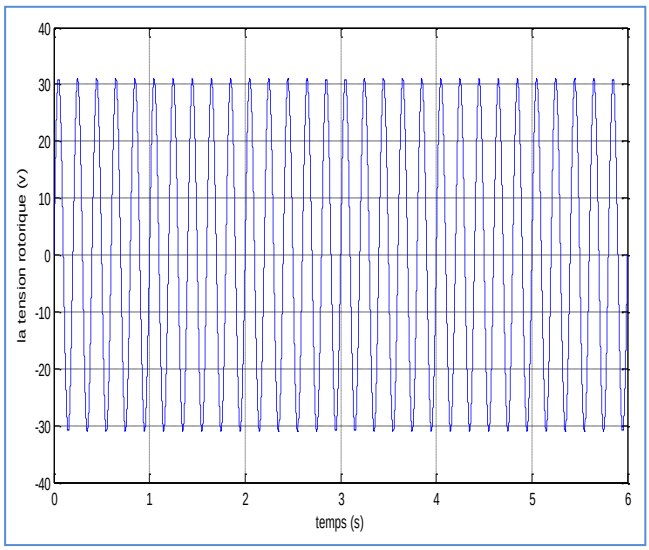
(b)



(c)



(d)

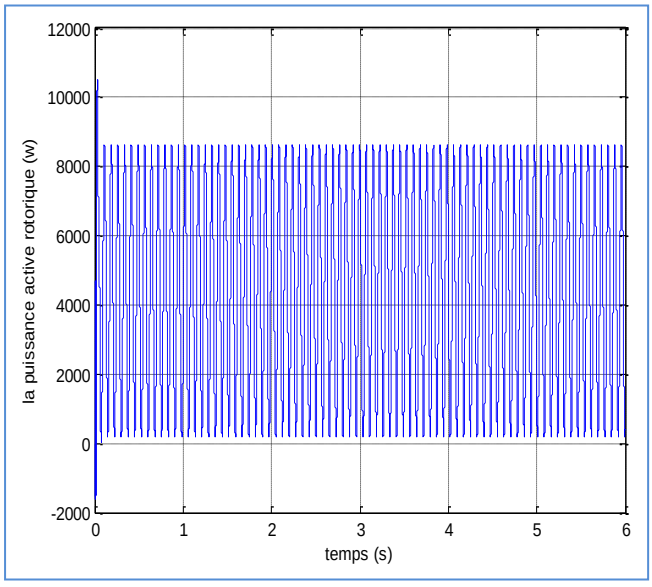


(e)

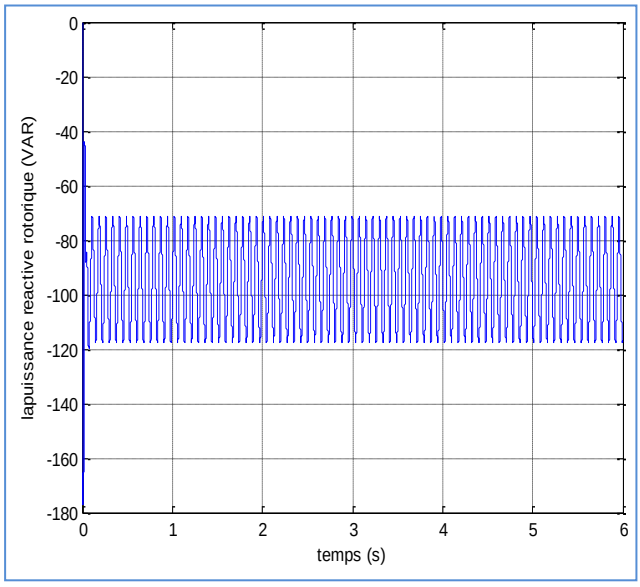
Figure II.7. résultats de la variation du tension : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance reactiverotorique .(c) la puissance active et réactivestatorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique.

D'après la figure (**II.7**) on note que: la puissance active rotorique varie entre 6500w et 2500w et la puissance réactive varie de -87 V_{Ar} à -106VA . La puissancestatorique active est continue alors que la puissance reactive, elle, va diminuer de manière notable. Quand a la tension rotorique, elle est alternative et varie entre 7v et -7v .

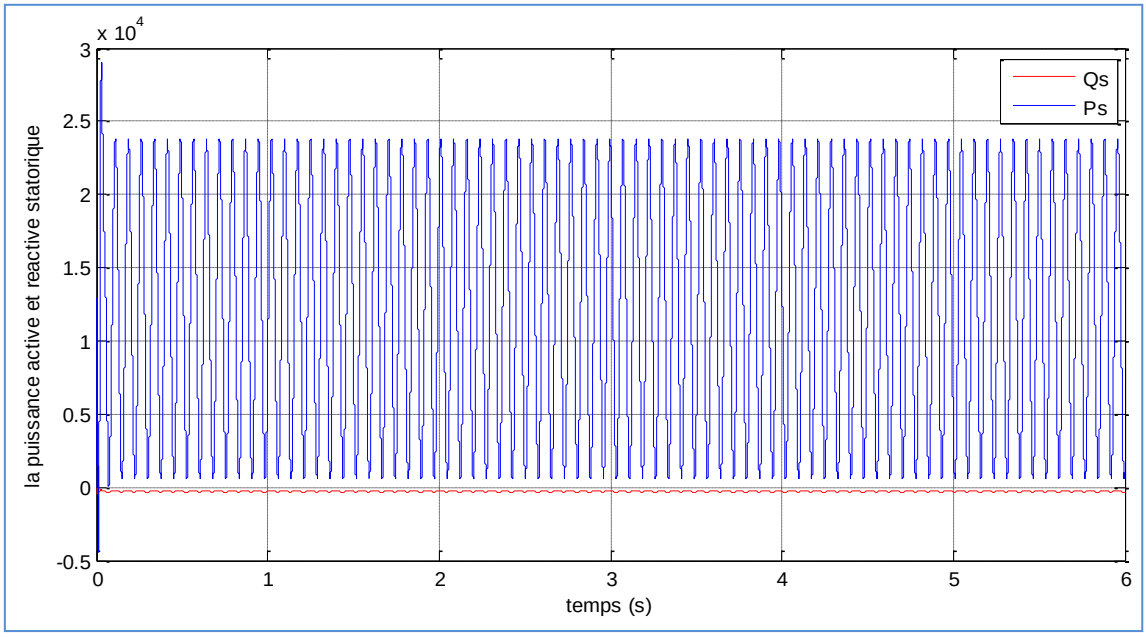
- ***pourVr=44v et f=5 HZ ω=100 rad/s :***



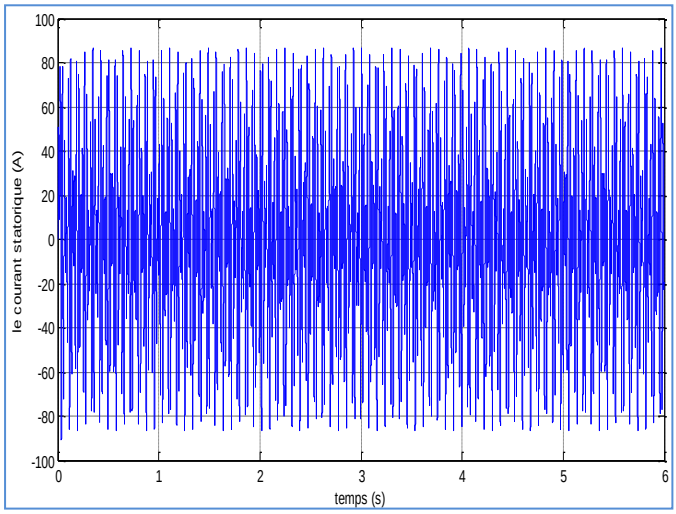
(a)

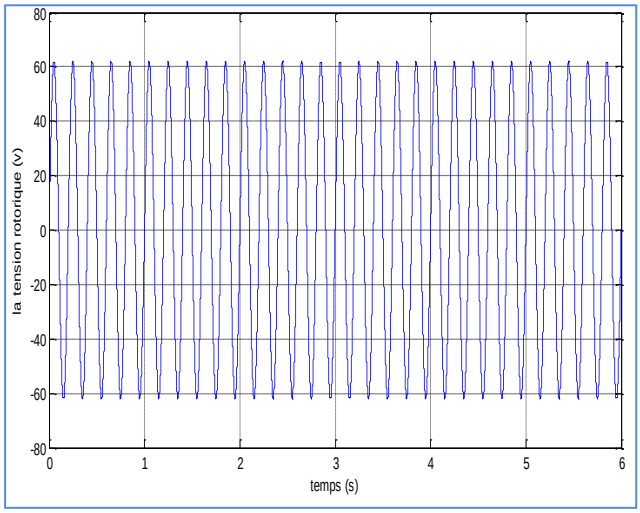


(b)



(c)





(d) **(e)**

Figure II.8. résultats de la variation du tension : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance reactiverotorique .(c) la puissance active et réactive statorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique

D'après la figure (**II.8**) on note que: la puissance active rotorique varie entre 1000 w et -5000w et la puissance réactive varie de 6000 VArà -6000V_{Ar} .Ces puissances cote statoriques vont alors prendre les valeurs de 0 à 24000 VAr.La puissance active statorique est continue alors que la

puissance réactive va diminuer de manière notable .Quand a la tension rotorique elle est alternative et varie entre 60v et -60v . Le courant statorique, quanda lui, varie entre 80A et -80A.

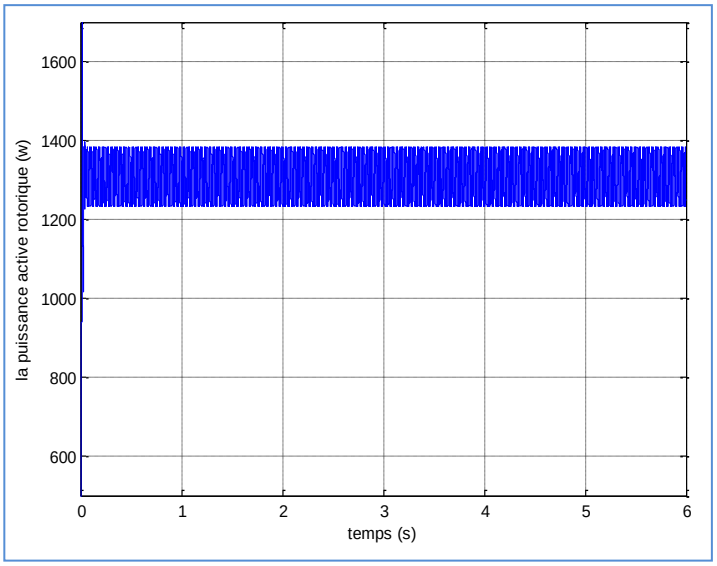
On note que la variation de tension a un impact sur l'amplitude des puissances qui sont augmentées avec l'augmentation de la tension ; et on remarque aussi que plus la tension est élevée plus le système est oscillatoire.

A la suite de ces résultats,nous concluons que: en mode hyposynchrone la puissance est fournie par la MADA.Une partie de cette puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor .

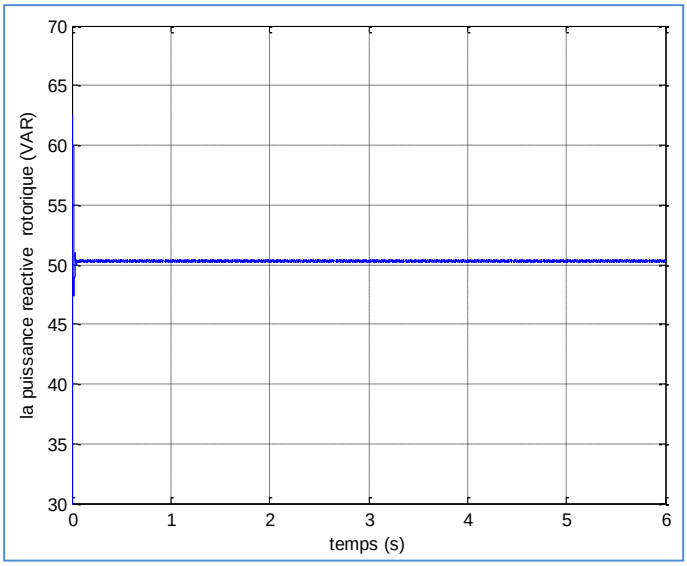
II.4.1.2. Résultats du test en mode hypersynchrone

Tout d'abord, on va fixer la tension et varier la fréquence comme suit:

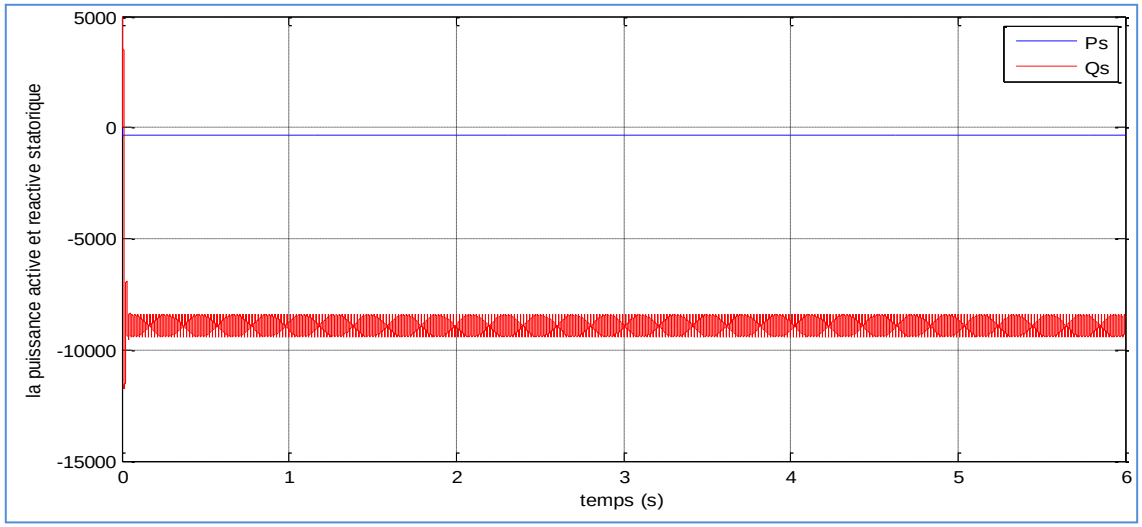
- ***pourVr =5v et f =50 HZ ω=180 rad/s***



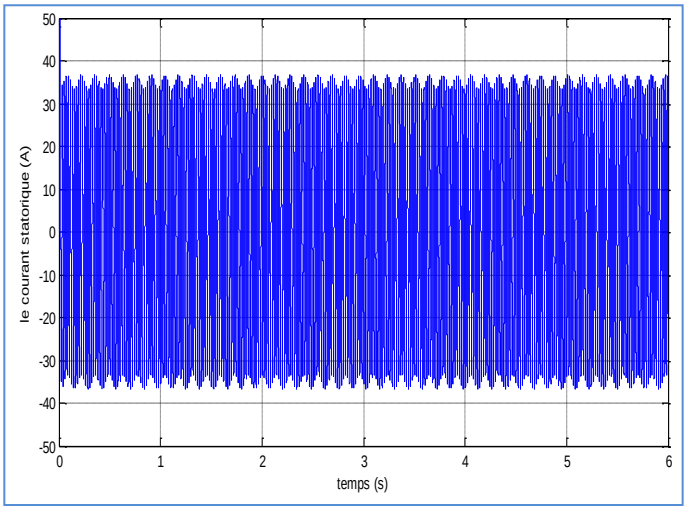
(a)

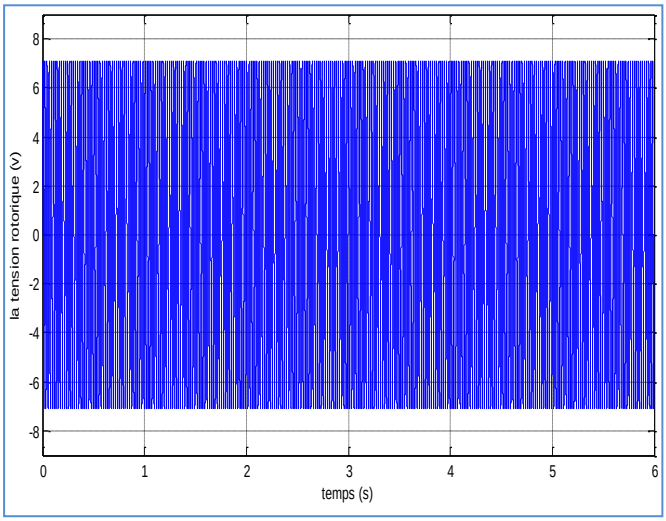


(b)



(c)



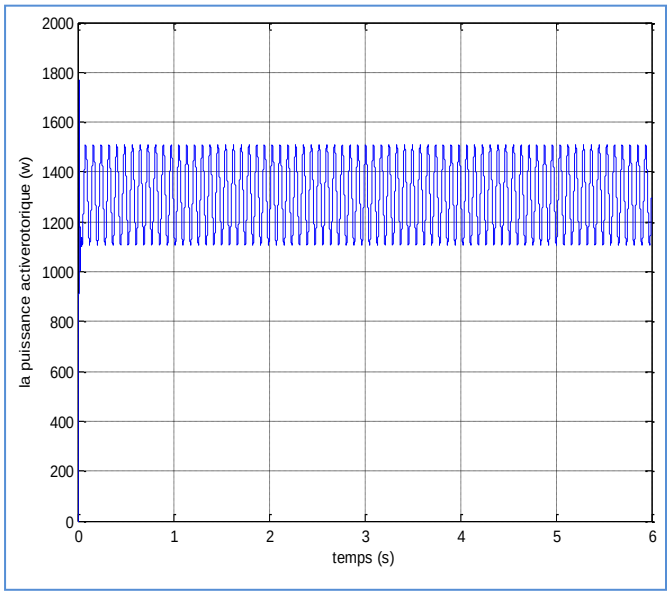


(d) *(e)*

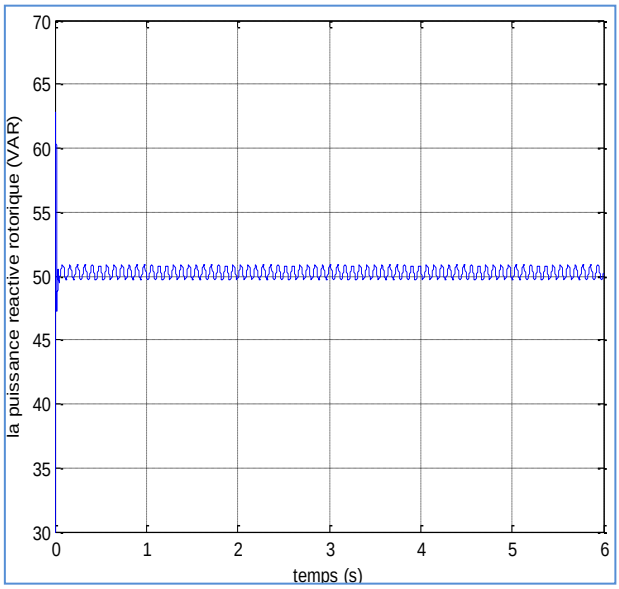
Figure II.9. résultats de la variation du tension : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance réactive rotorique .(c) la puissance active et réactive statorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique

D'après la figure (**II.9)** on note que: la puissance active rotorique varie entre 1500w et 1100w et la puissance réactive prend la valeur 50 VAR . Ces puissances cote statoriques vont alors prendre des valeurs négatives .Quand a la tension rotorique, elle est alternative et varie entre 6.5v et -6.5v . Le courant statorique varie entre 35A et -35A.

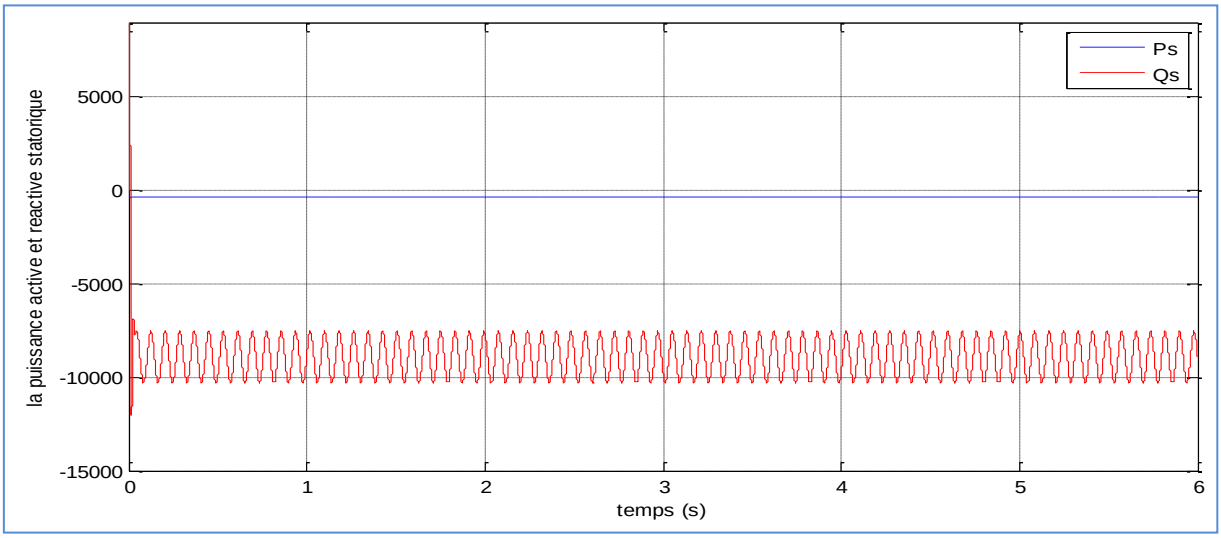
❖ ***pourVr=5v et f=5 HZ ω=180 rad/s :***



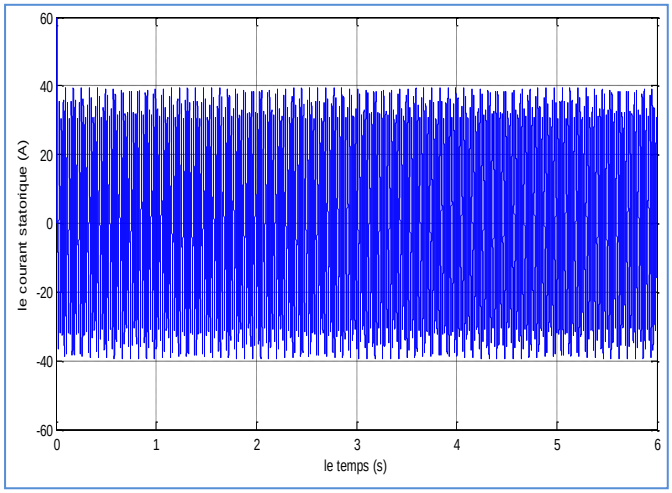
(a)



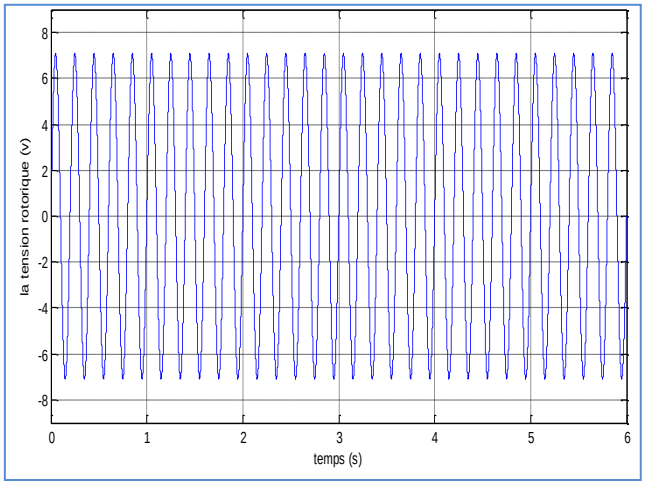
(b)



(c)



(d)



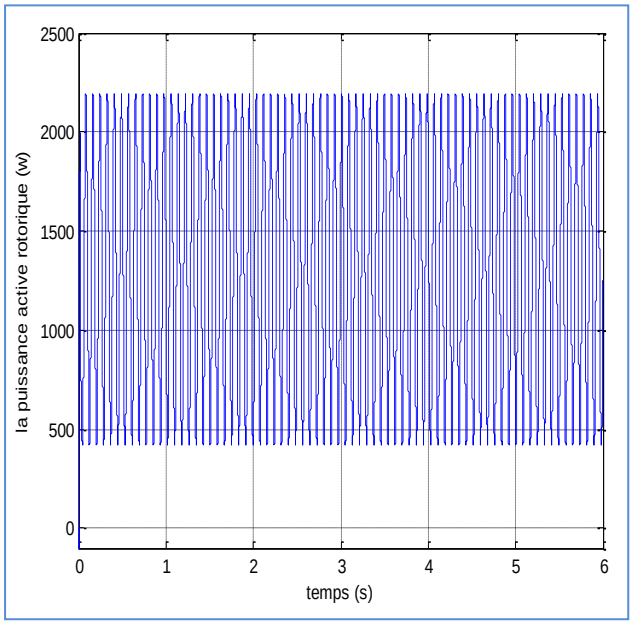
(e)

Figure II.10. résultats de la variation du tension : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance reactiverotorique .(c) la puissance active et réactive statorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique

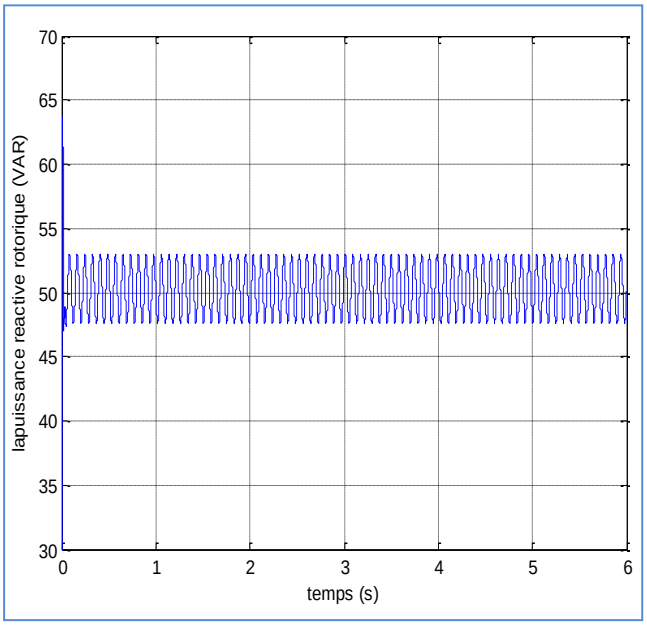
D'après la figure (**II.10)** on note que: la puissance active rotorique varie entre 1100w et 1500w et la puissance réactive prend la valeur 50VAR . Ces puissances cote statoriques vont alors prendre des valeurs négatives et continues.Quand a la tension rotorique, elle est alternative et varie entre 6.5v et -6.5v . Le courant statorique, quanda lui, varie entre 40 A et -40A.

En deuxième lieu on va fixer la fréquence et varier la tension comme suit:

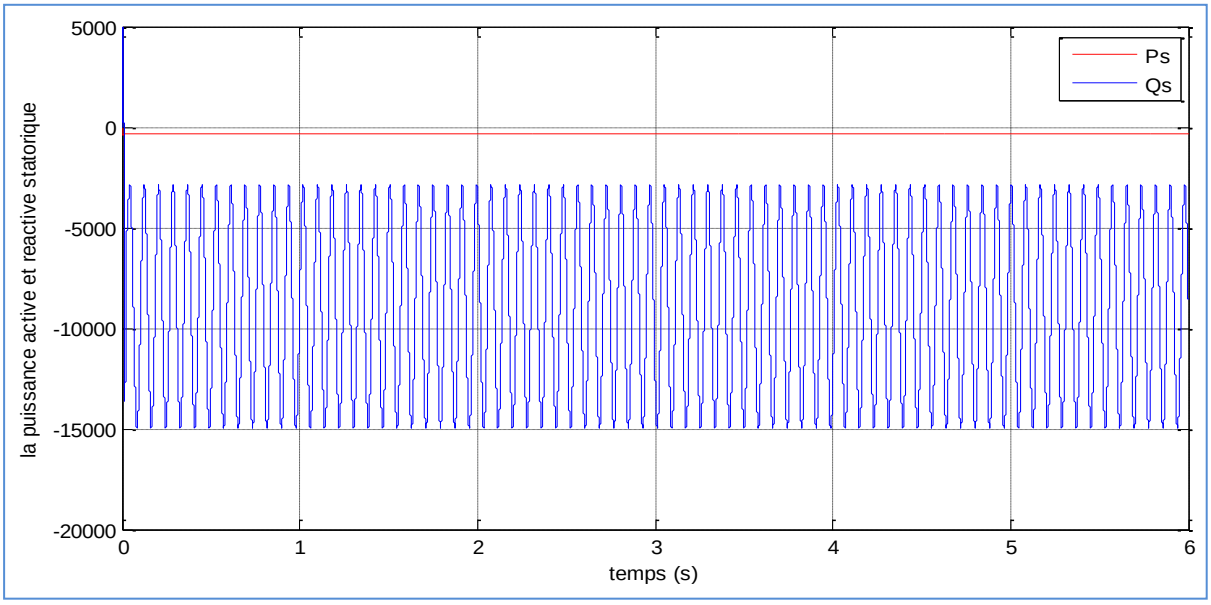
- ***pour Vr=22v et f=5 HZ ω=180 rad/s :***



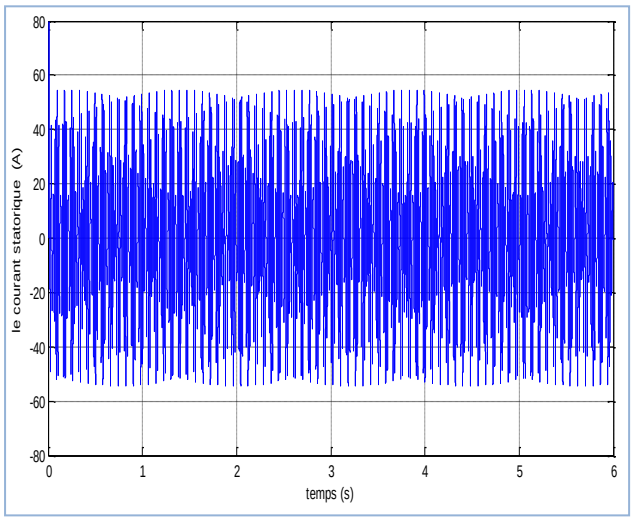
(a)

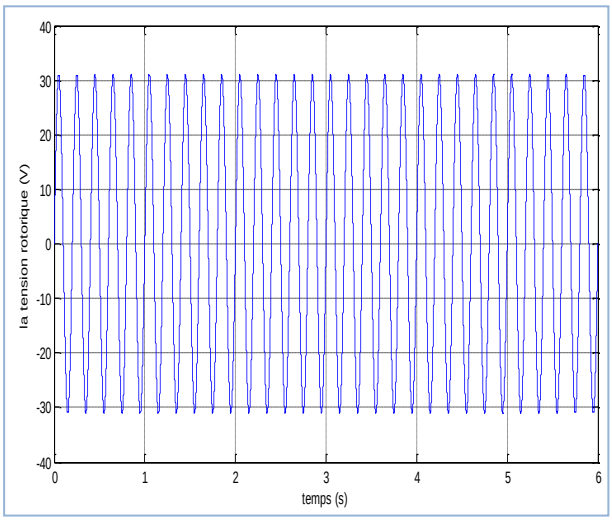


(b)



(c)



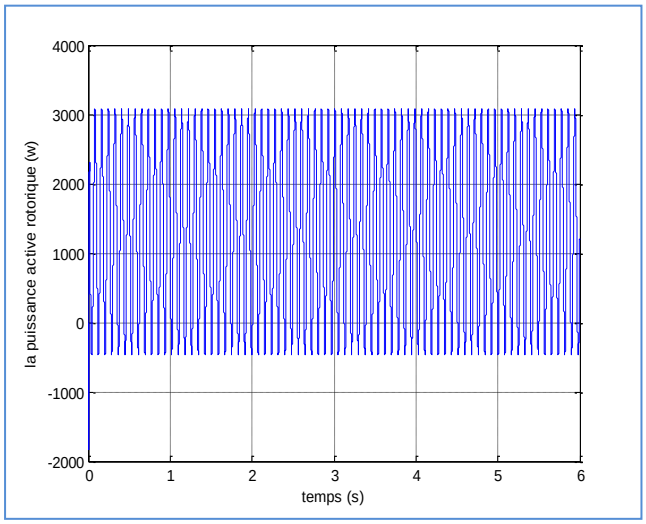


(d) (e)

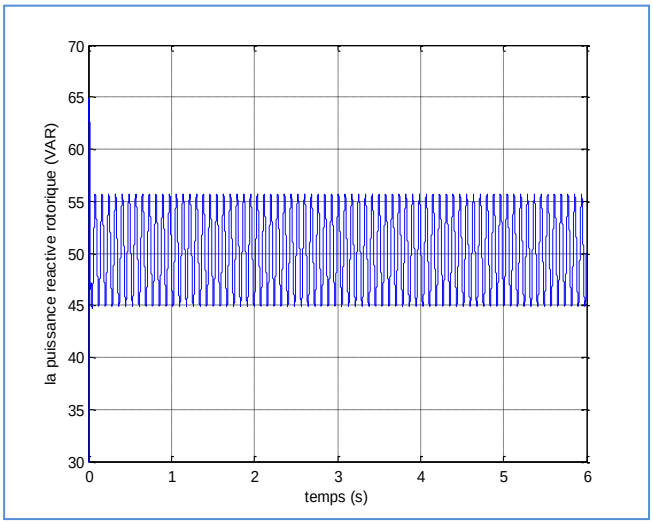
Figure II.11. résultats de la variation du tension : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance reactiverotorique .(c) la puissance active et réactive statorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique

D'après la figure (**II.11)** on note que: la puissance active rotorique varie entre 2200 w et 490 w et la puissance réactive varie de 48VAR à 58 VAR . Dans ce cas, egalement, les puissances cote statoriques vont alors prendre des valeurs negatives et continues.Quand a la tension rotorique, elle est alternative et varie entre 30v et -30v . Le courant statorique varie entre 55 A et -55A.

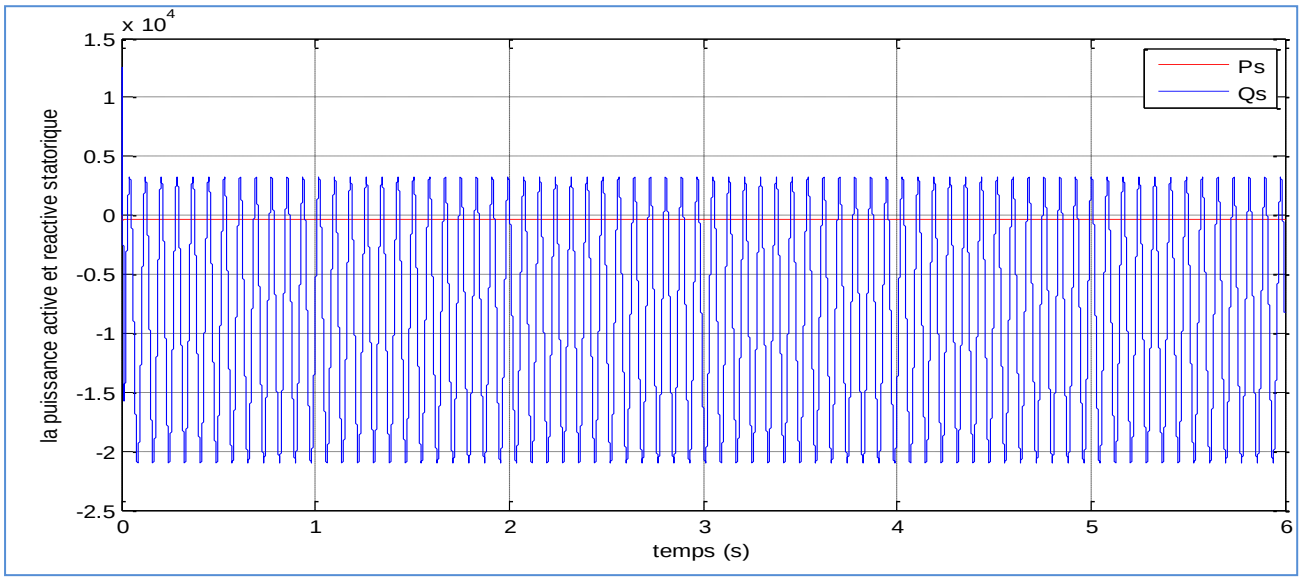
❖ ***pour Vr=44v et f=5 HZ ω=180 rad/s :***



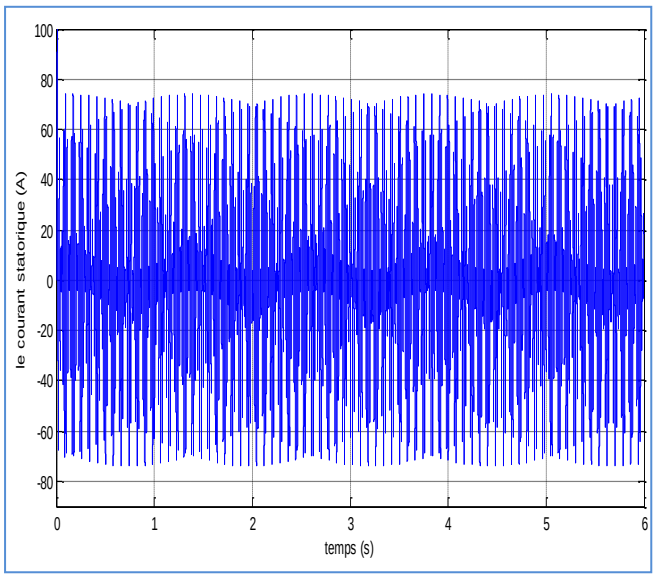
(a)



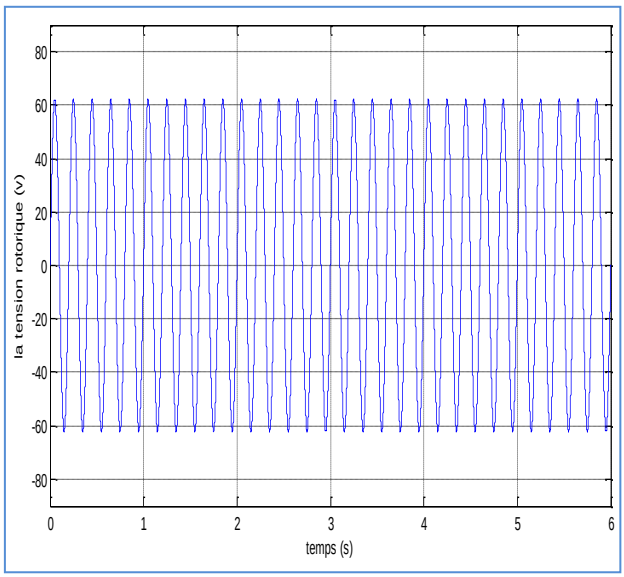
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure II.12. résultats de la variation du tension : (a) la puissance active rotorique .(b)la puissance réactive rotorique .(c) la puissance active et réactive statorique. (d)le courant statorique .(e) la tension rotorique.

D'après la figure (**II.12)** on note que: la puissance active rotorique varie entre 4500 w et -500 w et la puissance réactive varie de 4500 VAR à -4500V_{Ar}, alors que la puissance active cote stator varie entre 4000W et 20000w et la puissance réactivestatorique est continue et diminue de manière notable Quand a la tension rotorique, elle est alternative et varie entre 60v et -60v . Le courant statorique varie entre 75 A et -75A.

Dans ce cas aussi la variation de tension affecte l'amplitude des puissances .

A partir de ces résultats nous concluons que: en mode hypersynchrone , la totalité de la puissance mécanique fournie à la machineest transmise au réseau aux pertes prés. Une partie de cette puissance correspond à celle transmise par l'intermédiaire du rotor.

II.4.2. Modèle de la MADA avec choix du repère adéquat dq (Park)

En vue de la commande vectorielle de cette machine, il convient de choisir un référentiel (d, q) dont l'axe "d" est orienté vers le vecteur du flux statorique, lequel serait relatif à la fréquence 50Hz.Le repère de Park serait, de ce fait, synchronisé avec le flux statorique.

La transformation de Park est l'opération mathématique des changements de variables pourréduire la complexité du système. Elle permet le passage d'un système triphasé (a b c) en un

système à trois axes orthogonaux (d q o) ,tournant à une vitesse à l'aide d'une matrice de passage dite de Park qui est donnée par **[5]:**

$$[K(\theta)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(II.23)}$$

II.4.3. Intérêt de la transformation de PARK

La transformation de PARK permet de simplifier certaines équations qui dépendent du temps et de l'espace; les grandeurs variables deviennent des grandeurs constantes et indépendantes de la positionrotorique. L'application de la transformation de PARK sur les enroulements statoriques et rotoriques conduit à l'écriture des équations du système comme élaborées ci-dessous **[41].**

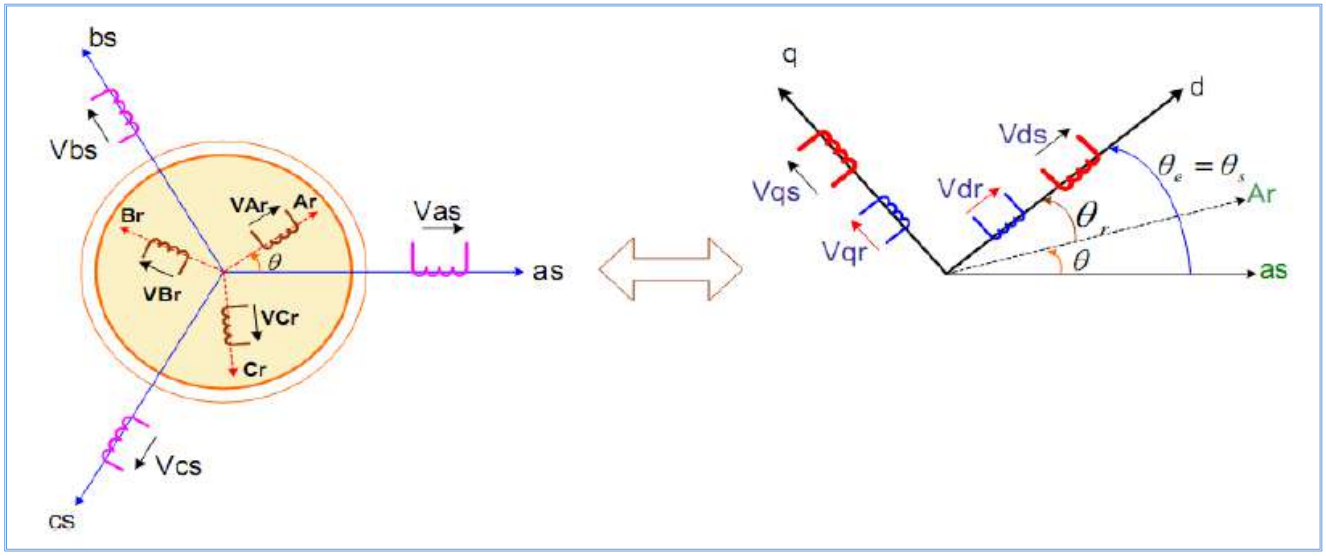


Figure II.13 passage du repère triphasé au repère biphasé dq

Le flux statorique est constant et orienté selon l'axe d, on déduit :

$$\emptyset_{sq} = 0 \quad \text{(II.24)}$$

$$\emptyset_{sd} = \emptyset_s \quad \text{(II.25)}$$

$$\emptyset_s = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad \text{(II.26)}$$

$$\emptyset_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} = 0 \quad \text{(II.27)}$$

$$\emptyset_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{M}{L_s}\emptyset_{sd} \quad \text{(II.28)}$$

$$\emptyset_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \quad \text{(II.29)}$$

En posant$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$(coefficient de dispersion), les composantes directes et en quadrature des tensions de la MADA s'écrivent :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\emptyset_{sq}}{dt} \approx 0 \quad \text{(II.30)}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \emptyset_{sd} \approx \omega_s \emptyset_s \quad \text{(II.31)}$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - e_q \quad \text{(II.32)}$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + e_d + e_\emptyset \quad \text{(II.34)}$$

avec :

$$e_q = -\sigma L_r i_{rq} \omega_r \quad \text{(II.35)}$$

$$e_d = \sigma L_r i_{rd} \omega_r \quad \text{(II.36)}$$

$$e_\emptyset = \omega_r \frac{M}{L_s}\emptyset_s \quad \text{(II.37)}$$

A partir des équations (II.26 et II.27), les courants peuvent être exprimés en fonction des courants rotoriques comme suit :

$$i_{sd} = \frac{\emptyset_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{rd} \qquad et \qquad i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \quad \text{(II.38)}$$

II.4.3.1. Relations entre les tensions et courants rotoriques

En remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation (II.38) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \\ \varphi_{rq} = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \end{cases} \quad \text{(II.39)}$$

alors les équations de tensionrotorique s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt}(I_{rd}) - g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) \frac{d}{dt}(I_{rq}) + g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + g\omega \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad \text{(II.40)}$$

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

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(II.41)}$$

avec:

- ✓ $g\omega_s \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)$est le terme de couplage entre les deux axes ;
- ✓ $g\frac{L_m V_s}{L_s}$représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation

Le système d'équations (II.40), fait apparaitre des fonctions de transfert de premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle. Chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique.

II.4.4. la transformation de inverse PARK

Pour la conversion inverse des grandeurs biphasées en triphasées on utilise la transformation inverse classique, présentée dans l'équation suivante :

$$T_{dq\rightarrow abc}=\begin{bmatrix} cos\,(\omega t) & \mp sin(\omega t) \\ cos\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right) & \mp sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}) \\ cos\left(\omega t+\frac{2\pi}{3}\right) & \mp sin(\omega t+\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{(II.42)}$$

Le signe devant les membres avec sinus dépend de la position de l′axe q par rapport a l′axe d. Si q est en avance sur d, alors le signe est négatif. Dans le cas inverse, le signe est positif[5].

II.5. la commande vectorielle :

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone à double alimentation comme une machine à courant continu à excitation indépendante ou il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux, courant d'excitation et celle liée au couple.Ce découplage permet d'avoir une réponsetrès rapide du couple .

II.5.1.Commande découplée directe en P et Q

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 actives et réactives (figure II.14). Cette méthode est dite méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. [18]

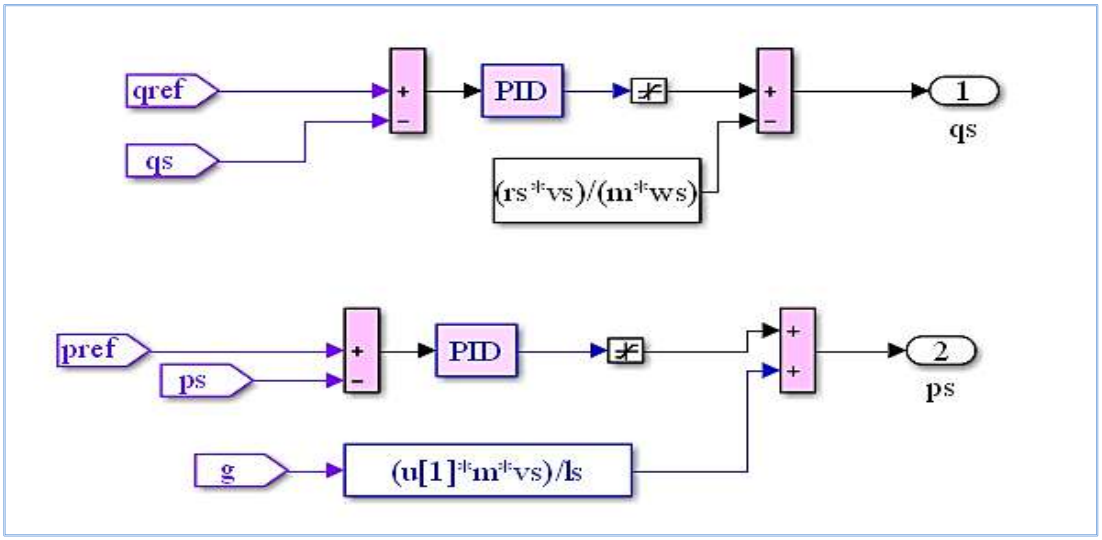


Figure II.14.Schéma bloc de la commande découplée directe en P et Q.

II.5.1.2. Synthèse du régulateur PI

Le régulateurProportionnel Intégral PI, est utilisé pourcommander la MADA en génératrice,pour le réglage des puissances active et réactive . Il offre plusieurs avantages notamment la

rapidité et la simplicité à mettre en œuvre. Ainsi que des performances acceptables sur la régulation du système considère. La figure II.15montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme$K_P + \frac{K_i}{S}$ correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure II.14.

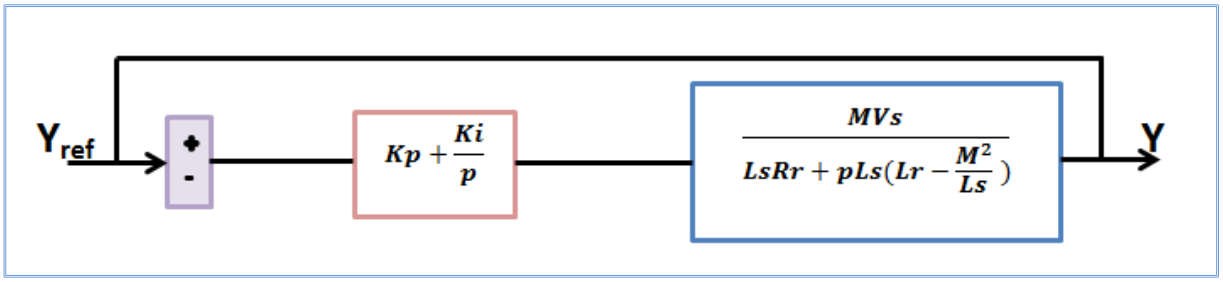


Figure II.15. Schéma bloc de la régulateur PI

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

$$K_P = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_S\,(L_r - \frac{L_m^2}{L_S})}{L_m V_s} \qquad \text{(II.43)}$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_S\,.R_r}{L_m V_s} \qquad \text{(II.44)}$$

II.5.2. Résultats de la commande découplée directe

La modélisation de la machine, de la partie mécanique, du convertisseur coté machine (CCM) et de la commande directe a été implantée dans l'environnement Matlab/Simulink afin d'effectuer des tests de la régulation. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation [18][13**].**

la figure (II.16) presenteles résultats de simulation . On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet de couplage entre les deux axes de commande (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde.

Enfin, le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

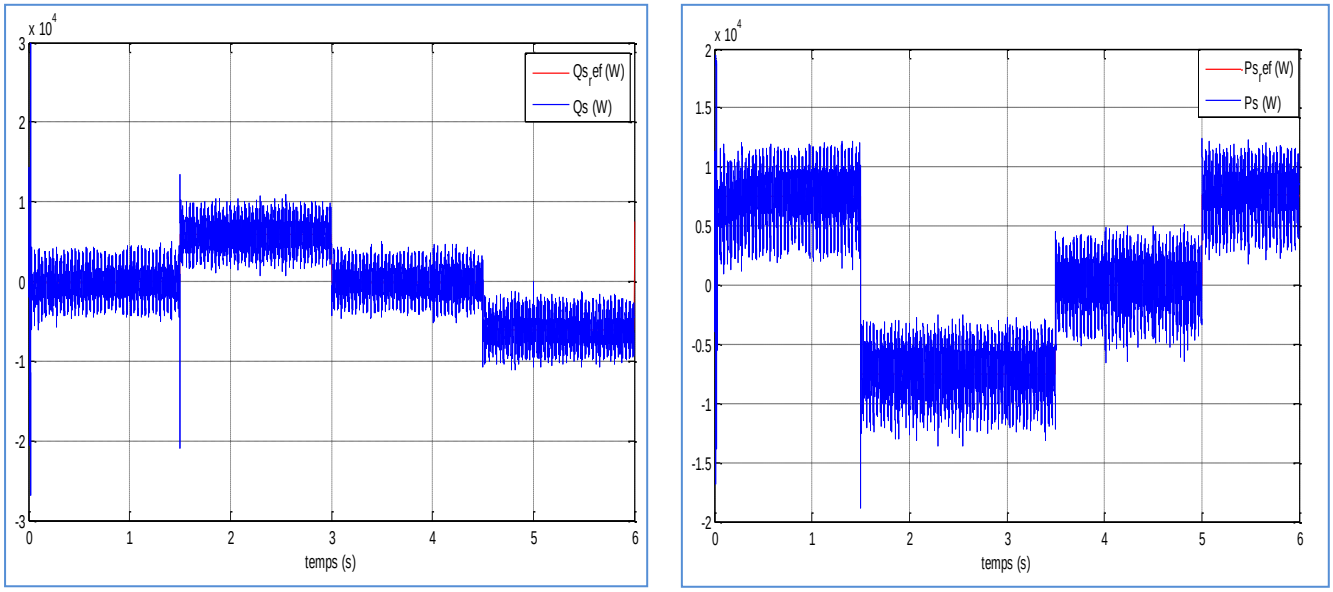


Figure II.16:Résultats de la commande découplée directe (Ps et Qs).

II.5.3. Commande découplée indirecte en P et Q

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôlerles puissances et les courants rotoriques [16], nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA. On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courant rotoriques et on trouve**[**18] [13] :

$$V_{rd} = gw_s \frac{(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{V_s \frac{L_m}{L_s}} s - \left(\frac{R_r + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)}{V_s \frac{L_m}{L_s}} Q + \left(\frac{R_r V_s}{L_m w_s}\right) + \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_S}\right) \frac{v_S}{L_m w_s} s \right) \quad \text{(II.45)}$$

$$V_{rd} = -\left(\frac{\left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s}\right)}{V_s \frac{L_m}{L_s}} s \right) s - gw_s \frac{(L_r - \frac{L_m^2}{L_s})}{V_s \frac{L_m}{L_s}} Q + gw \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_S}\right) \frac{V_s}{L_m w_s} \quad \text{(II.46)}$$

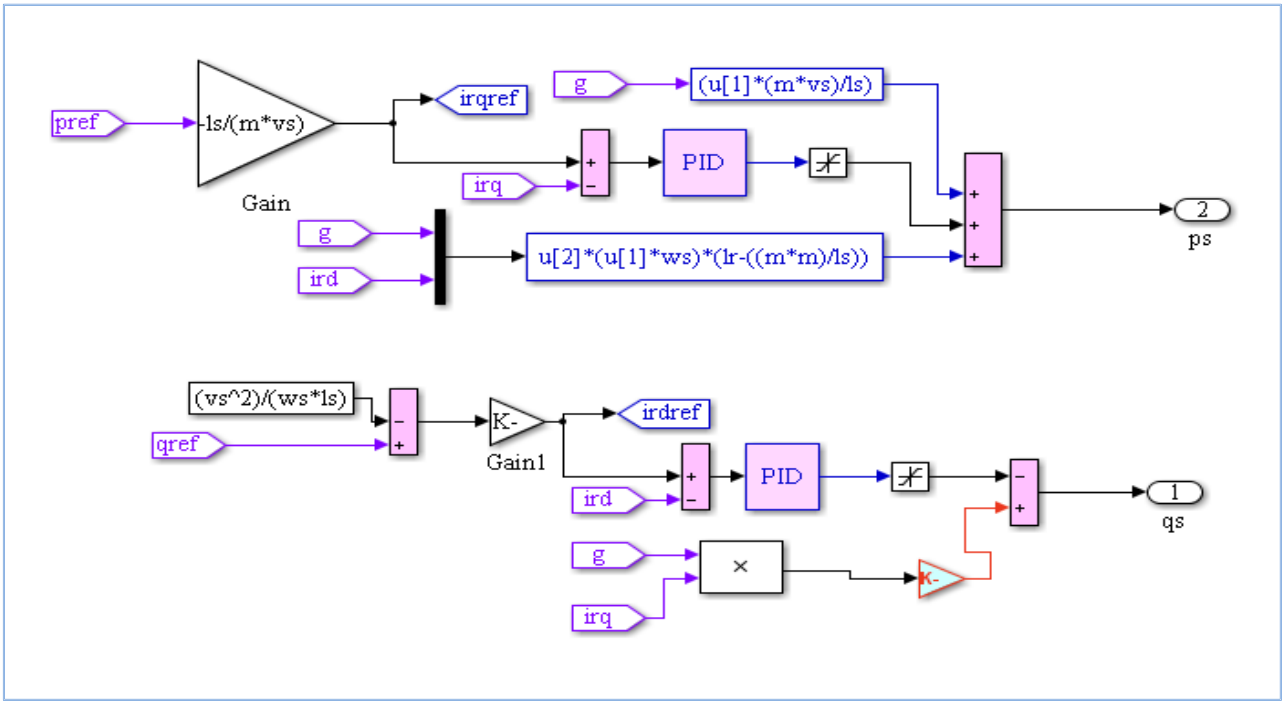


Figure II.17. Schéma bloc de la commande découplée indirecte en P et Q.

En examinant les équations(II.45) et (II.46)on peut établir le schéma bloc de la figure II.17 qui comporte en entrée les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.

II.5.3.1. Résultats de la commande découplée indirecte

la figure II.18 représente la simulation de cette régulation sur Matlab qui a donné de bons résultats en termes de dynamique et des réponses aux échelons pour la puissance réactive.On peut cependant observer une erreur de la puissance réactive lorsque la puissance active est faible. Par contre, elle fait apparaitre une erreur statique au niveau de la puissance active et réactive qui est due au fait que dans cette régulation on ne trouve qu'une seule boucle sur les courants et que les puissances sont donc restées en boucle ouverte. On voit aussi l'effet du couplage entre les axes qui est tout de même moins perceptible que pour la commande directe.

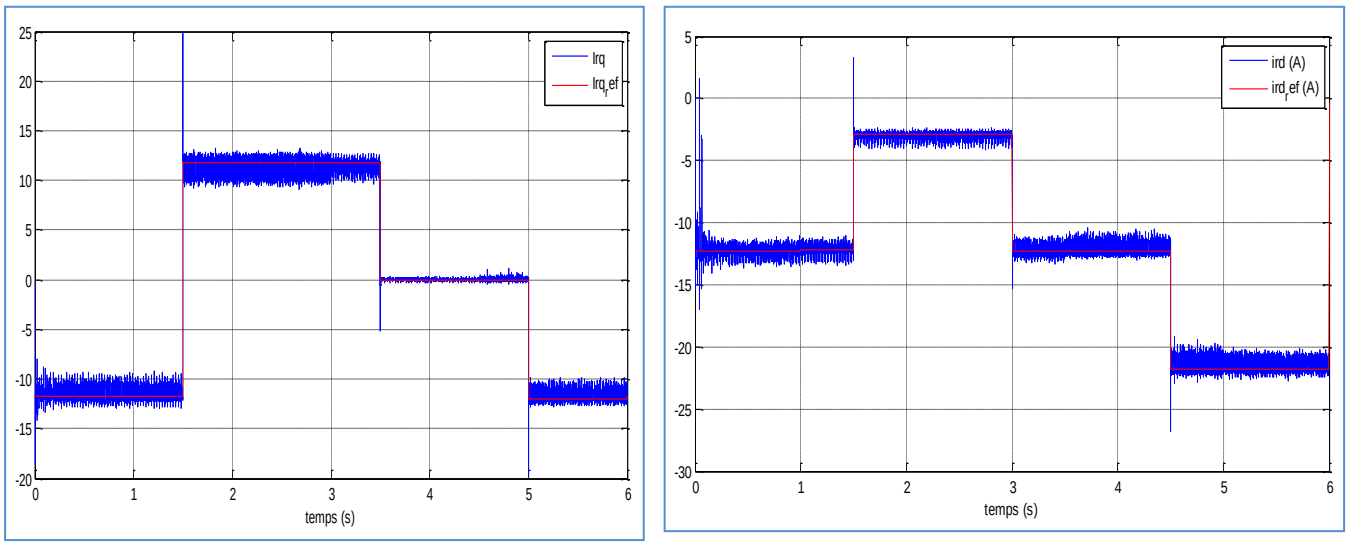


Figure II.18 : Résultats de la commande découplée directe

II.6. Commande découplée indirecte avec boucle de puissance

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances pour éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc en (figure II.19) sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. La simulation est faite dans les mêmes conditions que la commande précédente.

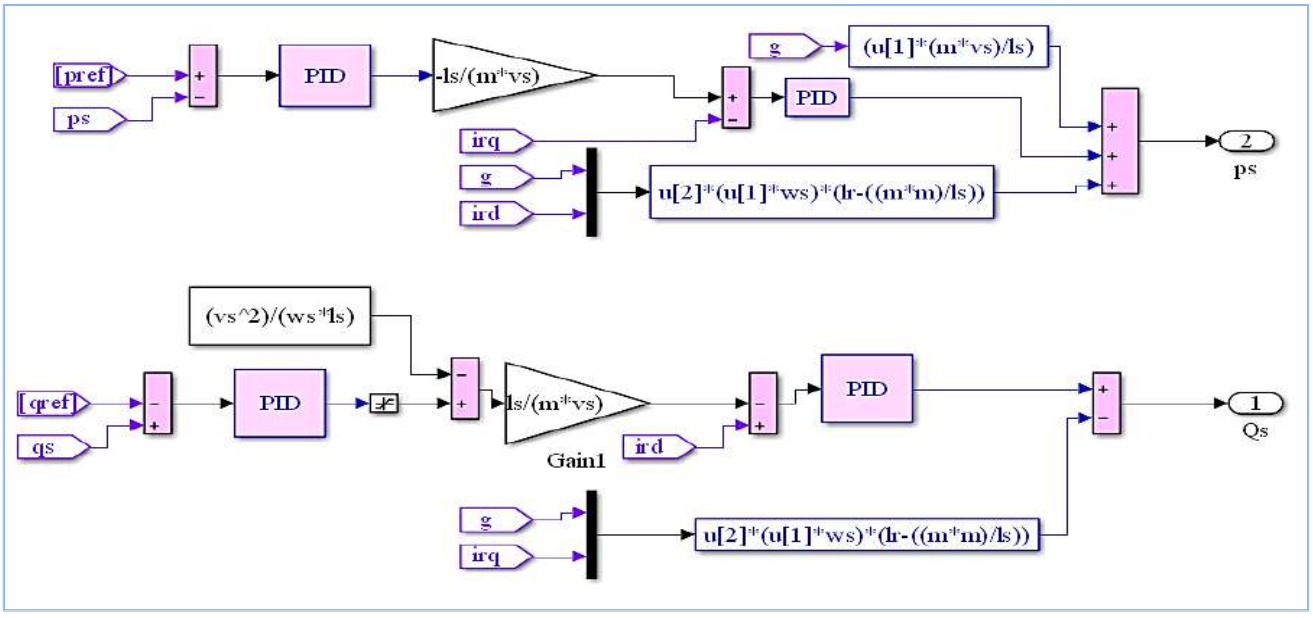


Figure II.19 : Schéma bloc de la commande découplée indirecte avec boucles de puissance.

II.6.1. Résultats de la commandedécouplé indirecte avec boucle de puissance

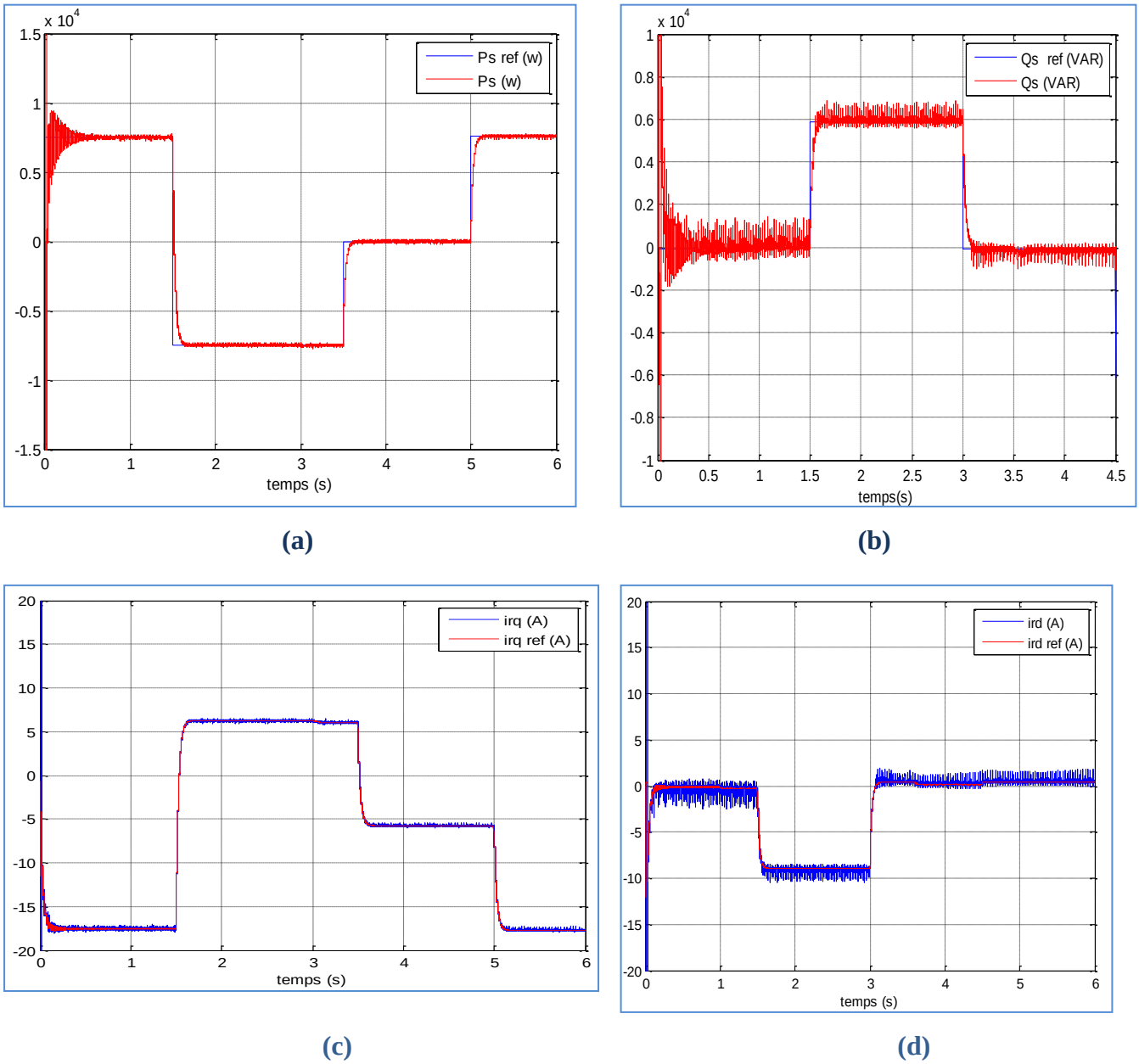


Figure II.20 : résultats de simulation Résultats de la commande découplé indirecte avec boucle de puissance : (a) la puissance active rotorique et sa référence (b) la puissance réactive et sa référence (d) le courant rotorique et se référence dans l'axe q (d) le courant rotorique et se référence dans l'axe d

II.7. Structure et modélisation du convertisseur statique NPC (redresseur - onduleur)

Le convertisseur triphasé NPC à trois niveaux se compose de trois cellules de commutation reliées à une source continue. Chaque cellule est constituée de quatre commutateurs. Puisque le courant de la charge est alternatif, les commutateurs doivent être des transistors montés en antiparallèle avec des diodes pour permettre la circulation du courant dans les deux directions. D'autres diodes sont utilisées afin de clamper la borne de chaque transistor au point milieu du bus continu. Si les tensions aux bornes des sources sont maintenues égales, la tension composée peut être modulée sur cinq niveaux de tension. Dans ce cas, chaque transistor peut supporter la moitié de la pleine tension de la source continue à l'état bloqué[23]. Dans ce travail on a deux convertisseurs statiques cote machine commande par MLI et l'autrecote réseau commande par une commande hystérésis. On a réalisé ces deux convertisseur sur Matlab/ sumilink par la structure NPC commandé.

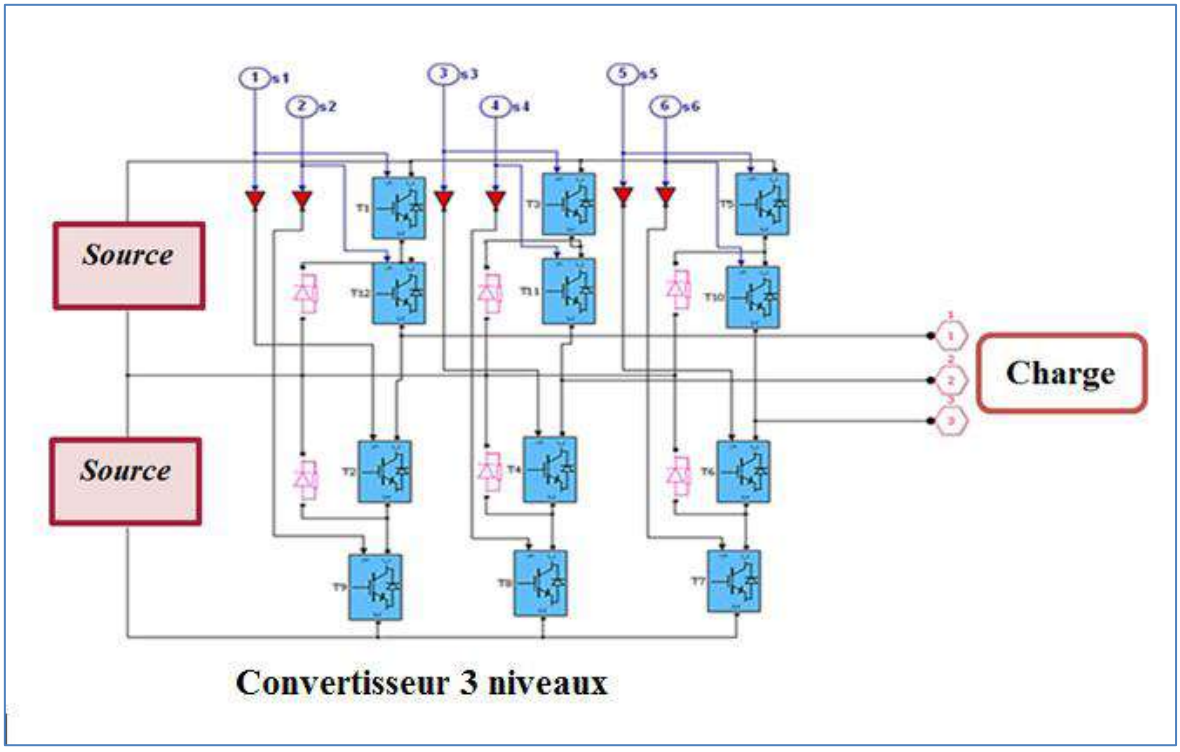


Figure II.21 : la structure d'un convertisseur trois niveaux

La figure II.21 montre la structure d'un convertisseur statique à trois niveaux à structure NPC. On commence par définir la fonction de connexion F_{ki} de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire. En mode commandable, les fonctions de connexion sont liées par la relation suivante[42]:

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad \text{(II.47)}$$

Avec, k = 1 , 2 ou 3 , représente le numéro du bras.

On définit la fonction de connexion F_{km}^{b}du demi-bras comme suit:

$$\begin{cases} F_{k1}^{b} = F_{k1} \times F_{k2} \\ F_{k0}^{b} = F_{k3} \times F_{k4} \end{cases} \quad \text{(II.48)}$$

Les potentiels des nœudsA , B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M s'expriment comme suit:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^{b} \times U_{c1} - F_{10}^{b} \times U_{c2} \\ V_{BM} = F_{21}^{b} \times U_{c1} - F_{20}^{b} \times U_{c2} \\ V_{CM} = F_{31}^{b} \times U_{c1} - F_{30}^{b} \times U_{c2} \end{cases} \quad \text{(II.49)}$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{20}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U_{c2} \end{cases} \quad \text{(II.50)}$$

II.7.1.commande de l'onduleur par modélisation de longueur d'impulsion MLI

Cette technique de commande utilise les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire .L'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance est commande par le signal résultant de la comparaison de ces deux signaux [26]

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de la porteuse sur la fréquence modulante:

$$m = \frac{f_p}{F_{ref}} \quad \text{(II.51)}$$

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

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad \text{(II.52)}$$

II.7.1.1.Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la stratégie triangulosinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes [24]:

- Etape 1:

$$V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \quad \text{(II.53)}$$

$$V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \quad \text{(II.54)}$$

- Etape 2:

$$V_k = V_{dc} \Rightarrow S_i = 1 \quad \text{(II.55)}$$

$$V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_I = 0 \quad \text{(II.56)}$$

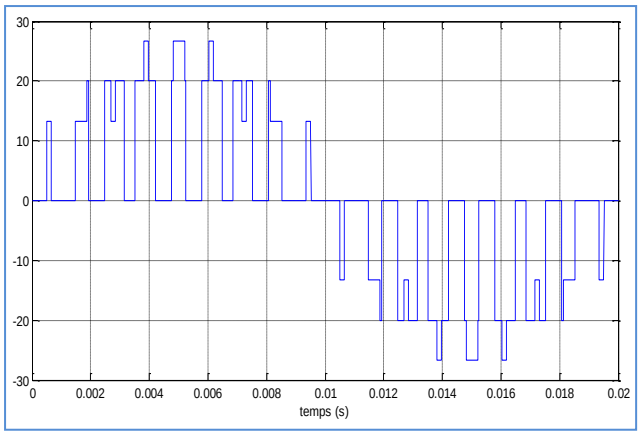
II.7.2. Résultats de simulation du comportement de l'onduleur 3 niveaux NPC

Afin d'étudier le comportement d'un onduleur 3 niveaux et de choisir les paramètres les plus adapter nous allons procéder a deux tests :

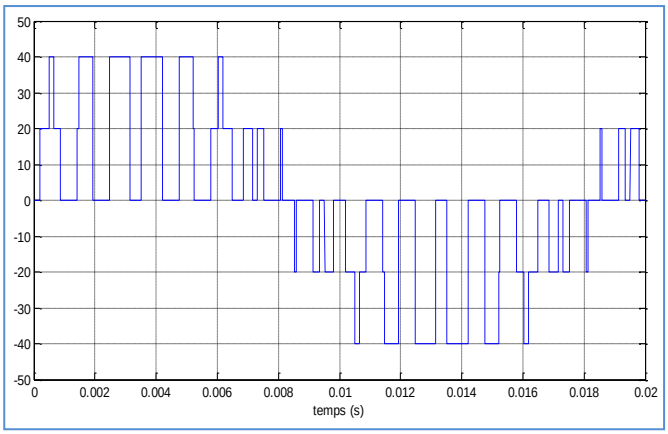
- ✓ Le premier test consiste à varier la valeur de l'indice de modulation m.
- ✓ Le deuxième consiste lui a étudier l'effet d'une variation dans l'indice d'amplitude r.

II.7.2.1. Les résultats pour la variation de l'indice de modulation

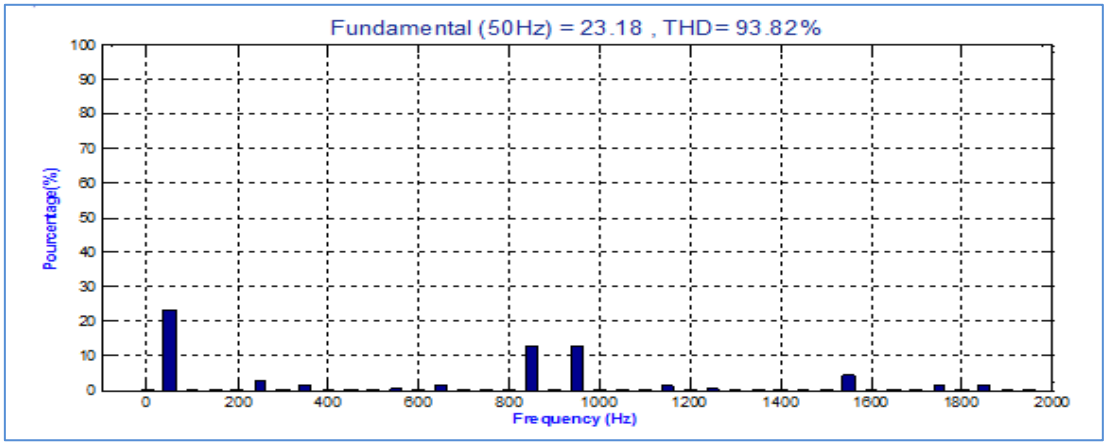
❖ ***Pour m=9 :***



(a)



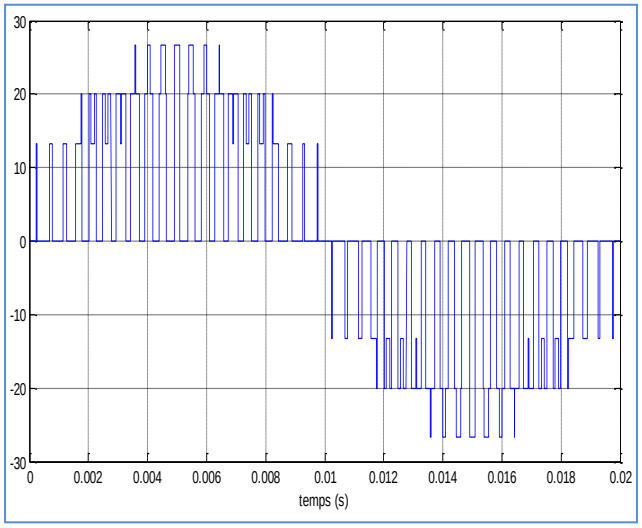
(b)



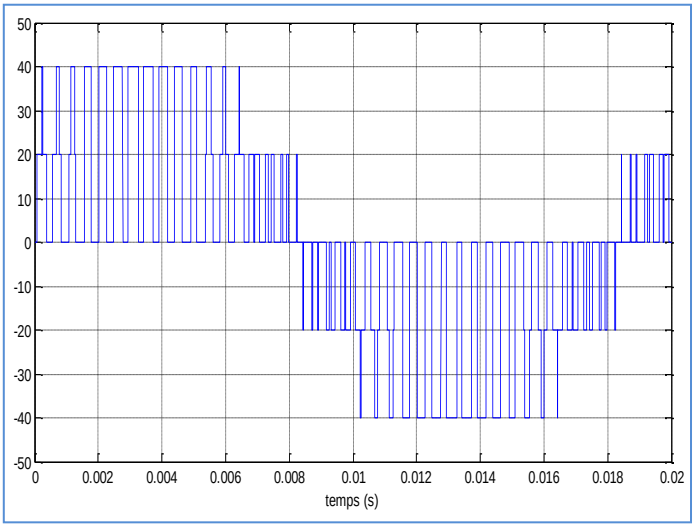
(c)

Figure II.22. résultats de la variation de L'indice de modulation:(a) la tension simple Va .(b) la tension compose Vab (c) le THD

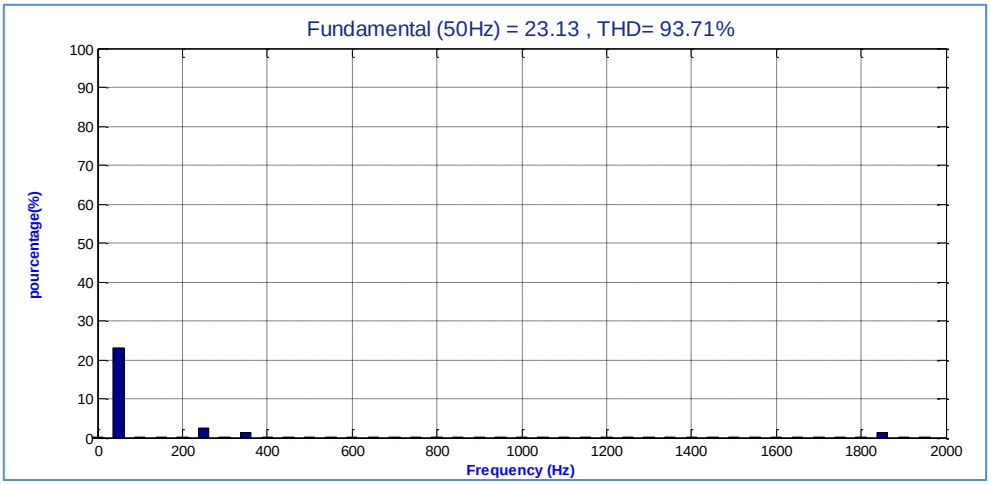
❖ ***Pour m=21 :***



(a)



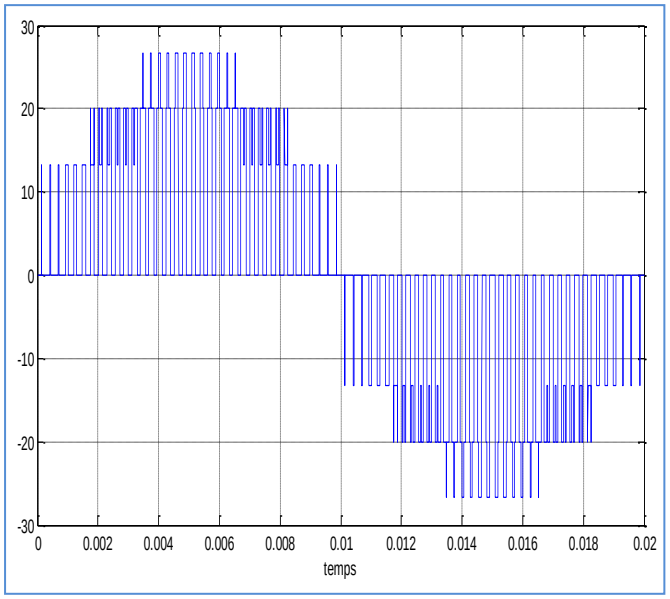
(b)



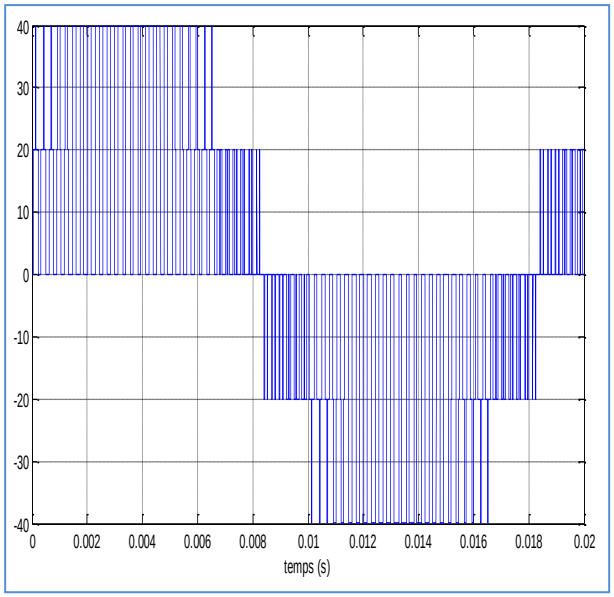
(c)

Figure II.23. résultats de la variation de L'indice de modulation:(a) la tension simple Va .(b) la tension compose Vab (c) le THD

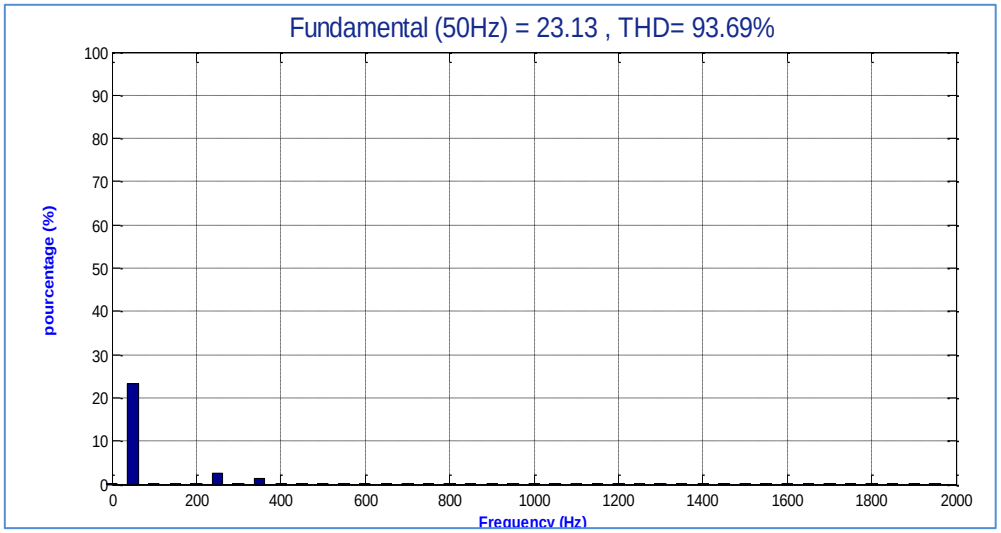
❖ ***Pour m=36 :***



(a)



(b)



(c)

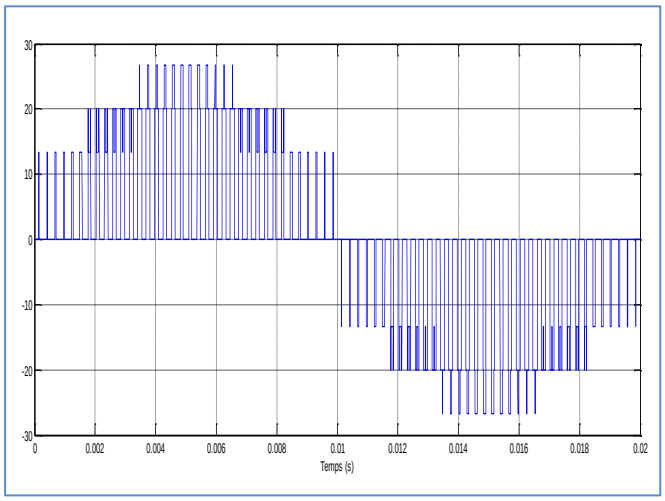
Figure II.24. résultats de la variation de L'indice de modulation:(a) la tension simple Va .(b) la tension compose Vab (c) le THD

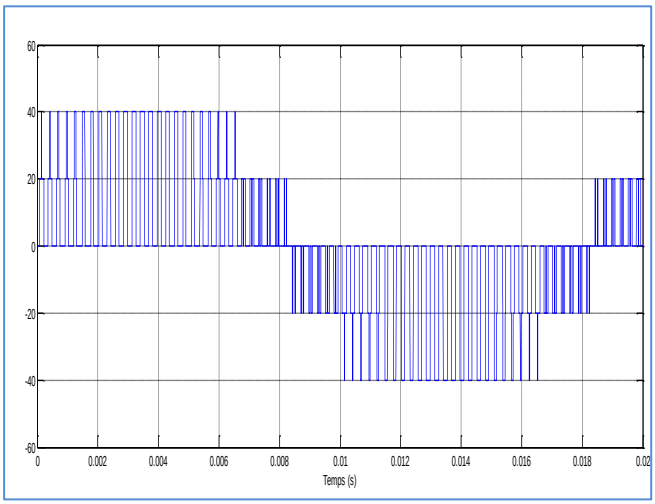
D'après les figures (II.22) a,b,c , la figure (II.23) a,b,c ,et la figure(II.24) a,b,c on note que lorsque m=36 l'allure de la tension simple v_a et la tension composée v_{ab} tend plus vers une allure sinusoïdale et le signal comporte moins de distorsions que pour les deux autres valeurs de m .

Nous constatons aussi que le THD de cette dernière est le plus bas.

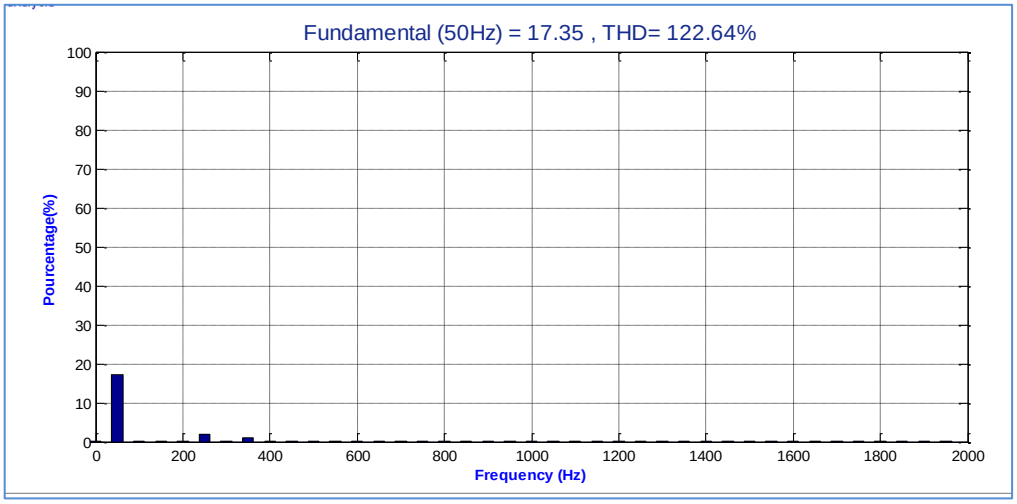
II.7.2.2 Les résultats pour la variation de l'indice d'amplitude

- ***pour r =0.6 :***





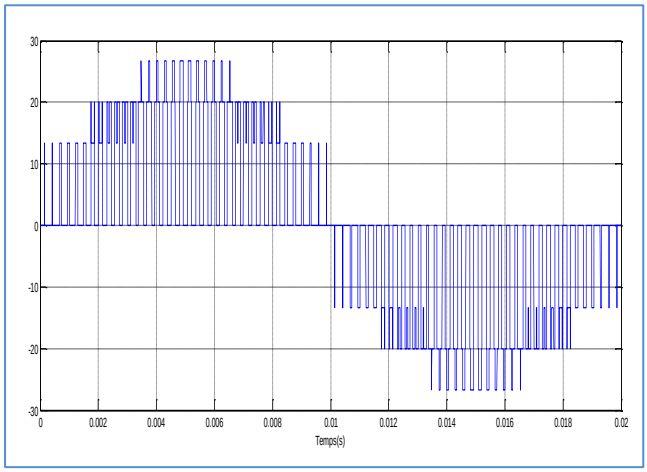
(a) **(b)**



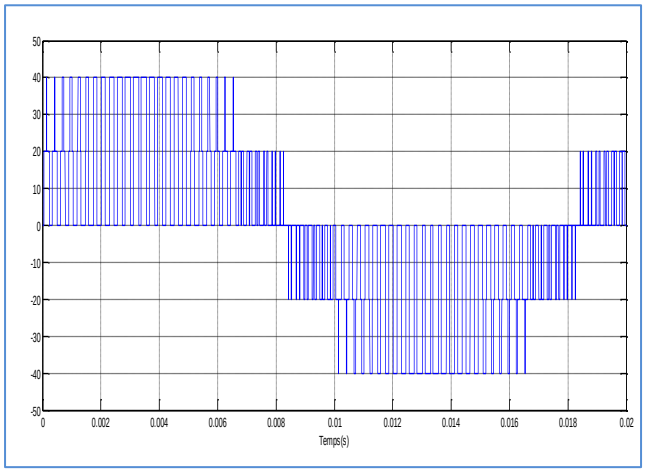
(c)

Figure II.25. résultats de la variation de L'indice d'amplitude:(a) la tension simple Va .(b) la tension compose Vab (c) le THD

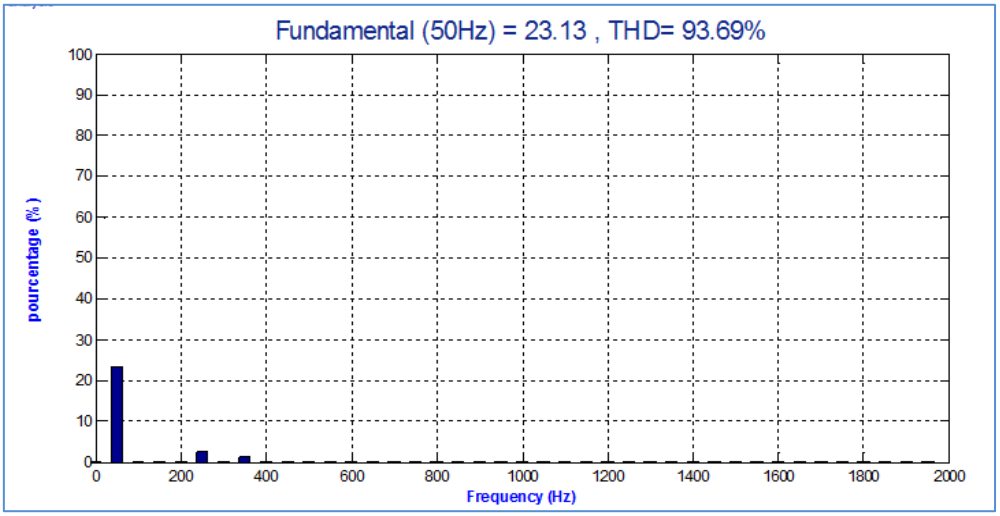
❖ ***pour r= 0.8 :***



(a)



(b)



(c)

. Figure II.26. resultats de la variation de L'indice d'amplitude :(a) la tension simple Va .(b) la tension compose Vab . (c) le THD.

D'après les figures (II.25) a,b,cet la figure (II26)a,b,c on constate que le THD lorsque r=0.8 est beaucoup plus bas que pour la valeur de 0.6 .

On note aussique l'allure de la tension simple v_a et la tension composée v_{ab} tend plus vers une allure sinusoïdale .

En se basant sur ces résultats afin de définir les paramètres qui donnent la meilleure performance de l'onduleur on prendra r=0.8 et m=36.

II.8.2. la commande par hystérésis

La figure II.27 montre le schéma de la commande du redresseur à3-niveaux. Ce schémafonctionnel est basé sur l′asservissement de la valeur moyenne des tensions de sortie. Le but de l'asservissement est de déterminer les courants de référencedu réseau appliqués aux comparateurs àhystérésis.[42]

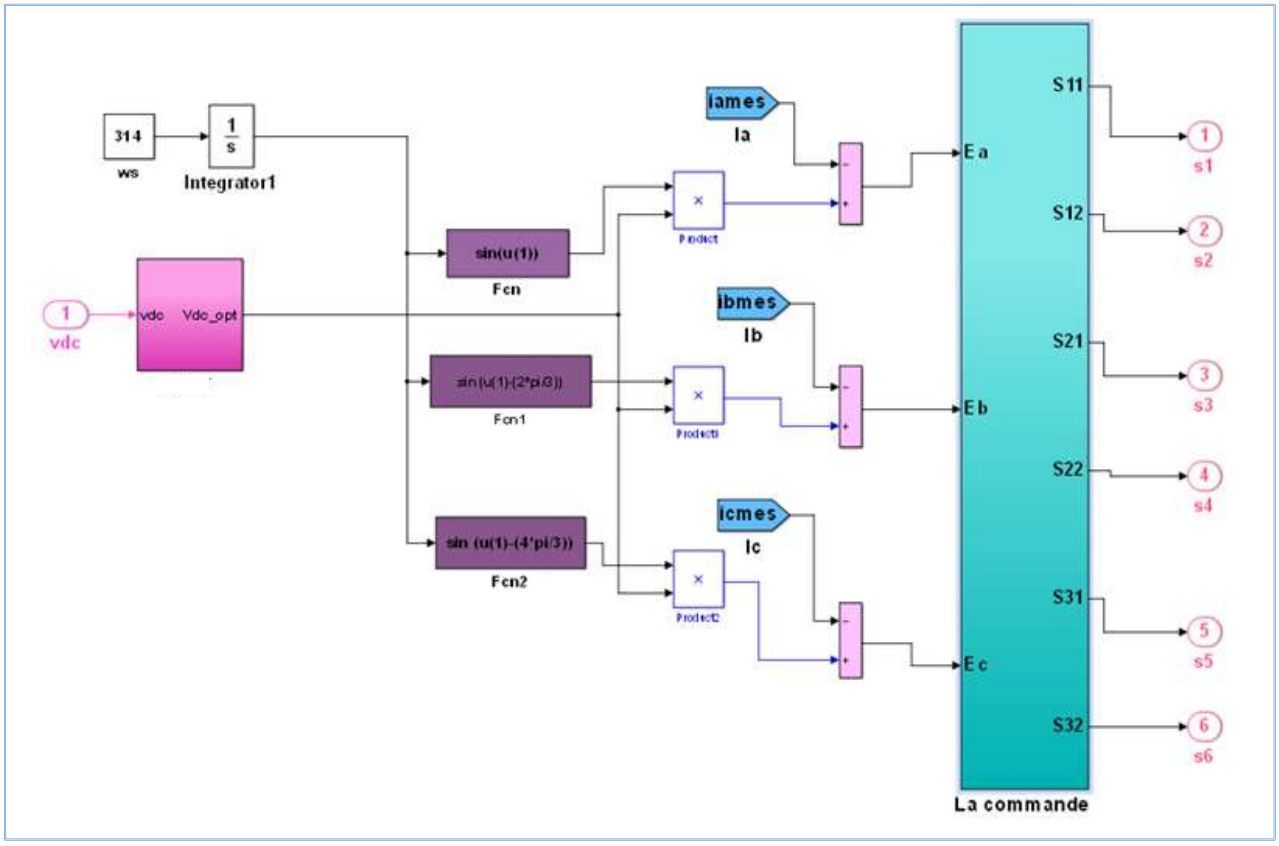


Figure II.27:la structure de la commande par hystérésis

L′algorithme de la commande par hystérésis d′un redresseur à3-niveaux se résume comme suit :

if	$\varepsilon_i < -2\Delta i$	$F_{i1}=1$	, $F_{i2}=1$	, $F_{i3}=1$
else if	$-2\Delta i \leq \varepsilon_i \leq -\Delta i$	$F_{i1}=1$	, $F_{i2}=1$	, $F_{i3}=0$
else if	$-\Delta i \leq \varepsilon_i \leq 2\Delta i$	$F_{i1}=0$	, $F_{i2}=0$	, $F_{i3}=1$
else if	$\varepsilon_i > 2\Delta i$	$F_{i1}=0$	, $F_{i2}=0$	, $F_{i3}=0$
else	la commande des interrupteurs reste inchangée			
end if	*i= 1, 2 ,3*			

Parmi les principaux avantages de la commande à hystérésis , la simplicité de la mise en œuvre, une robustesse exceptionnelle, une précision pour la poursuite du courant de référence.[42]

II.8.2.1.les résultats de la commande par hystérésis

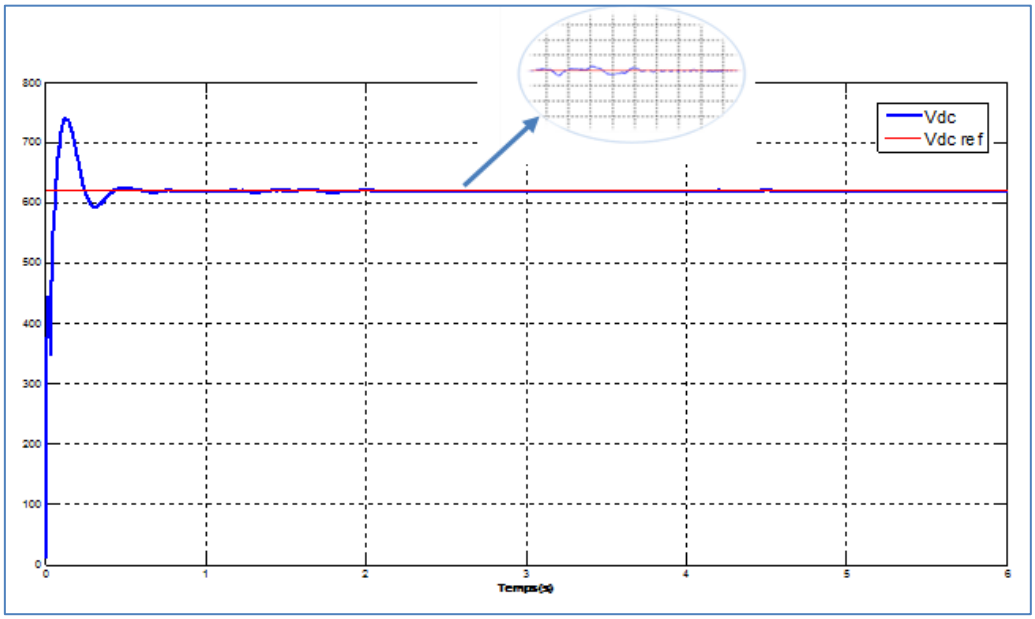


Figure II.28:latension au borne du condensateur et sa référence en fonction du temps

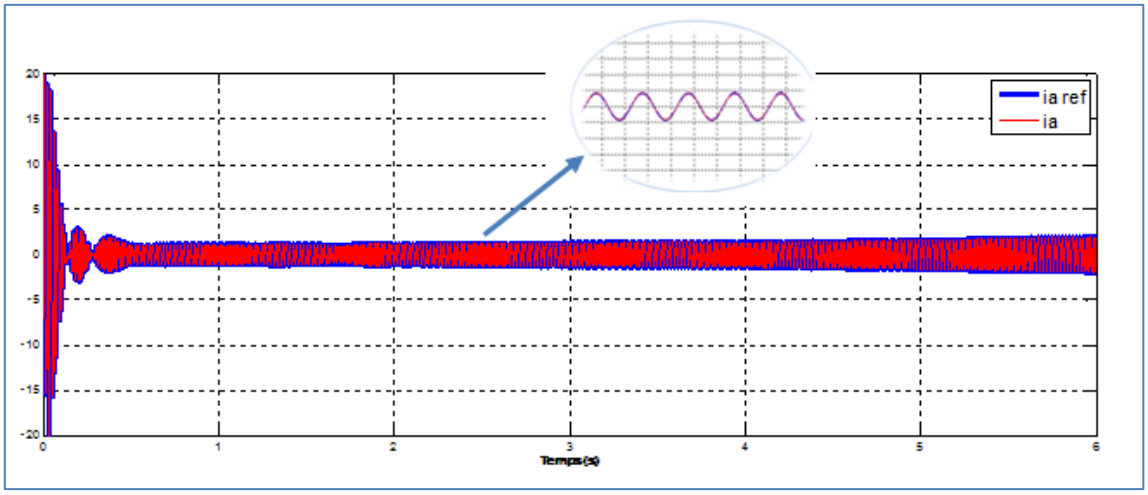


Figure II.29:le courant de la phase a et sa référence en fonction du temps

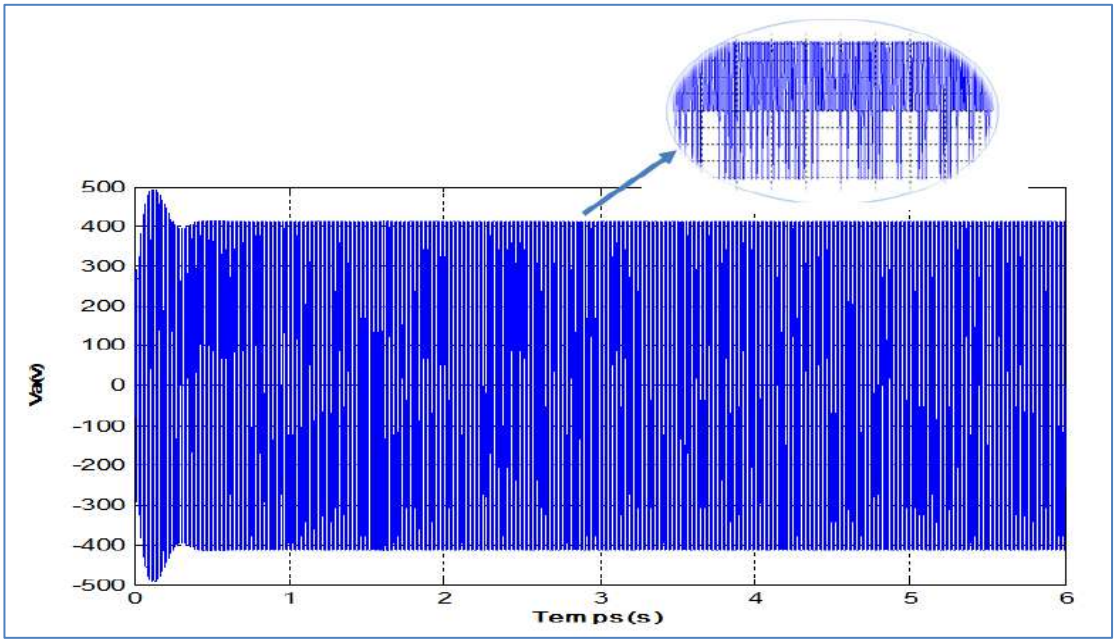


Figure II.30 : la tension de la phase a en fonction du temps

- **analyse des résultats :**

La figure II.28 représente l'évolution de la valeur de la tension au borne du condensateur et de la valeur de la tension de référence 620v en fonction du temps, montre que dans les deux cas, grâce au régulateur, la tension reste constante a la valeur de la tension de référence en fonction du temps .

D'après la figure II.29 qui montre l'évolution de la valeur du courant de la phase a et du courant de référence en fonction du temps, on voit que le courant mesuré suit l'allure du courant de référence.

La figure II.30 montre la variation de la tension simple à la sortie du redresseur en fonction du temps. On note que la tension varie entre 400v et -400 v après un régime transitoire.

La commande à hystérésis permet de réduire notablement la différence entre le courant de référence et le courant mesuré et elle nous servira à commander notre convertisseur.

II.9. la boucle à verrouillage de phase "PLL"

Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statoriques (θ_s) et pour les grandeurs rotoriques (θ_r)), nous avons utilisé une boucle à verrouillage de phase appelée PLL (Phase Locked Loop), comme l'illustre la Fig. II.31. Cette PLL permet d'estimer avec précision la fréquence et l'amplitude de la tension du réseau [24]

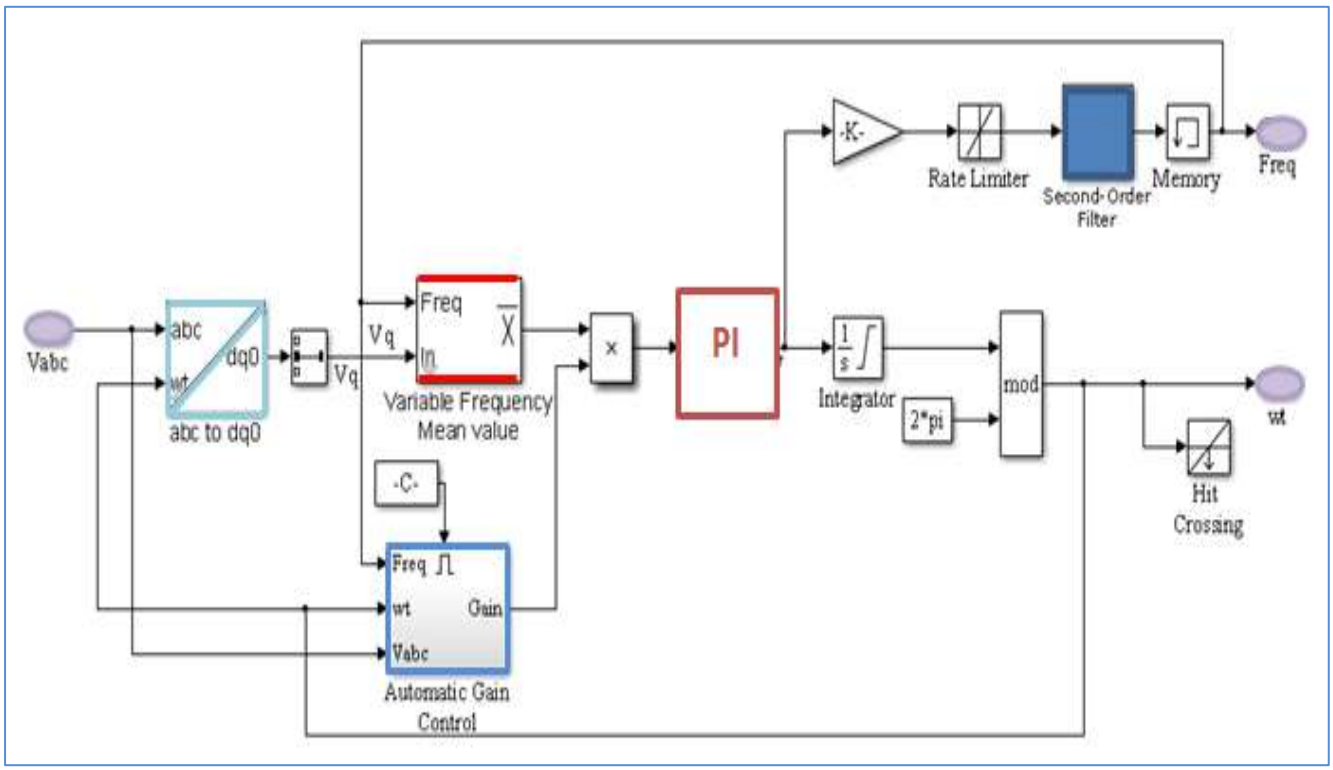


Figure II.31 : le bloc du PLL

II.9.1.les résultats de la boucle à verrouillage de phase

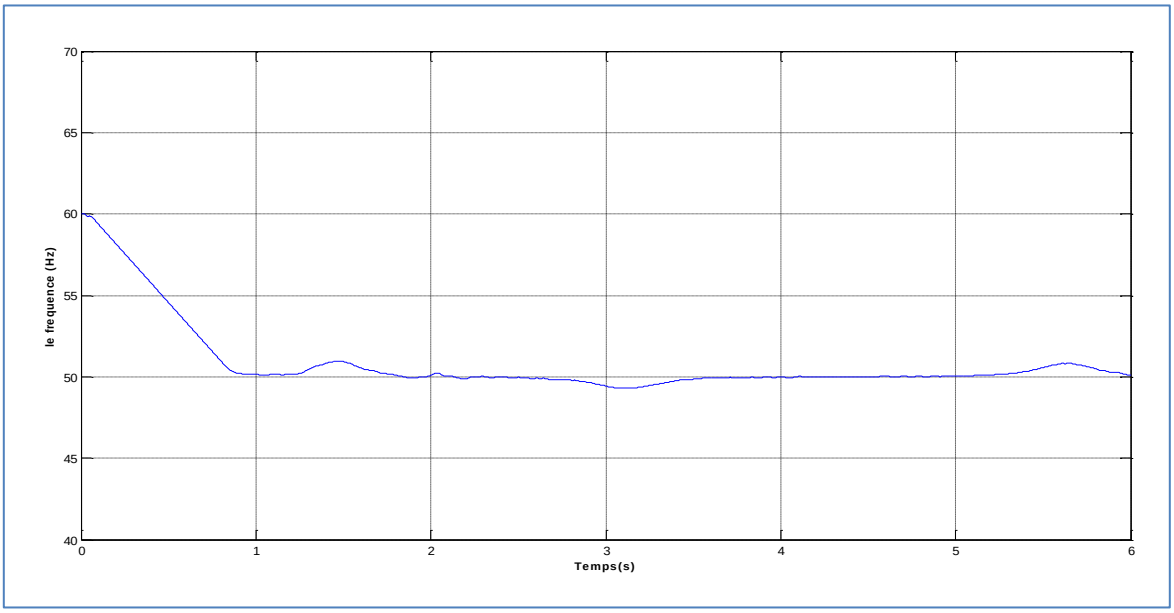


Figure II.32 : la fréquence estimer par la PLL

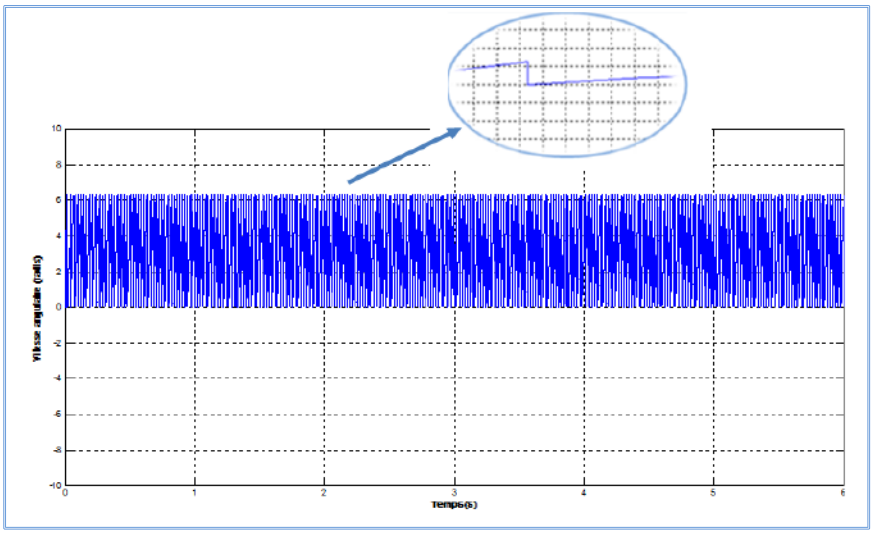


Figure II.33 :la courbe de la vitesse de rotation en fonction de temps

D'après la figure II.32 et II.33 qui montrel'évolution de la fréquence en fonction du temps et l'angle de rotation en fonction du temps , on peut noter que le PLL nous permet de synchroniser la fréquence et l'amplitude de phase avec le réseau.

II.10. Conclusion

Ce chapitre a était consacré à l'étude d'une chaine éolienne dédiée à produire de l'énergie électrique, ainsi les différents convertisseurs du système, leurs commandes et la MADA ont éte modélises, étudies et leur comportement a éte analyse.

Dans la suite de ce chapitre, nous avons donc centré notre étude sur les commandes permettant à l'éolienne d'extraire le maximum de puissance disponible du vent.

Les différentes commandes du CCM et du CCR ont été détaillées pour assurer un contrôle indépendant des puissances active et réactive tout en garantissant un fonctionnement optimal de l'éolienne.

Chapitre III

Pollution dans le réseau électrique (effets et solutions)

III.1 Introduction

L'énergie électrique est principalement distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal quipermet de fournir la puissance électrique nécessaire aux équipements et matériels de l'électrotechnique. C'est particulièrement l'aspect sinusoïdal de la tension d'origine qu'il est nécessaire de conserver, afin de lui préserver ses qualités essentielles pour la transmission de la puissance utile aux équipements terminaux.

Lorsque la forme de l'onde de tension n'est pas sinusoïdale, on rencontre alors des perturbations qui génèrent des dysfonctionnements et des échauffements des récepteurs et appareillages raccordes sur un même réseau d'alimentation électriquePlusieurs moyens ont pour but de pallier ces problèmes, néanmoins les plus efficace reste les filtres.

Dans ce chapitre nous allons donc étudier les problèmesrencontres dans le réseauélectrique en particulier les harmoniques, puis énumérer les différentes normes en vigueur pour maintenir une bonne qualitéd'énergie, donner les différentes solutions possibles pour résoudre ces problèmes.

III.2.Qualité de l'énergie électrique

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituantun système sinusoïdal triphasé. Habituellement, les systèmes électriques génèrent,transportent, et distribuent la puissance à une fréquence fixe telle que 50 ou 60 hertz tout enmaintenant une tension raisonnablement constante sur la borne de connexion duconsommateur. [39]

Le consommateur utilise beaucoup et différents produits électroniques ouélectriques qui consomment l'énergie sous forme de CC ou de AC, qui convertissent le nouvelAC sous la forme exigée. Un des paramètres de ces systèmes est la forme d'onde qui doit êtrela plus proche possible d'une sinusoïde. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sontles suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois

tensions et de leur déphasage relatif.[38]

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux.

Lesperturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques.Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont:

- Creux de tension;
- Déséquilibre du système triphasé;
- Fluctuations de tension (ou flicker);
- Harmoniques et inter-harmoniques.[32]

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

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

Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation :

- Durée de la perturbation.
- Impédance de la source.[32]

III.3. Généralité sur les harmoniques

Afin de comprendre le phénomène appelé harmonique on donne les notions et généralités suivantes :

III.3.1 Définition des harmoniques

Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensionssinusoïdales, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés auréseau. Ces distorsions sont appelées les harmoniques d'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiserces harmoniques.[34]

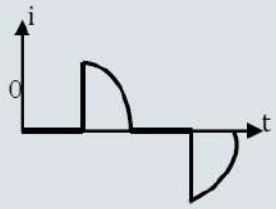
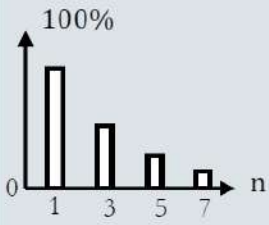
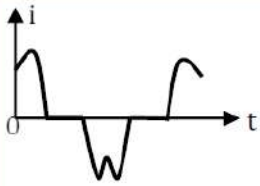
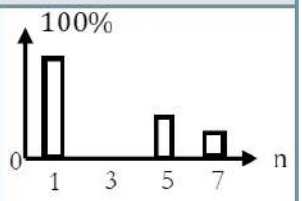
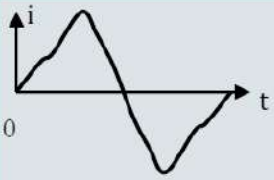
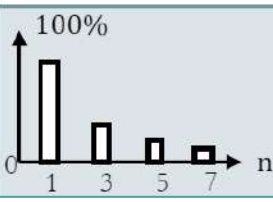
III.3.2 Origine des harmoniques

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments quicommutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courantnon linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.).

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant descourants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquencefondamentale,

ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courantsharmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensionsharmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau.[28]

Tableau III.1 :Principales charges polluantes

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

III.3.3Caractéristiques des harmoniques

Tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série desinusoïdes de fréquences discrètes :

$$\boldsymbol{i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h * \cos(w_h * t + \varphi_h)} \qquad \text{(III.1)}$$

La composante zéro I_0de la série dite de Fourier est la composante continue, la première composante dite de rang 1 (h=1) est appelée composante fondamentale.

Pour les systèmes raccordés à un réseau électrique stabilisé, la fréquence de la composante fondamentale est considérée comme étant fixe (50Hz en Algérie).

Le reste des composantes de la série de Fourier sont appelées harmoniques de rang n, où n désigne le numéro de la composante.[33]

III.3.4Mesure des harmoniques

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergiedistribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer lesperturbations harmoniques. [40]

Tableau III.2 :les critères de mesure des harmoniques

Le taux de distorsion harmonique	Dans le cas général, pour mesurer la pollution harmonique dans un réseau électrique, oncalcule le taux de distorsion harmonique en tension THDv car il permet également d'intégrerl'influence de l'impédance de court-circuit. Plus l'impédance de court-circuit est faible, moinsle courant aura d'influence sur la tension**.[28]**	Le THD du courant ce calcule comme suit : $THD_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{n\neq 1}^{\infty} I_{sn}^2}}{I_1} . 100$ Le THD de la tension ce calcule comme suit : $THD_v\% = \sqrt{\frac{V_s^2}{V_{s1}^2} - 1} . 100$
Le facteur de Puissance	Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entrela puissance active P et la puissance apparente S.Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissancedéformante (D) entre en considération.[28]	$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}}$

III.4.Effets des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entrainant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages dediélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types :

- ***les effets instantanés ou à court terme :***
  - dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation .
  - pertes de précision dans les appareils de mesure .
  - vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques,
  - vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie.[39]
- ***les effets à long terme :***
  - vieillissement prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entreles champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor,
  - echauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipement entrainant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements,
  - surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de 120° si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sontdes multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représentel'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois,
  - échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et parhystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage,

- risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits forméspar les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées.[34]

Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entrainer des destructions**.**

III.5 Préventions et normes en vigueur

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

Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine desperturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce quiconcerne 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 inter- harmoniques commedes phénomènes électromagnétiques à basse fréquence. [40]

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

Si n est impair $\frac{V_n}{V_1} \leq 1\%$

Si n est pair $\frac{V_n}{V_1} \leq 0.6\%$

$THD \leq 1.6\%$

La norme IEEE 519-1992 recommande notamment unedistorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes demoins de 69KV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à3%.[30]

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

III.7 Compensation des courants harmoniques

D'après la figureIII.1, La puissance apparente d'une charge non linéaire S est composée de trois termes de puissance : la puissance active P, la puissance réactive Q et la puissance déformante D_C, [31] Comme l'indique la relation suivante :

$$S=\sqrt{P^2+Q^2+D^2}=3.V_S.I_{ceff}$$

La puissance apparente est représentée sur la figure III.1- du Diagramme de Fresnel des puissances.

La puissance apparente du filtre parallèleS_f compensant le courant harmoniqueI_{ch} est donnée par l'équation suivante :

$$S_f=\sqrt{D^2}=3.V_S.I_{ch}$$

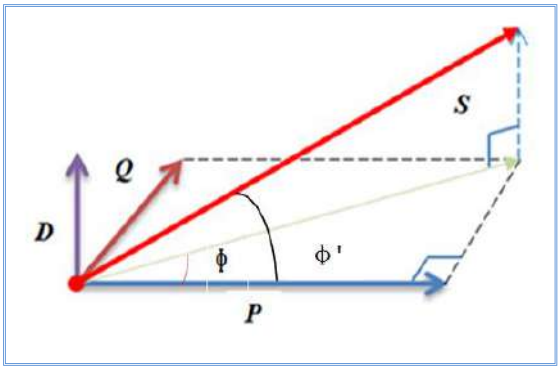


Figure III.1 :Diagramme de Fresnel des puissances

III.8.Elimination des harmoniques

Afin d'éliminer les harmoniques du réseau électrique il existe deux types de solutions différents : les solutions modernes et celle que l'on nomme des solutions traditionnelles.

III.8.1.Solutions traditionnelles

Les solutions traditionnelles sont résumées dans le schéma de la figure ci-dessous:

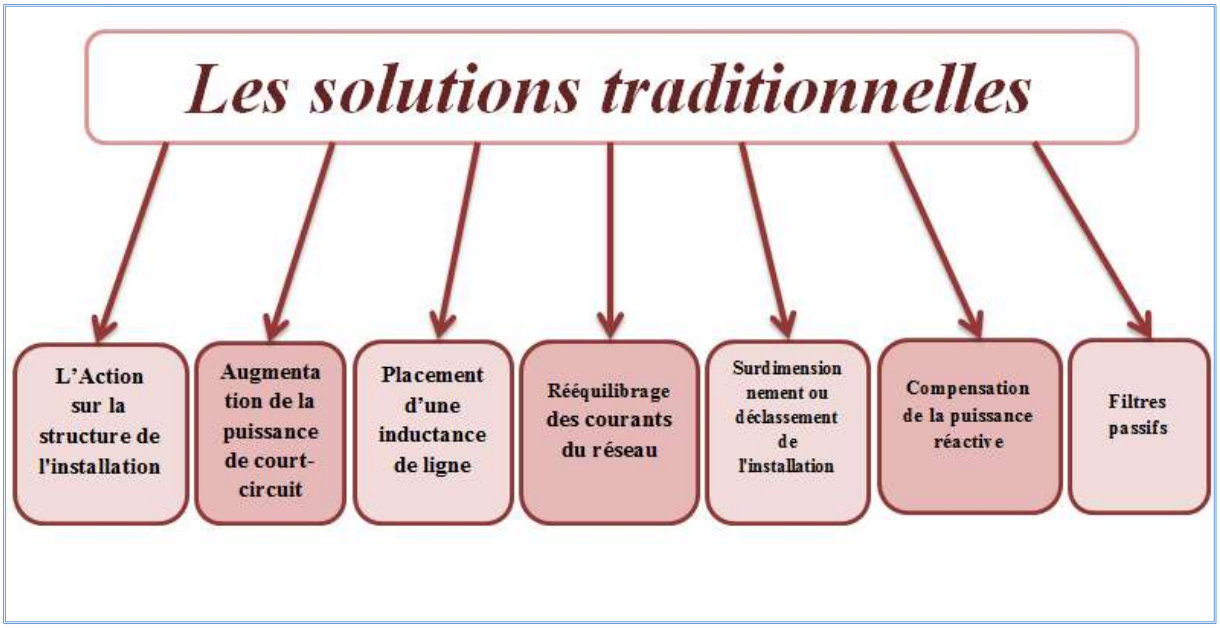


Figure III.2 : les solutions traditionnelles d'élimination des harmoniques

III. 8.1.1 Les filtres passifs

Les solutions conventionnelles aux problèmesde distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simplesolution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique.

Les filtres passifs ont des éléments a base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classifier les filtres passifs suivant leur fréquence derésonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Cela permet dedéfinir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisé pour les charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisé dans le cas descharges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi, les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.[28]

Les filtres harmoniques passifs ont l'avantage de pouvoir corriger le facteur de puissance en dimensionnant correctement les condensateurs afin d'échanger une quantité déterminée de puissance réactive avec le réseau. Cependant, ces filtres présentent quelques inconvénients :

- L'impédance du réseau en présence des filtres peut faire apparaître des résonances,

- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé,
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.[33]

a- Filtre passif série :

L'un des moyen d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (Figure III.3), dans l'alimentation d'entrée de la ligne ,de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques àpartir de la source à la charge non-linéaire. [28]

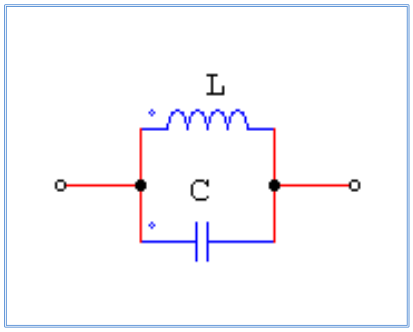


Figure III.3 :filtre passif série

b- Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure III.4. Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à lafréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance. [28]

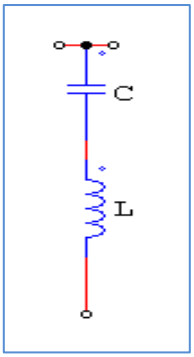
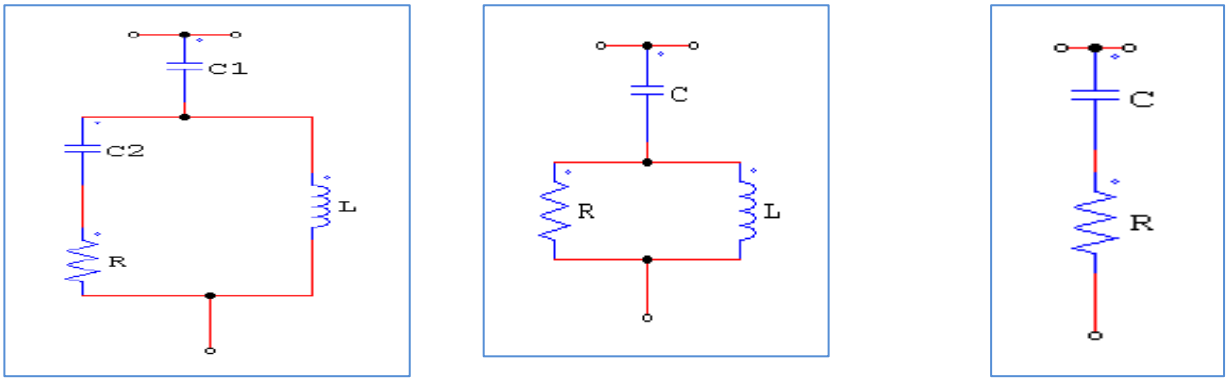


Figure III.4 : filtre actif parallèle

c- Filtre passif résonant :

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figureIII.5 son impédance équivalente est [30]:

$$Z_{eq} = \frac{1 - LC\omega^2 + jRL\omega}{jC\omega} \qquad \text{(III.2)}$$



(a) (b) (c)

Figure III.5 :Filtres amortis passe-haut (a) : filtre de 1 er ordre (b): filtre de 2ème ordre (c) : filtre de 3ème ordre

d- Filtre passif amorti :

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure III.6.Son impédance équivalente est :[30]

$$Z_{eq} = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \qquad \text{(III.3)}$$

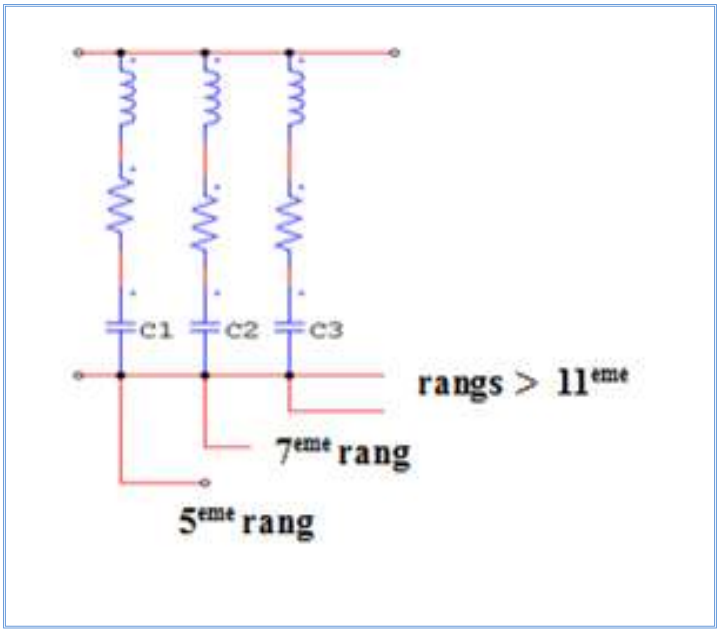
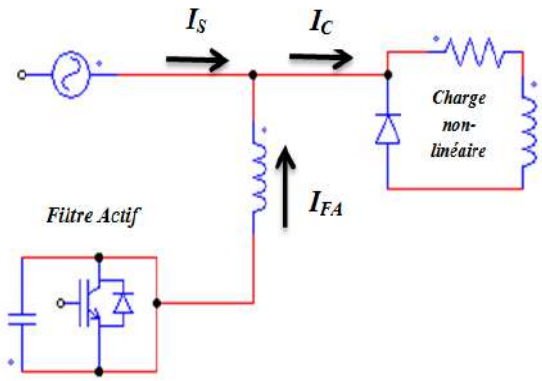
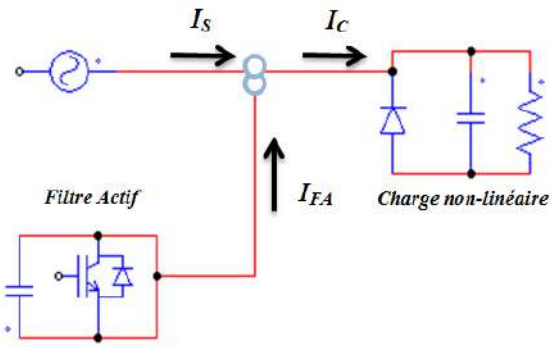
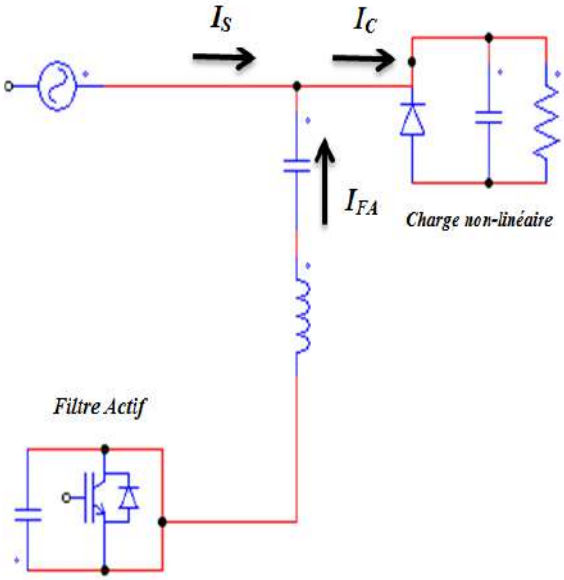


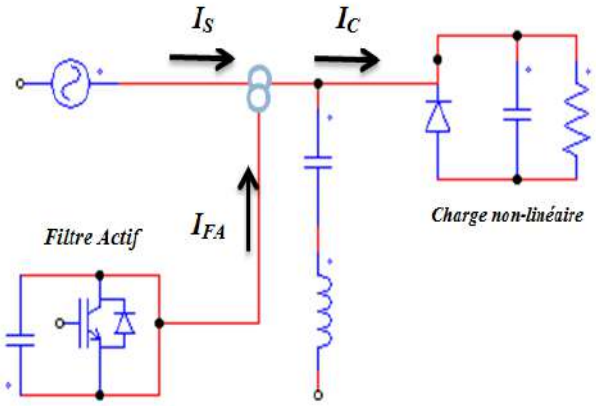
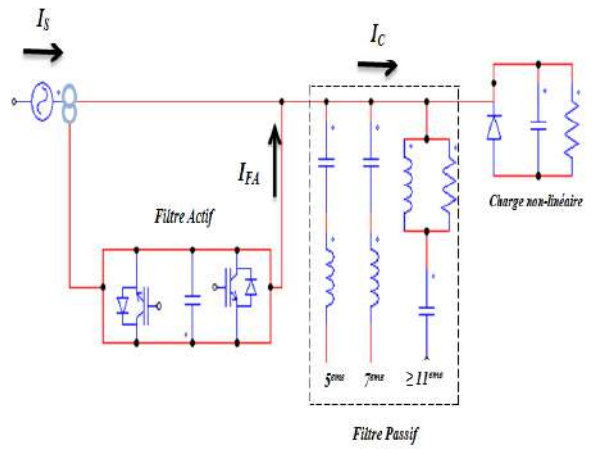
Figure III.6 : filtre passif amortie

III.8.1.2.Solutions modernes

Tableau III.3 : Différentes configurations de filtres

Type	Configuration	Avantages/Inconvénients
Filtre Actif Parallèle		♣***Avantage:*** - Elimination des courants harmoniques, - compensation de l'énergieréactive, - correction du facteur depuissance, - - rééquilibrage des courants dela charge non-linéaire. ♣***Inconvénients***: - Coût et pertes élevés, - limité aux charges de faible et moyenne puissance, - risque d'écoulement des courants de compensation dans les filtrespassifs raccordés au même réseau.

Filtre Actif Série		♣***Avantages***: - Isolation et absorption des tensions harmoniques, - rééquilibrage et régulation des tensions alimentant lacharge non-linéaire. ♣***Inconvénients:*** - Coût et pertes élevés, difficulté de protéger le filtre actif contrôlés surintensités, - incapacité à contrôler l'énergie réactive.
Filtre Actif Parallèle & PassifParallèle		♣***Avantages***: - Dimensionnement réduit du filtre actif destiné seulement auxbasses fréquences harmoniques, - applicabilité aux fortes puissances, - régulation de l'énergie réactive, - suppression des creux de tension desfours à arc et des cyclo-convertisseurs. ♣ ***Inconvénients***: - Les courants de compensation peuvent circuler dans lesfiltres passifs, - les courants harmoniques peuvent transiter dans le filtre actif.

Filtre Actif Série & Passif Parallèle		♣***Avantages:*** - Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer lescaractéristiques de compensation dufiltre passif, - aucun risque de circulationd'harmoniques dans le filtre actif. ♣***Inconvénients***: - Difficulté à protéger le filtre actif contre les surintensités, - incapacité à contrôler l'énergie réactive.
Filtre Hybride: Actif Parallèle, Actif Série & Passif Parallèle		♣***Avantages***: - Elimination d'harmoniques et des courants de séquence négative, - régulation de la tension continuecommune aux deux filtres actifs, - correction des distorsions et desdéséquilibres de la tension d'entrée, - compensation des creux de tension. ♣ ***Inconvénients***: - Fluctuations à basses fréquences de la puissance active s'écoulant à partir ou vers le filtre sérielors de l'absorption des creux de tension.

III. 9 Structure du Filtre Actif Parallèle

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs, formant l'onduleur.[29]

- ***La partie puissance :***est constituée dans un premier temps d'un onduleur de tension deux niveaux a basse d'interrupteur de puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle ; que l'on remplacera par un onduleur trois niveaux et un filtre à la sortie pourl'onduleur présenté précédemment dans le chapitre II
- ***La partie commande*** : elle est constituée de l'algorithme pq(qui sera développé plus bas dans le chapitre) et de la commande de l'onduleur.

III.9.1. Identification des courants harmoniques

Les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques sont classées dans deuxdomaines, fréquentiel et temporel.

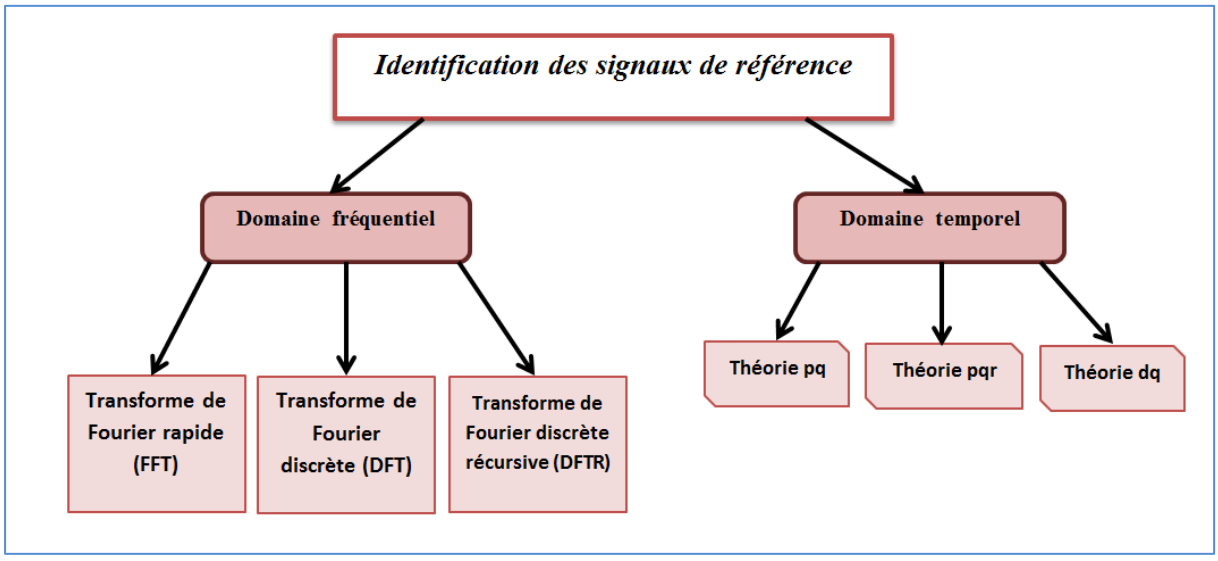


Figure III.7 : Les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques

La première est basée sur la transformée de Fourier de la tension ou du courant nonsinusoïdal pour en extraire les harmoniques de compensation. Cet algorithme présente la difficulté de nécessiter beaucoup de calcul surtout lorsque on augmente le nombre d'harmoniques à éliminer ; il en résulte un temps de réponse élevé .

La deuxième approche est basée sur la comparaison instantanée des grandeurs de compensation harmonique de référence, sous forme de tension ou de courant, aux grandeurs harmoniques réelles. Beaucoup de méthodes entrent dans cette famille,notamment la méthode des puissances réelles et imaginaire instantanées.[29][36]

On distingue des méthodes d'extraction globale (toutes les harmoniques à compenser sontprésents dans la référence) et sélectives (les harmoniques à compenser sont choisies etlimitées) .

Le choix de la méthode dépendra des objectifs fixés :

- compensation de tousles courants harmoniques,
- compensation sélective de certaines harmoniques,

La compensation des harmoniques dans des cas de configurations défavorables est susceptible de survenir dansles réseaux triphasés industriels, car la tension du réseau est souvent perturbée oudéformée.[29]

Pour générer les courants de référence servant à la commande du filtre actif,nous avons opté d'étudier la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

III.9.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi de mettre en œuvre la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, car elle est d'une grande souplesse en permettant de choisir la perturbation à compenser avec précision,rapidité et facilité d'implantation.

La méthode des puissances instantanées introduite par H. Akagi et Al, exploite la transformation de Concordia des tensions aux points de raccordement du filtre actifparallèle et des courants absorbés par la charge polluante, afin de calculer les puissances réelles et imaginaires instantanées comme le montre la figure ci-dessous :

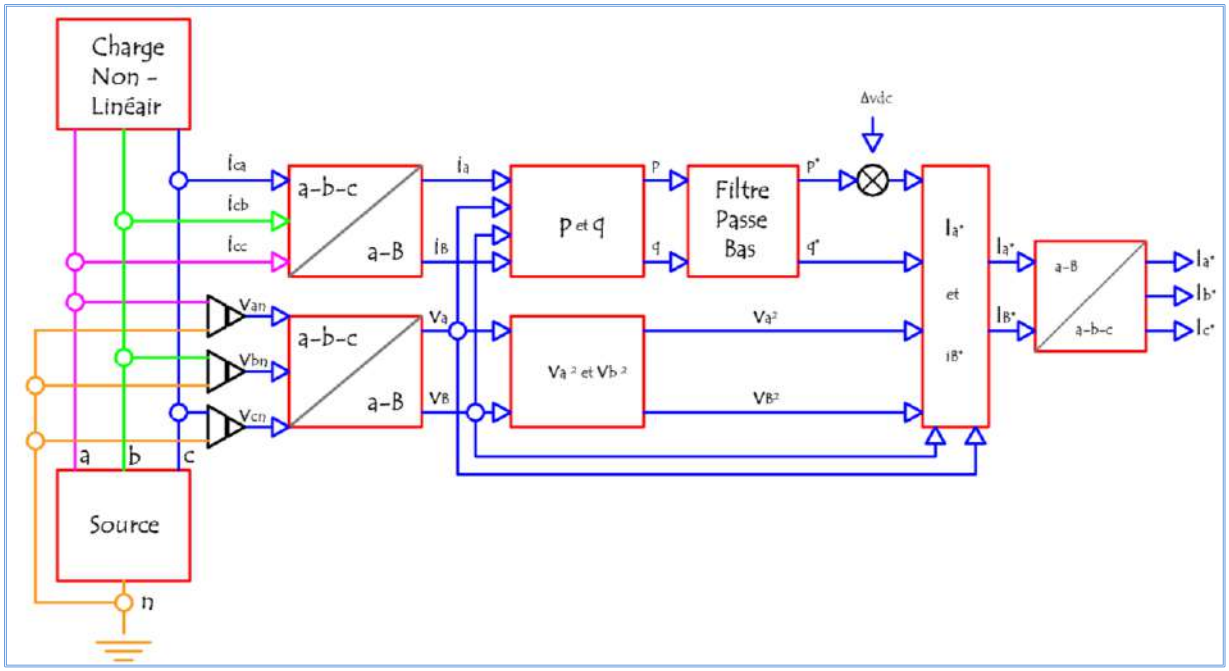


Figure III.8 : Algorithme p-q d'extraction des courants harmoniques

Notons respectivement par (V_α , V_β) et (I_α , I_β) les composantes orthogonales de Concordia associées aux tensions V_{sk} (k = a, b, c) et aux courants I_{ck} . La transformation de Concordia permet d'écrire les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.4)}$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.5)}$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement *p* et *q*, sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(III.6)}$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, nous obtenons :

$$p = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta = V_{sa} I_{ca} + V_{sb} I_{cb} + V_{sc} I_{cc} \quad \text{(III.7)}$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$p = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{sb} - V_{sc})I_{ca} + (V_{sa} - V_{sc})I_{cb} + (V_{sa} - V_{sb})I_{cc}] \quad \text{(III.8)}$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous permet d'écrire:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

$\bar{p} et\, \bar{q}$sont les composantes continues de p et q

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$sont les composantes alternatives de p et q .

L'inverse de l'équation (II.6) des puissances active et réactive permet d'établir la relation(II.10) des courants $I_\alpha$et I_β :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{(III.10)}$$

En considérant les équations (II.9) et (I.10), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α ,β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\alpha & V_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\alpha & V_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\alpha & V_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right. \quad \text{(III.11)}$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du *filtre actif parallèle* doit inclure $\tilde{p}$et$\tilde{q}$. Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

$$\begin{bmatrix} I_{ref\,\alpha} \\ I_{ref\,\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.12)}$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $I_\beta$et $I_\alpha$par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I_{ref\,a} \\ I_{ref\,b} \\ I_{ref\,c} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(III.13)}$$

Il est évident, d'après la relation (II.14), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelles et imaginaires doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant deux filtres, le premier pour isoler la partie *p* de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie *q* de la puissance réactive instantanée.

La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre:

$$F_{pb}(S) = \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\xi_0\omega_0 S + \omega_0^2} \quad \text{(III.14)}$$

Avec:

• $\omega_0 = 2\pi$ f. f_0 est la fréquence de coupure du filtre ;

• s : l'opérateur de Laplace ;

• ξ_0 : dépassement.

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux.

III.9.2Dimensionnement des paramètres du filtre parallèle actif

III.9.2.1 Dimensionnement du condensateur

Les variations brusques de la puissance instantanée absorbée par la charge entrainent des perturbations de la tension de bus continu aux bornes du condensateur. Ces perturbations fluctuation peuvent être maitrisées par un choix judicieux de la valeur du condensateur. La surtension maximale que peut subir le condensateur est donnée par :

$$V_{dc\,max} = \frac{1}{C} \cdot \int_{\theta 3}^{\theta 2} i_{dc}(t)dt + V_{dc} \quad \text{(III.15)}$$

Avec:

θ_1, θ_2: Angles existant à l'intervalle [0,2π].

La capacité du condensateur C s'exprimera par l'expression suivante :[28]

$$C = \frac{1}{\Delta V_{dc}} \int_{\theta 1}^{\theta 2} i_{dc}(t)dt \qquad \text{(III.16)}$$

III.9.2.2. Dimensionnement des paramètres du régulateur PI

Le régulateur utilisé permet la régulation de la tension du bus continu pour que les bornes du condensateur soient maintenues à une valeur précise:

a. Action proportionnelle :

Elle est la base de la constitution de la boucle sortie du régulateur proportionnellement à l'écart d'une variation brutale de la consigne ou d'une grandeur perturbatrice, elle va dans une boucle bien conçue, ramener le système à un nouvel état d'équilibre[39]

b. Action intégrale :

L'action intégrale du régulateur PIevolue jusqu'à atteindre la nullité de l'écart entre la valeur mesuree et la reference.

III.9.2.2 Dimensionnement du filtre de sortie

Dans le but d′absorber les harmoniques hautes fréquences dues aux commutations del'onduleur, on introduit un filtre passif d'inductance L_f à la sortie du filtre actif. Le dimensionnement de L_f est réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant *if* est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire est définie par [29] :

$$\alpha = 4 \cdot \varepsilon . f_c \qquad \text{(III. 17)}$$

Telle que: ε est l'amplitude de l'onde triangulaire, f_c est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.

La pente maximale de i_f dans le cas d'un filtre actif à point milieu, est donnée par:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0{,}5.V_{dc} + V_{sm}}{L_f} \qquad \text{(III.18)}$$

D'où une valeur de L_f estimée à:

$$L_f = \frac{0{,}5.V_{dc} + V_{sm}}{4.\varepsilon f_c} \qquad \text{(III.19)}$$

III.10. simulation numérique sous Matlab Simulink

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus pour un filtre actif parallèle deux niveaux puis trois niveaux en utilisant la méthode pq pour un réseau ,avec des tensionsde source équilibrées, raccordea une charge non-linéaire qui génère des harmoniques.

La charge polluante est constituée par un redresseur triphasé commandéet le réseaud'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par unef.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance (Ls) et une résistance (Rs) caractérisantl'impédance de court-circuit du réseau, Le redresseur débite dans unecharge (RL). L'inductance (Lc) et la résistance (Rc) à l'entrée du redresseur modélisentl'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant.

Dans notre système :

Lc= 1,5 mH

Ls= 19,4.10^3mH et Rs=0,25 ohm.

Nous allons donc tout d'abord nous assurer du bon fonctionnement des deux filtres actifs parallèles en les alimentant avec une source continue puis nous allons comparer l'efficacité d'un filtre actif parallèle deux niveaux avec un filtre a trois niveaux du même type.

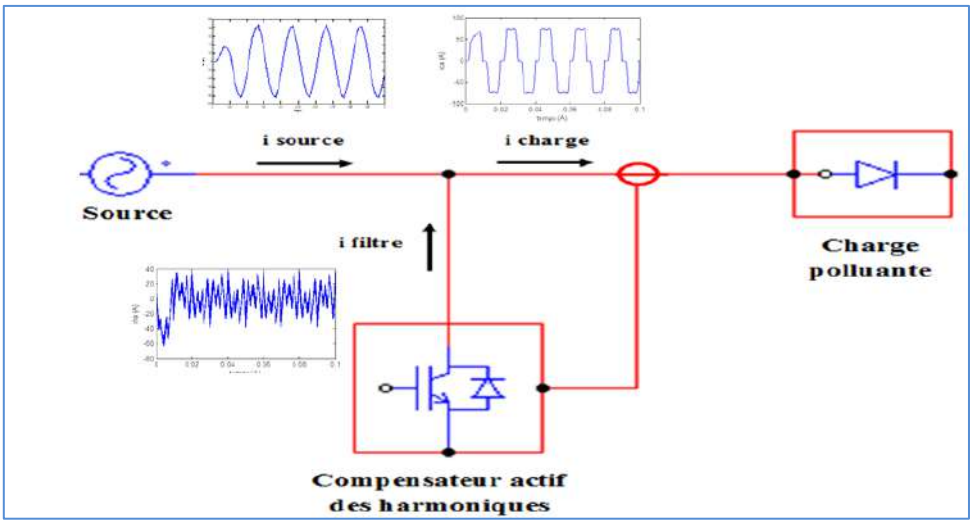


Figure III.9 :schéma du système étudie

III.10.1. résultats de simulation du système sans filtre

Afin d'étudier l'état du système et de savoir l'apport qu'aura le filtrage, nous avons étudié le système seul et il nous a donné les résultats suivants :

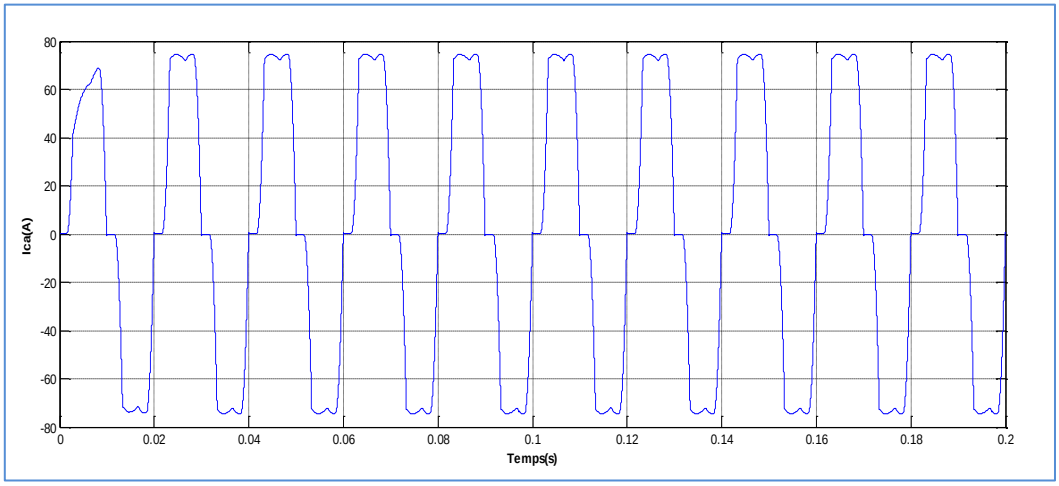


Figure III.10 :courbe du courant de charge non-linéaire de la phase a en fonction du temps

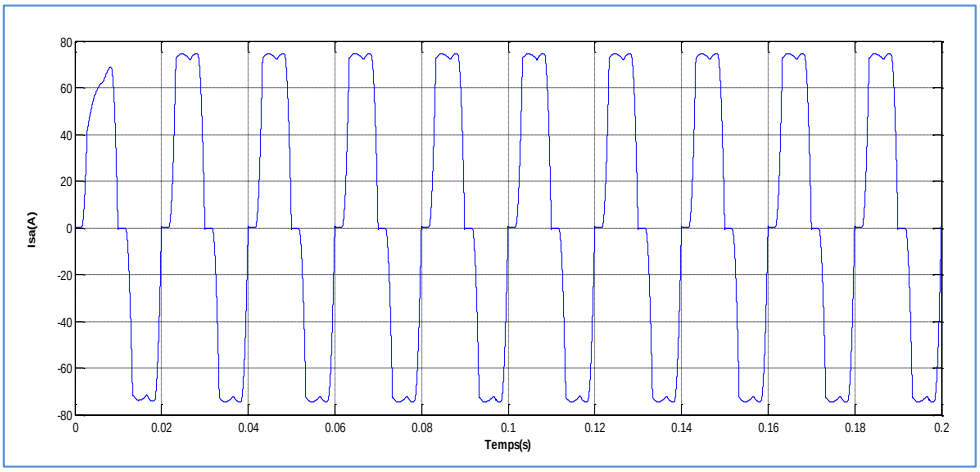


Figure III.11 :courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps

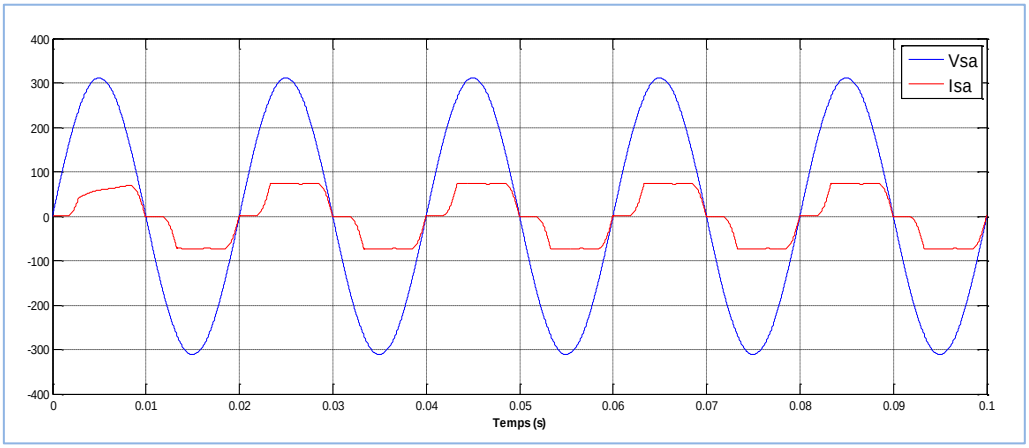


Figure III.12 :courbe du courant et de la tension de source de la phase a en fonction du temps

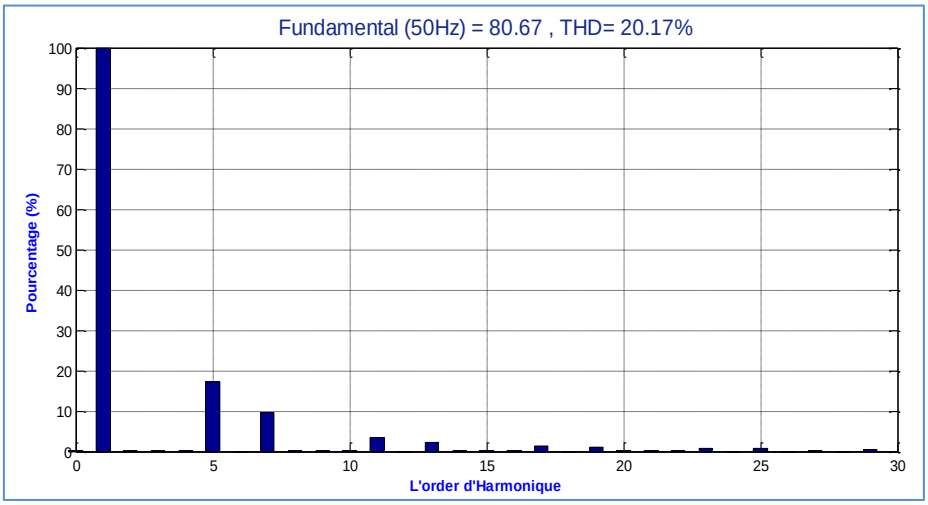


Figure III.12 :le THD du système sans filtrage

- ***Analyse des résultats de simulation :***

D'après les figures II.10, II.11et II.12 , on constate que l'allure du courant de source Isa suit l'allure du courant de charge Ica et que tout deux n'ont pas une allure sinusoïdale donc ils comportent des harmoniques, on note aussi que la tension et le courant de source V_{sa} et I_{sa} ne sont pas totalement en phase.

Quant à la figure II.13 qui montre le taux de distorsion harmonique du système il montre que le système et bien au-dessus des normes et donc que notre système est pollué.

Par consequent, on peut affirmé qu'il est nécessaire d'inclure un filtre dans ce système.

III.10.2. résultats de simulation du système avec filtre

a. Avec source continu :

Afin de tester le FAP a deux niveaux puis à trois niveaux et d'observer le comportement de ce nouveau système, nous allons en premier lieu alimenter les FAP à l'aide de sources continues.Les résultats obtenus après simulation sont les suivants :

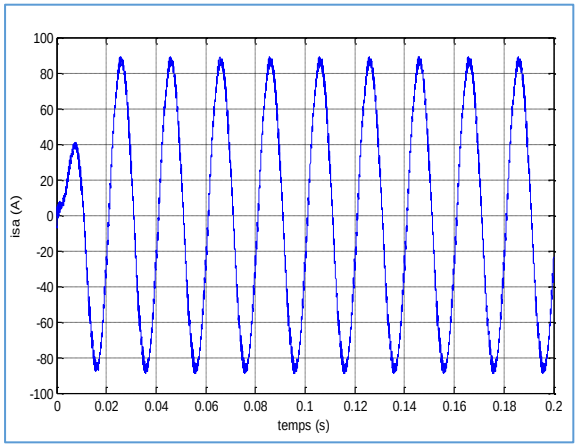


Figure III.14 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtredeux niveaux.

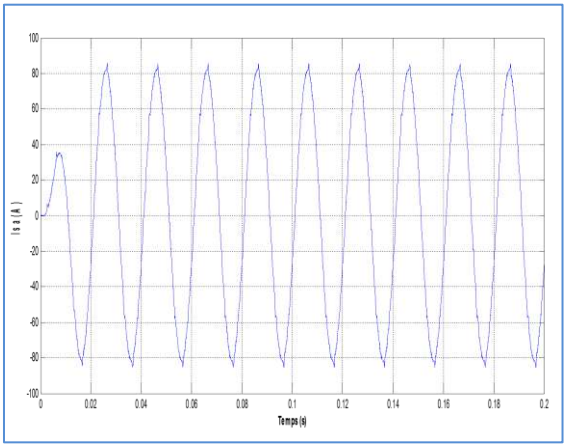


Figure III.15 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtretrois niveaux.

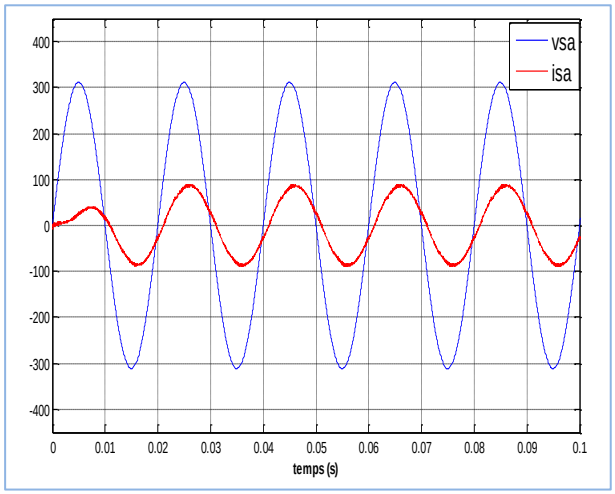


Figure III.16 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux

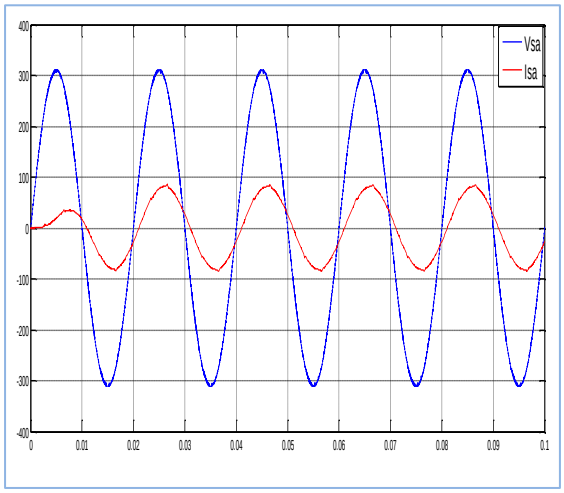


Figure III.17 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux

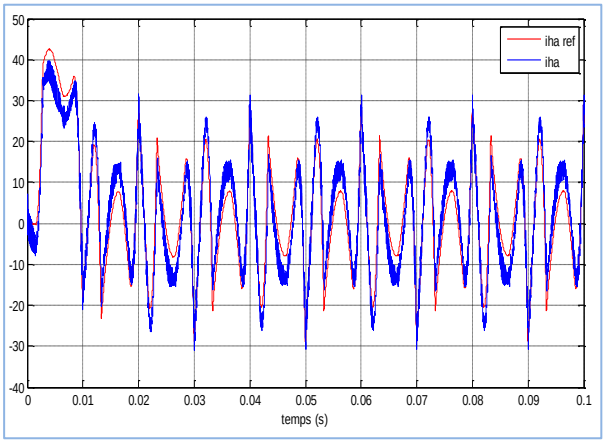


Figure III.18 : courbe du courant harmonique mesuré et le courant harmonique de références de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux.

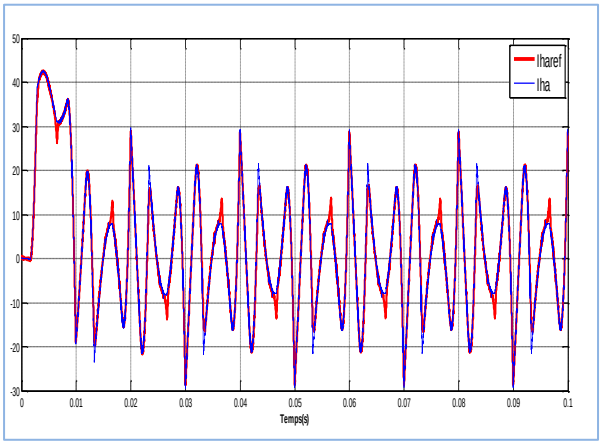


Figure III.19 : courbe du courant harmonique mesuré et le courant harmonique de références de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux.

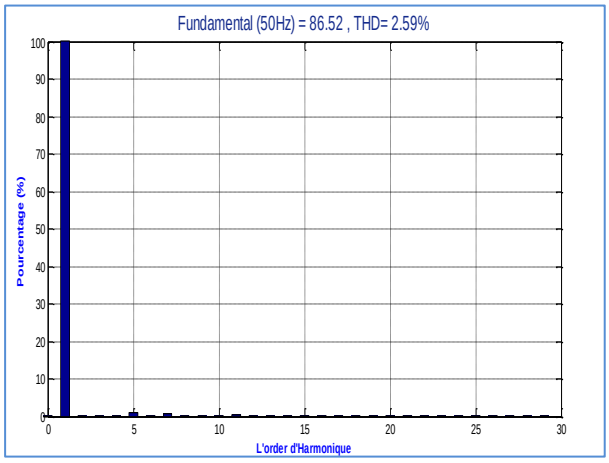


Figure III.20 : le THD avec filtre deux niveaux.

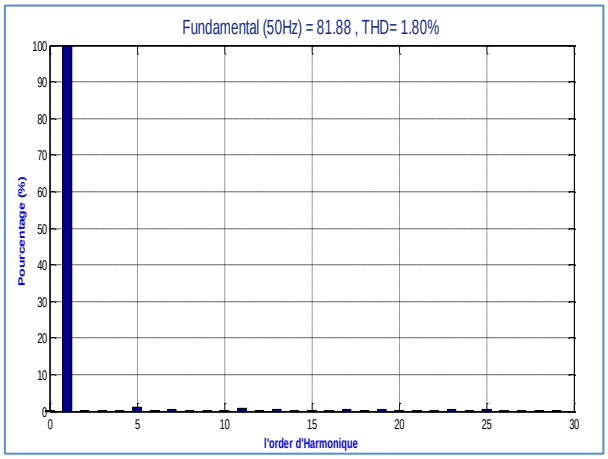


Figure III.21 : le THD avec filtre trois niveaux.

- ***Analysedes résultats de simulation :***

D'après la figure III.14 qui représente l'évolution de la valeur du courant de source et la figure III.15 qui représente elle l'évolution de la valeur du courant de source dans un système avec filtre trois niveaux en fonction du temps, on remarque que l'allure de Is est sinusoïdale dans les deux cas or avec un filtre trois niveaux, le courant est plus lisse .

D'après la figure III.16qui montre l'évolution de la valeur du courant et de la tension de source en fonction du temps dans un système avec filtre deux niveaux et la figure III.17 qui le représente avec

un filtre trois niveaux; on voit clairement que le courant i_s est en phase avec la tension $v_s$dans les deux figures.

D'après les figure III.18, III.19 qui montre l'évolution de la valeur du courant sortant du filtre et du courant de filtrage de référence en fonction du temps avec un filtre deux niveaux et avec un filtre trois niveaux ; on note que le courant $i_h$suit l'allure du courant de référence i_{href}mais on constate que la poursuite est meilleure pour le filtre a trois niveaux .

Selon la figure III.20 qui représente le taux de distorsion harmonique dans le système avec filtre deux niveaux, on constat que le filtre deux niveaux fonctionne et a effectivement dépollué le système en diminuent le taux de 20,17% à 2,59% ; mais il a néanmoins éte surpasse par le filtre a trois niveaux qui lui a abaisse ce taux a 1,80% comme le montre la figure III.21.

b. Avec bus continu :

Apres avoir testé les FAP a deux niveaux puis à trois niveaux et s'être assurer de leur bon fonctionnement' nous allons alimenter les FAP à l'aide d'un bus continu. Les résultats obtenus après simulation sont les suivants :

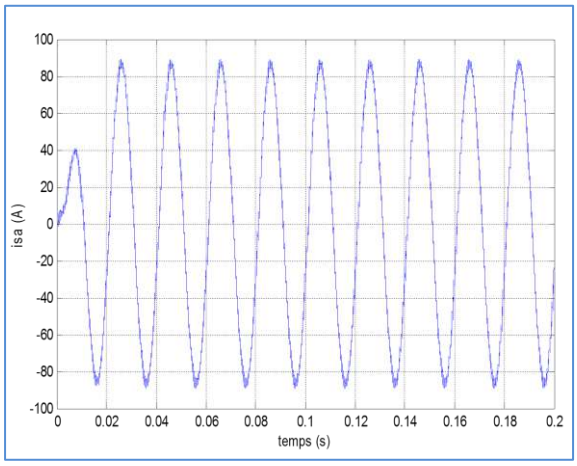


Figure III.22 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux

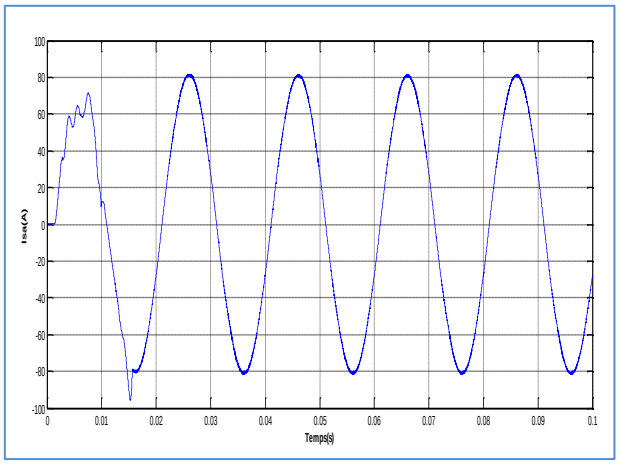


Figure III.23 : courbe du courant de source de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux

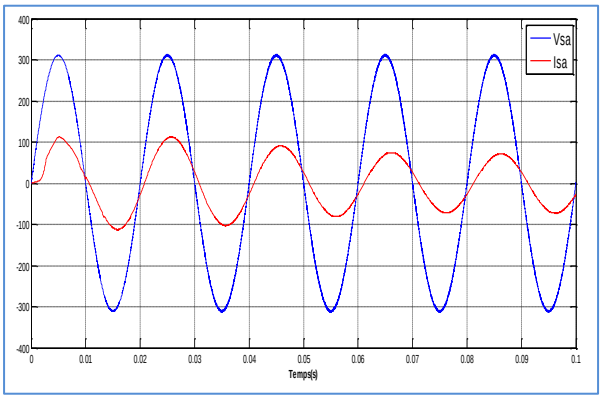


Figure III.24 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux

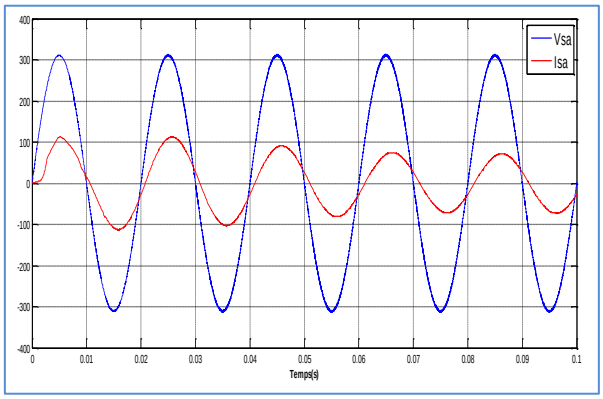


Figure III.25 : courbe du courant de source et la tension de source de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux

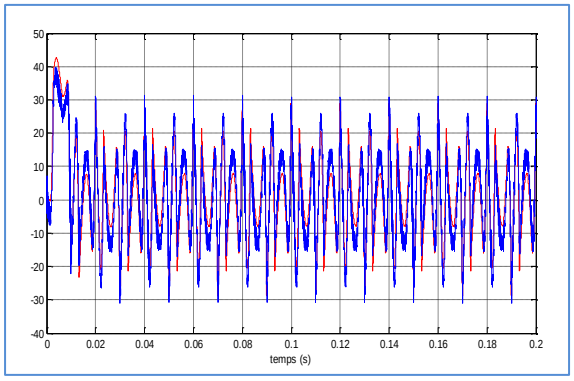


Figure III.26 : courbe du courant harmonique mesuré et le courant harmonique de références de la phase a en fonction du temps avec filtre deux niveaux

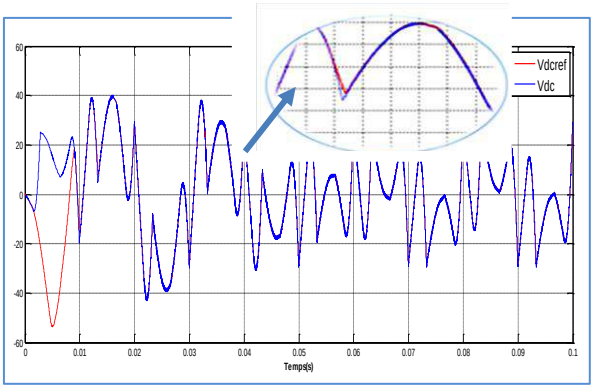


Figure III.27 : courbe du courant harmonique mesuré et le courant harmonique de références de la phase a en fonction du temps avec filtre trois niveaux

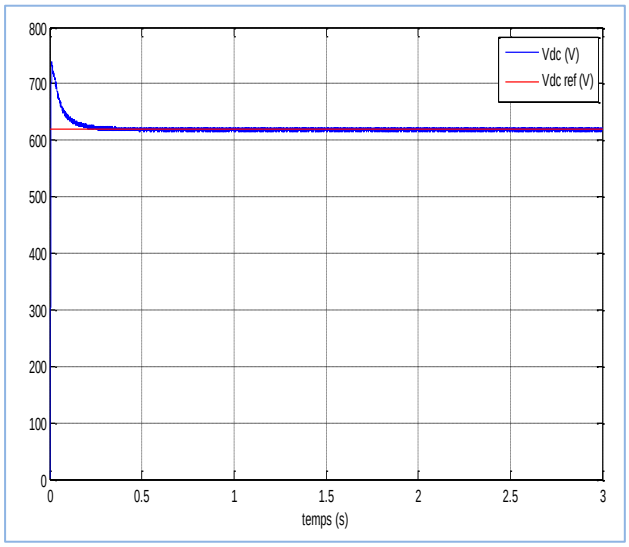


Figure III.28 : courbe la tension V_{dc} mesuré et la tension V_{dc} de références en fonction du temps avec filtre deux niveaux.

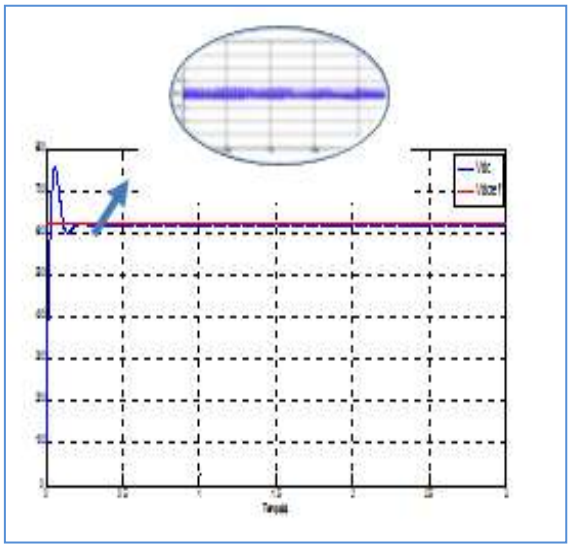


Figure III.29 : courbe la tension V_{dc} mesuré et la tension V_{dc} de références en fonction du temps avec filtre trois niveaux.

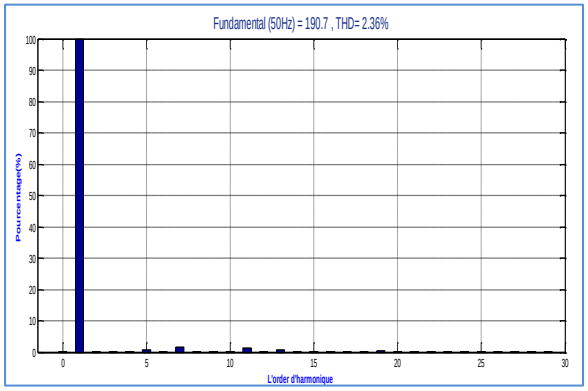


Figure III.30 : le THD avec filtre deux niveaux.

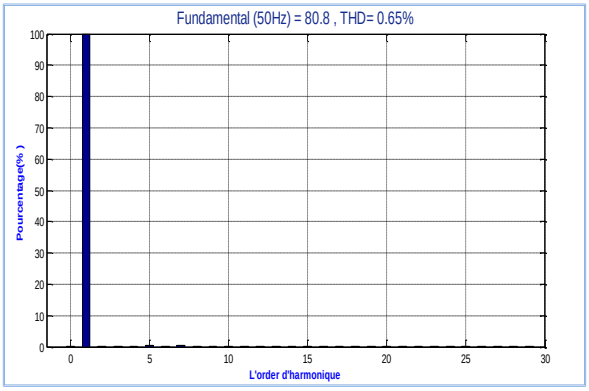


Figure III.31 : le THD avec filtre trois niveaux.

➢ ***Analyse des résultats de simulation :***

D'après la figure III.22 qui représente l'évolution de la valeur du courant de source dans un système avec filtre deux niveaux en fonction du temps, on remarque que le courant de source is a une allure sinusoïdale ;mais la figure III.23 qui représente, elle , l'évolution de la valeur du courant de source dans un système avec filtre trois niveaux en fonction du temps a une allure sinusoïdale encore plus lisse que la précédente .

D'après la figure III.24 qui montre l'évolution de la valeur du courant et de la tension de source en fonction du temps dans un système avec filtre deux niveaux et la figure III.25qui montre la même évolution avec un filtre trois niveaux; on note que le courant is est en phase avec la tension vs dans les

deux figures ,ce qui montre que le facteur de puissance est pratiquement unitaire ,donc notre système est équilibré .

D'après la figure III.26 qui montre l'évolution de la valeur du courant sortant du filtre et du courant de filtrage de référence en fonction du temps avec un filtre deux niveaux, on voit qu'après un régime transitoire le courant de filtrage mesuré suit l'allure du courant de référence.

La figure III.27représente l'évolution de la valeur du courant sortant du filtre et du courant de filtrage de référence en fonction du temps avec un filtre trois niveaux ; on note dans cette figure que la poursuite est meilleure de tel manière que nous ne pouvons plu distingue le courant de filtre mesuré et le courant issu de l'algorithme pq qui représente la référence .

La figure III.28 et la figure III.29 représente l'évolution de la valeur dela tension aux bornes du condensateur et celle de la valeur de la tension de référence 620v en fonction du temps avec un filtre deux niveaux et avec un filtre trois niveaux, montre que dans les deux cas grâce au régulateur ,la tension aux bornes du condensateur reste constante a la valeur de la tension de référence en fonction du temps

On constate que le filtre deux niveaux, dans ce cas, est encore plus efficace pour dépolluer le système, en diminuant le taux de 20,17% à 2,36% figure (III.30) ; or le filtre a trois niveaux dans ce cas offre lui aussi de meilleures performances et abaisse ce taux a 0,65% comme le montre la figure III.31.

- ***analyse comparative*** :

Tableau III.4 : tableau comparatif des performances des systèmes de filtrage

Système Sans FAP	Avec FAP 2 niveaux		Avec FAP 3 niveaux	
	Avec source continue	***Avec condensateur***	***Avec source continue***	***Avec condensateurs***
Le THD=20,17%et la tension est le courant de source ne sont pas en phase : le système est pollué et le facteur de puissance n'est pas unitaire.	**Le THD=2,58%** et le courant de source et en phase avec la tension de source le facteur de puissance prend la valeur 0.97.	**Le THD=2,36%** il et donc plus bas que pour un FAP avec source continu et le facteur de puissance prend la valeur 0.972.	**Le THD=1,80%** les performances du ce FAP est donc meilleure que le FAP a deux niveaux. le courant de source et en phase avec la tension de source dans ce cas aussi avec un facteur de puissance de 0.983.	**Le THD=0,65%** cette configuration est donc la plus efficace. Et elle offre aussi un facteur de puissance est pratiquement unitaire.

III.11 Conclusions

Ce chapitre nous a permis d'étudier lesdifférentes solutions mises en œuvre afin d'améliorer la qualité du réseau.Nous avons donc étudié les différents filtres passifsexistantset une variété de filtres actifs ainsi que la méthodes d'identification des courants harmoniques pq ,puis nous avons réalisé une application de filtrage actif parallèle avec différentes configurations connectees dans un réseau ou se trouve une charge non-linéaire afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique de cette dernière.

Les résultats de simulation ont démontré l'efficacité des FAPa éliminer les harmoniques duesa une charge polluante et a prouver que parmi les systèmes étudiés le FAP trois niveaux alimente à l'aide d'un bus continu est incontestablement le plus efficace.

Chapitre IV

Etude et analyse du système éolien raccordé au réseau avec filtrage

IV.1 Introduction

Ici, nous associons au point de raccordement de l'éolienne un filtre actif parallèle. Le filtre actif parallèle va filtrer les harmoniques produites par la MADA qui alimente le réseau puis nous allons étudier le comportement de ce système à l'aide du logiciel MATLAB.

En premier lieu nous allons étudier les comportements des différents composants du système sans filtrage, puis avec un filtre actif a 2 niveaux ainsi qu'un filtre actif 3 niveaux.

Enfin, nous allons comparer les performances de ces deux systèmes et en conclure lequel est le plus efficace.

IV.2 le principe de fonctionnement du système éolien

Le système simuler par MATLAB est représenté par la figure VI.1 ci-dessous.

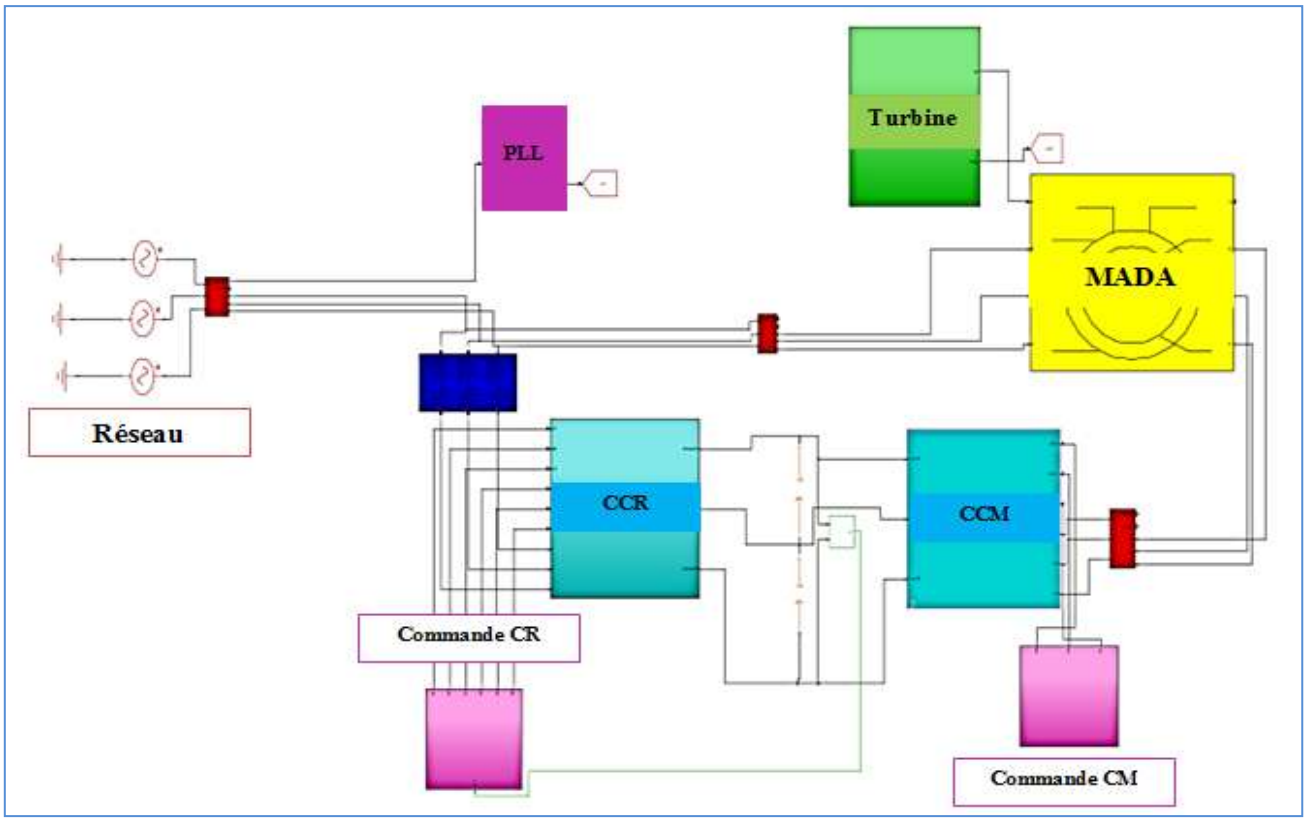


Figure IV.1 :le système éolien connecte au réseau sans filtre actif

Comme on peut le constater à travers la figure IV.1, le système ce compose d'un bloc qui simule le comportement de la turbine éolienne, dans lequel est inclus l'équation du vent et une commande MPPT

a base de régulateur PI , qui est reliée a la Machine asynchrone double alimentation afin de produire de l'énergie électrique à injecter au réseau.

Pour cela nous avons utilisé :

- Deux convertisseurs bidirectionnelles ; l'un cote machine CCM dans le but d'assurer le couple nécessaire permettant de faire varier la vitesse mécanique du générateur afin d'extraire le maximum de puissance , et l'autre cote réseau CCR pourréguler la tension du bus continu et a contrôler les puissances active et réactive transitant à travers ce dernier.
- Ces deux convertisseurssont asservis grâce à deux commandes différentes ; une commande vectorielle, cote machine, et une commande par hystérésis ,cote réseau.
- Un filtre passif parallèle afin d'améliorer la qualité du courant injecté au réseau.
- Le bloc de PLL a pour but de maintenir la fréquence à 50 Hz (la fréquence du réseau)

IV.2.2 les résultats de simulation

Cette simulation a éte conduite pour les paramètres suivants :

Tableau IV.1 : Paramètres mécaniques et électriques du système éolien étudié.

Système	Paramètres
Turbine	Nombre de pale :3 Rayon :3m Inertie Jt:0,3126Kg/m^2 Coefficient de frottement Kf :0,00681 Vitesse nominal du vent V_n :12m/s
Multiplicateur	5,4m
MADA	U_s =620 v f= 50Hz P_n=4000w R_s=1,405 ohm R_r=1,395ohm L_s= 0,178039H L_r=0,178039H L_m =0.1722H
Bus continu	C=1100uF Vdc=620v
Filtre passif RL	R=0.02ohm L=40mH
Réseaux électrique	U=380v F=50Hz

Tableau IV.2 : Paramètres des commandes du système éolien étudié.

Commande	Paramètres
Contrôleur MPPT	$\lambda = 8{,}1 C_{pmax}=0.4$
Gains des régulateurs PI des courants rotorique	$Kp = 2.\rho.L_r - R_r$ $Ki = 2.\rho^2.L_r$ Avec $\rho = 2500$
Contrôle de la tension du bus continu	Facteur d'amortissement :$\varepsilon = 0.707$ Fréquence de coupure :$\omega_0 = 32\ rad/s$ $Kp = 2.\varepsilon.c.\omega_0$ $Ki = c.\omega_0^2$

En entrainant la turbine avec le profil du vent représenté précédemment dans le chapitre 2,on obtient les résultats suivant :

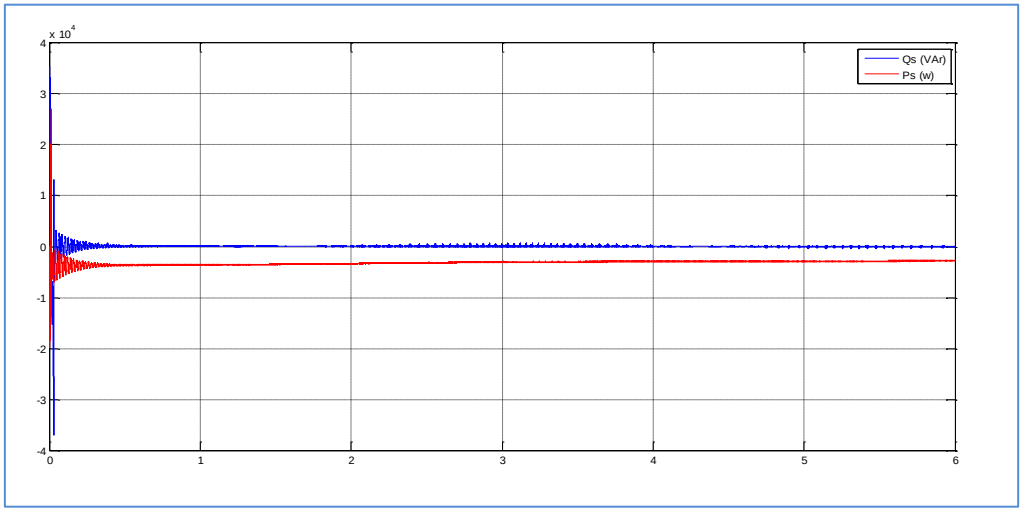


Figure IV.2 :la courbe de la puissance active et de la puissance réactive statorique en fonction du temps

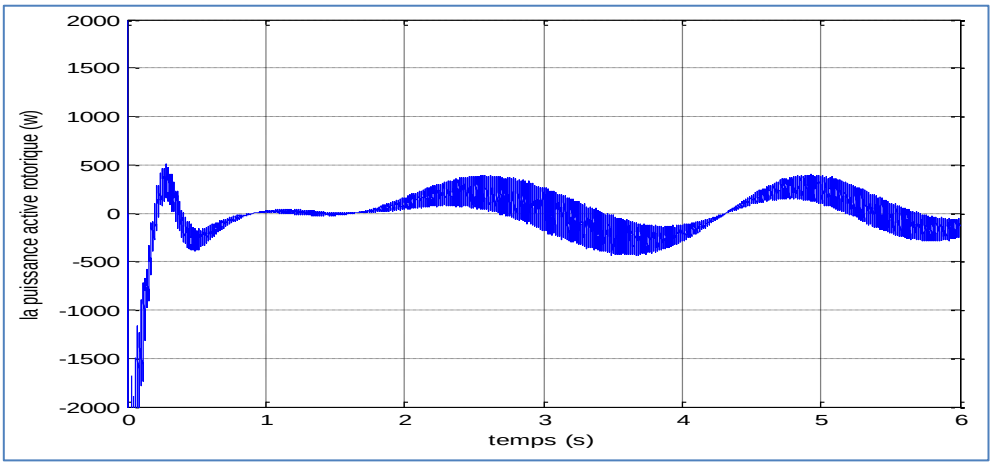


Figure IV.3 :la courbe de la puissance active rotorique en fonction du temps

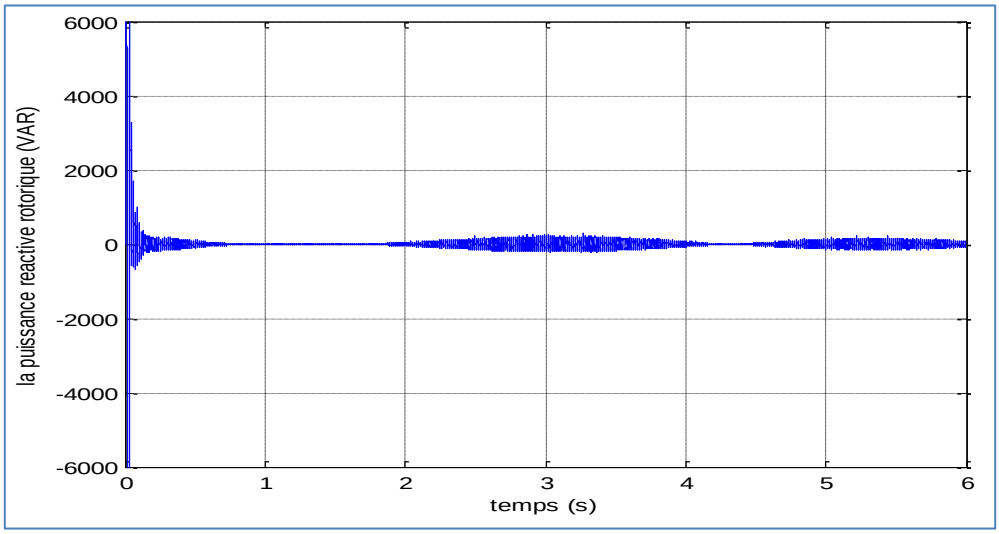


Figure IV.4 :la courbe de la puissance réactive rotorique en fonction du temps

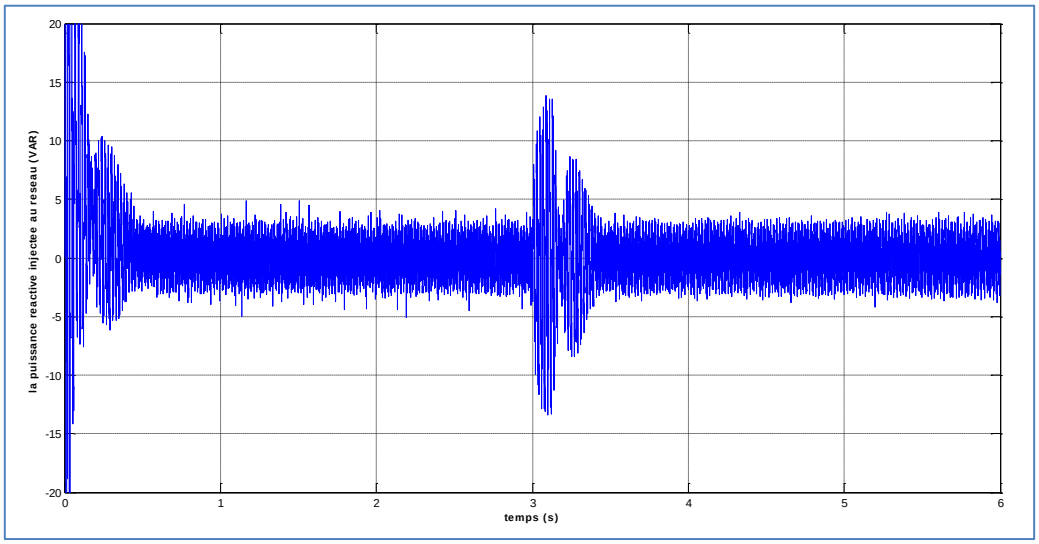


Figure IV.5 :la courbe de la puissance réactive injectée au réseau en fonction du temps

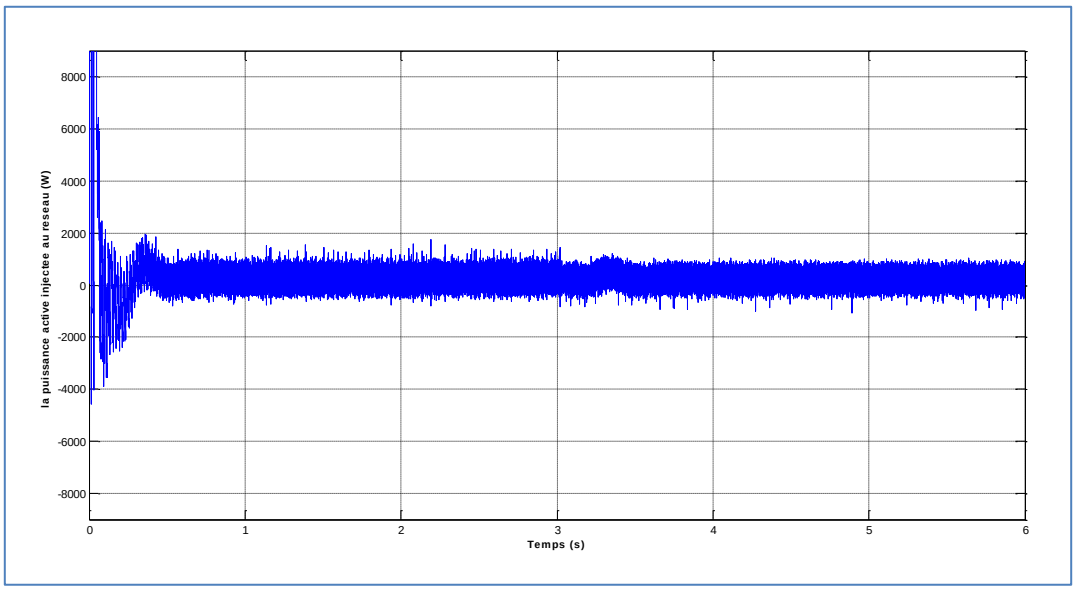


Figure IV.6:la courbe de la puissance active injectée au réseau en fonction du temps

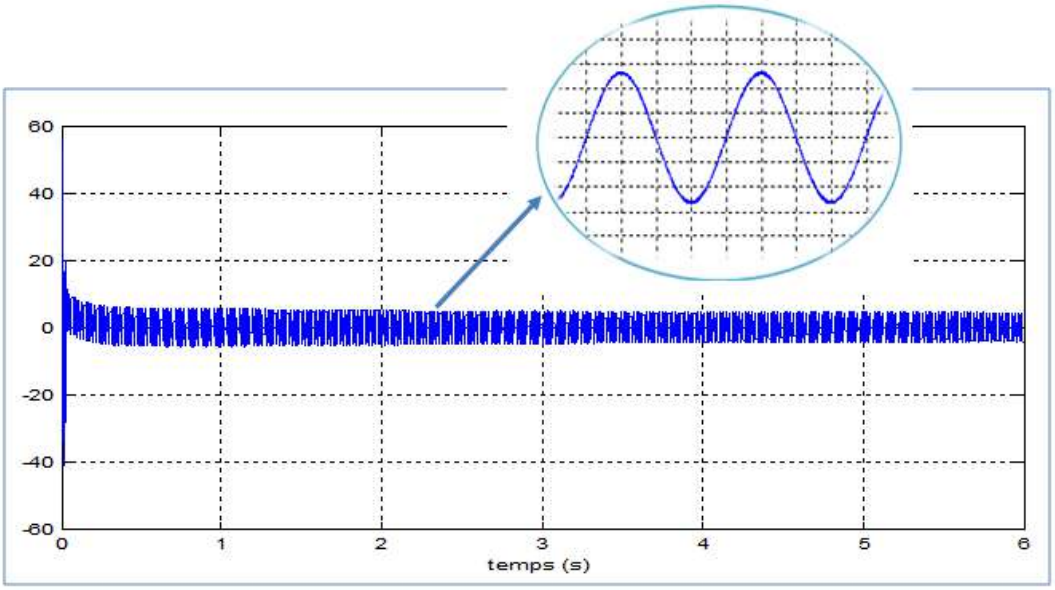


Figure IV.7 :la courbe du courant statorique en fonction du temps

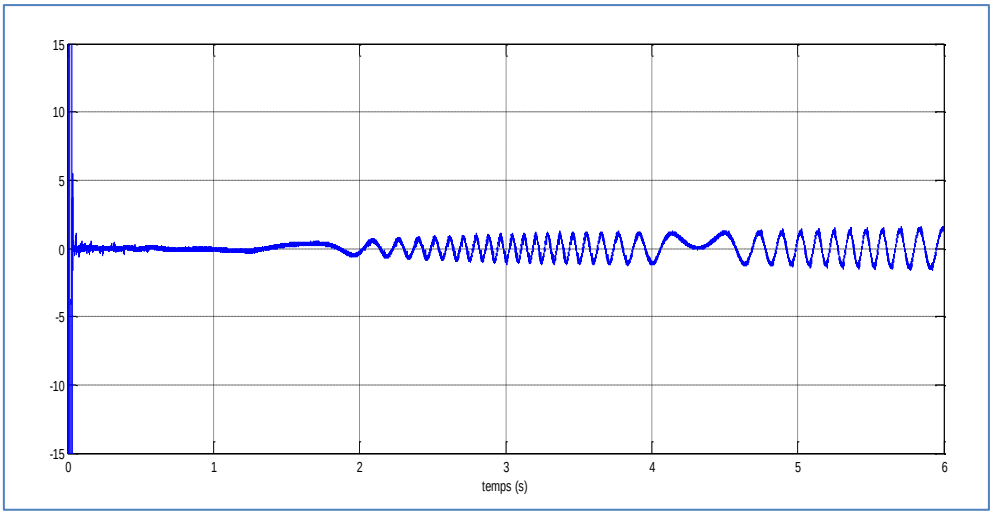


Figure IV.8 :la courbe du courant rotorique en fonction du temps

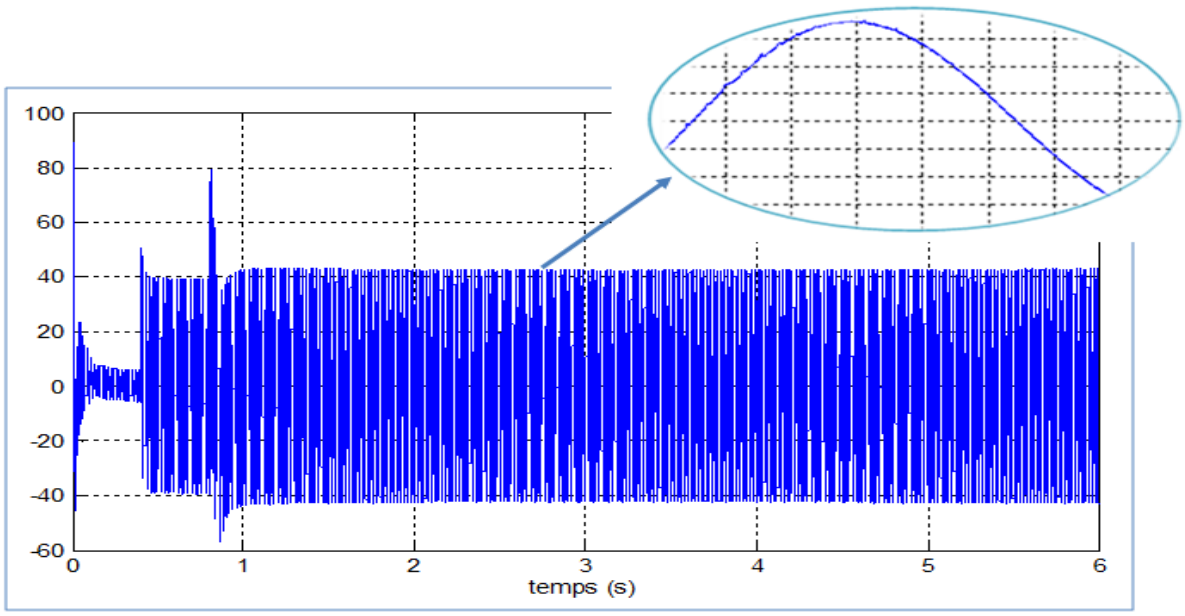


Figure VI.9 :la courbe du courant injecte au réseau en fonction du temps

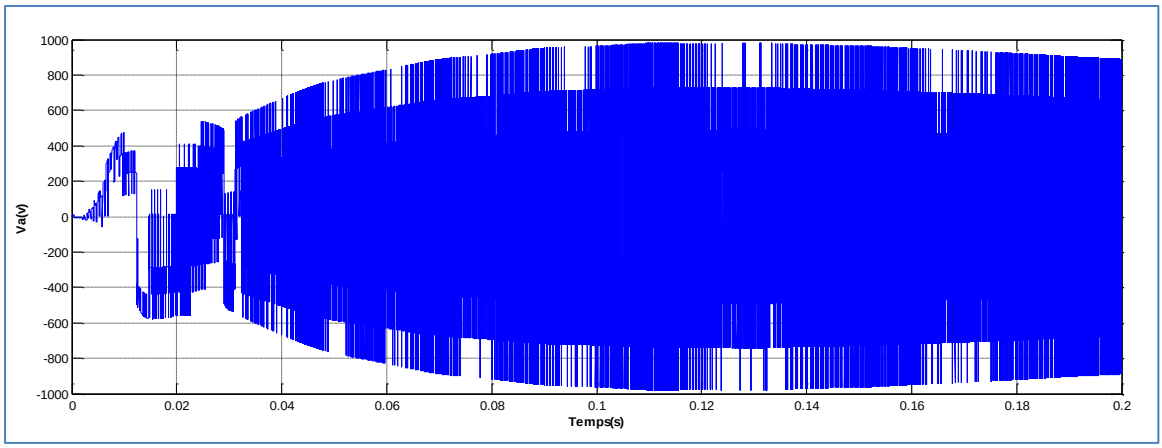


Figure IV.10 :la courbe de tension composée de l'onduleur en fonction du temps

- ***Analyse des résultats de simulation :***

La figure (I.2) montre l'évolution des puissances active et réactive au niveau du stator et elle montre que la valeur de la puissance réactive reste constante a 0 en fonction du temps, quand a la puissance active, elle varie, sa valeur est négative car notre MADA fonctionne en mode génératrice.

Selon les figures (IV.3) et(IV.4) ,qui montrent l'évolution des puissances active et réactive au niveau du rotor, la valeur de la puissance réactive est nulle ; quand a la puissance active, elle varie. Cette variation correspond a la variation du vent .

Les figures (IV.5) et(IV.6) montrent l'évolution de la puissance réactive et de la puissance active injectées au réseau en fonction du temps. La puissance réactive oscille autour du 0, quand a la puissance active, elle varie entre 1500 et -1500 w.

On remarque que la valeur du courant rotorique varie en fonction de la variation de la vitesse d'entrainement de la turbine, dont l'allure tant vers une allure sinusoïdale, comme le montre la figure (IV.7).

La figure (IV.8) représente la variation du courant statorique et montre que ce dernier varie légèrement en fonction du temps. Son allure nous montre qu'il et pollué.

D'après la figure (IV.9) ,qui montre l'évolution du courant injecté au réseau du système , on remarque qu'après un bref régime transitoire le courant varie de 42 à -42 A. En observant l'allure du courant injecté au réseau on constate qu'il n'est pas purement sinusoïdal et qu'il comporte donc des harmoniques.

La figure (IV.10) represente la tension simple,a la sortie de l'onduleur trois niveaux, en fonction du temps.Onremarque les différents niveaux de tension que peut prendre l'onduleur.

IV.3 le principe de fonctionnement du système éolien avec filtre actif parallèle

Dans cette deuxième partie nous allons associe deux sortes de filtre actif (filtre 2 niveaux ,filtre 3 niveaux) en parallèle avec le système éolien afin d'étudier les performances et juger de l'efficacité de chacun d'entre eux.
Le filtre a pour rôle de dépolluer le courant injecte au réseau.

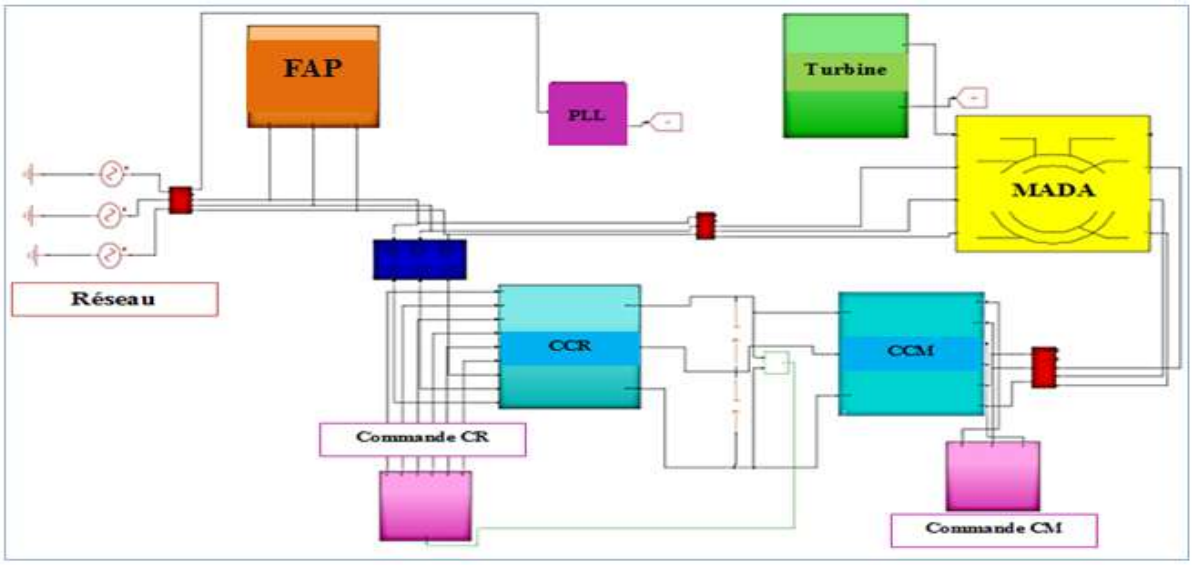
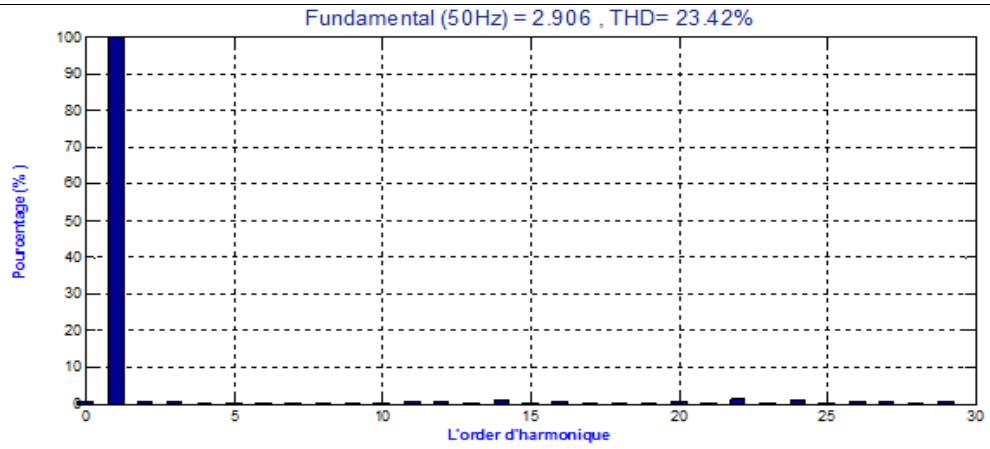


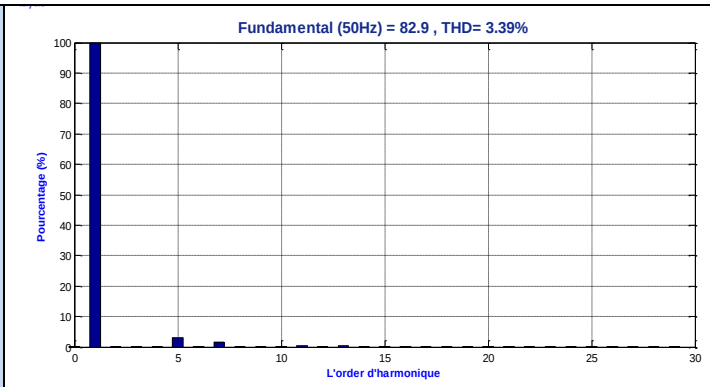
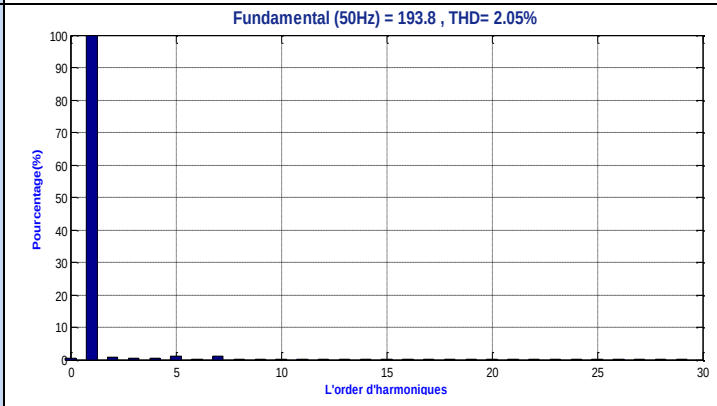
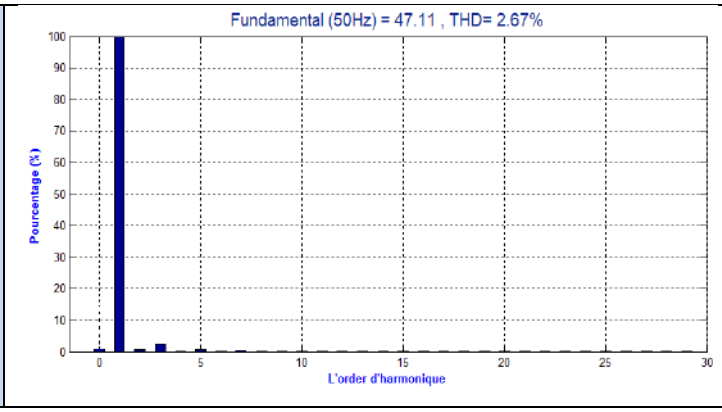
Figure IV.11 :le système éolien connecte au réseau avec filtre actif parallèle (2/3niveaux)

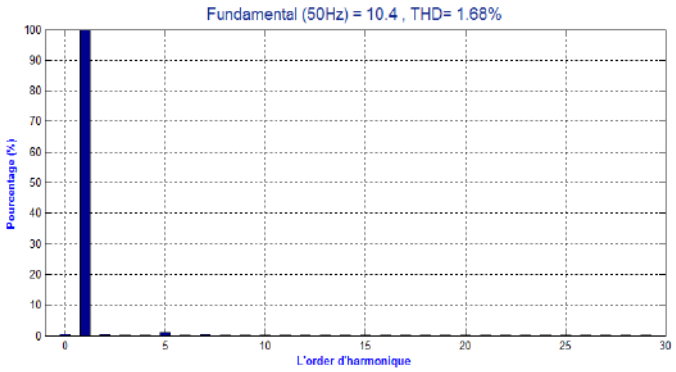
IV.3.1 les résultats de simulation

Afin de comparer les différentes performances des configurations étudiées dans le chapitre deux avec notre système éolien connecté au réseau ,nous allons étudier les taux d'harmoniques de distorsion pour chacune d'entre elles comme le montre le tableau VI.3 :

Tableau IV.3 : tableau comparatif des taux de distorsion du

Système Sans FAP	 Le système éolien étudié a un taux d'harmonique de distorsion est bien au-dessus des normes ce qui est inacceptable pour un système interconnecté avec le réseau donc un filtrage est indispensable.

<table>
<tr><td rowspan="3">FAP Avec 2niveaux</td><td>Avec source continue</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Avec condensateur</td><td>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">Grace à l'intégration d'un FAP deux niveaux au système en diminue considérablement le taux d'harmonique de distorsion et on respecte les normes en vigueur ce qui permets au système de pouvoir injecter au réseau. Le principe de fonctionnement du FAP le plus efficace est de l'alimenter à l'aide d'un bus continu.</td></tr>
<tr><td>FAP avec 3 niveaux</td><td>Avec source continue</td><td>
</td></tr>
</table>

	Avec condensateur	
	Les FAP trois niveaux sont plus efficaces que les FAP deux niveaux , et lorsque le FAP trois niveaux est alimenteepar un condensateur ses performances augmente encore plus.	

VI.4 résultats de simulation du système éolien avec filtre actif parallèle

Afin d'évaluer le comportement du système éolien avec FAP 3 niveaux alimente par un bus continu, on impose un profil du vent qui fera fonctionner la génératrice en mode Hyper synchrone et en mode hypo synchrone.On recueille les résultats suivants :

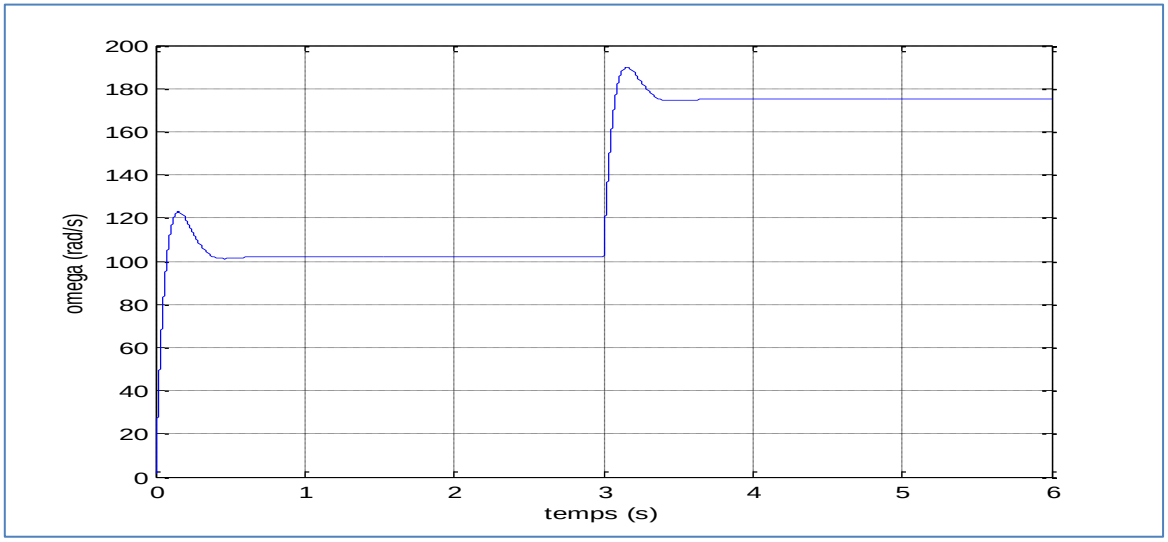


Figure IV.10 :la courbe de la vitesse de la turbine en fonction du temps

IV.4.1 les résultats de simulation

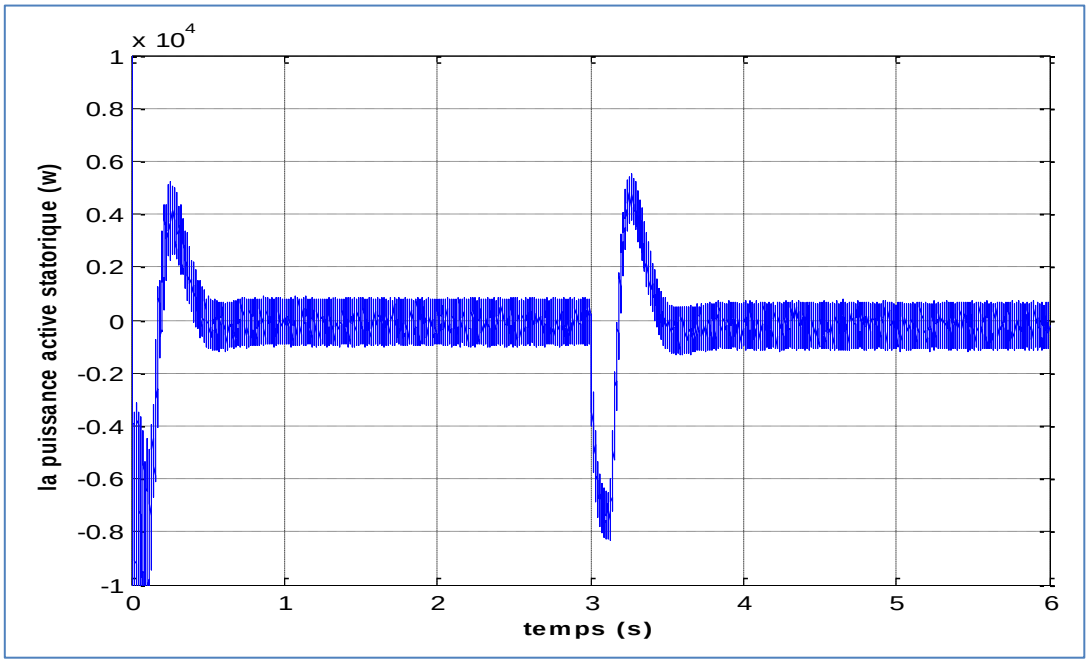


Figure IV.11 :la puissance active statorique en fonction du temps

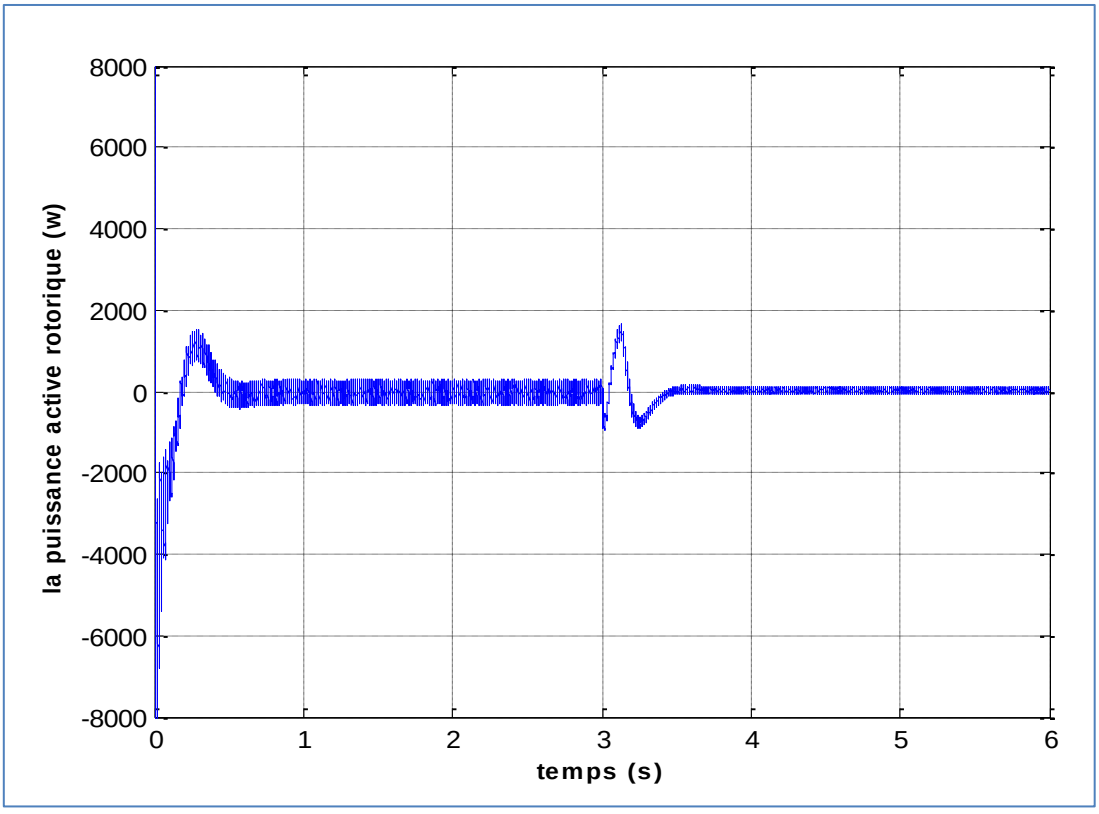


Figure IV.12 :la puissance active rotorique en fonction du temps

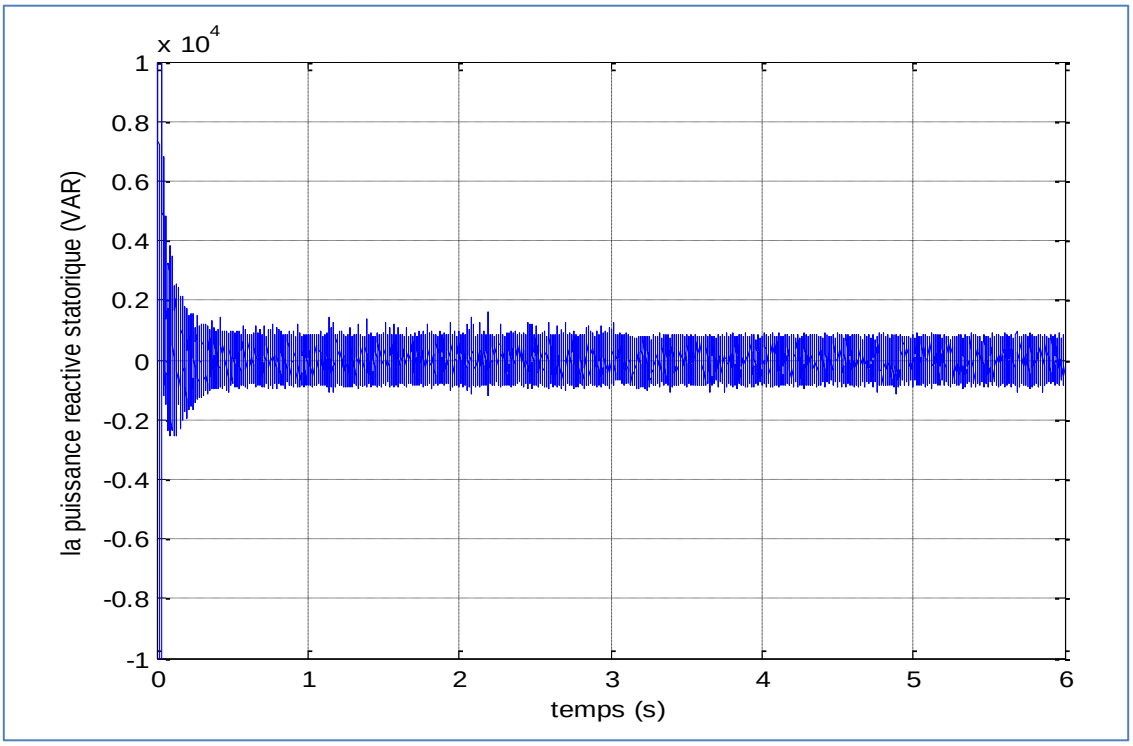


Figure IV.13 :la puissance réactive statorique en fonction du temps

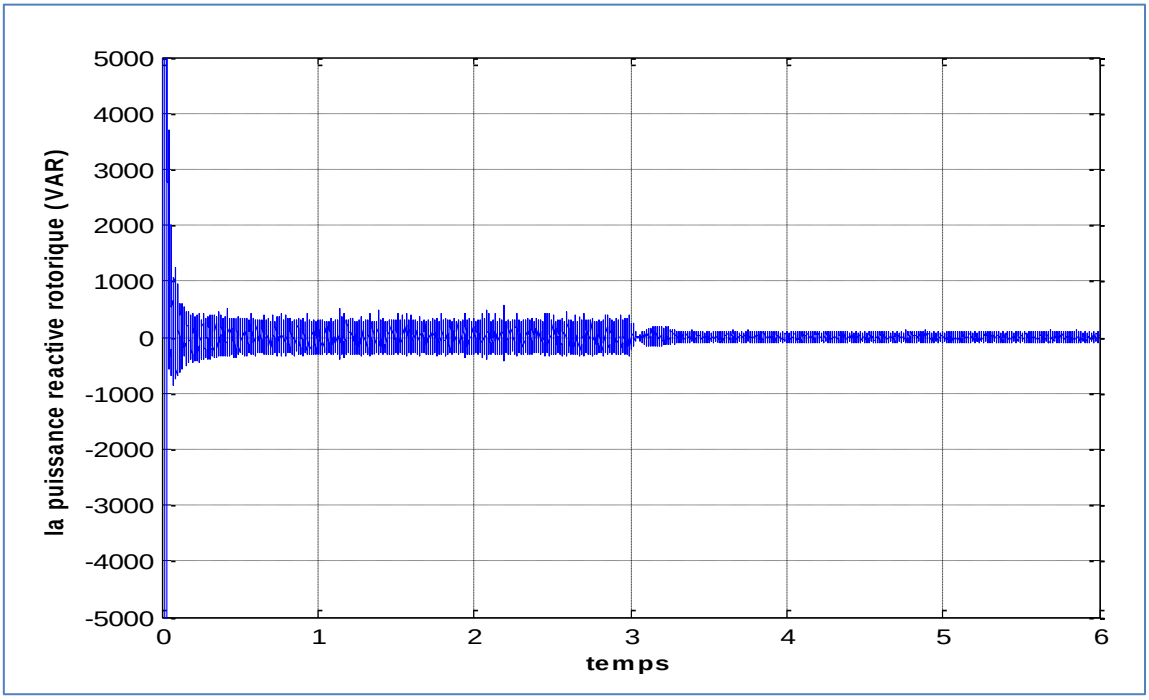


Figure IV.14 :la puissance réactive statorique en fonction du temps

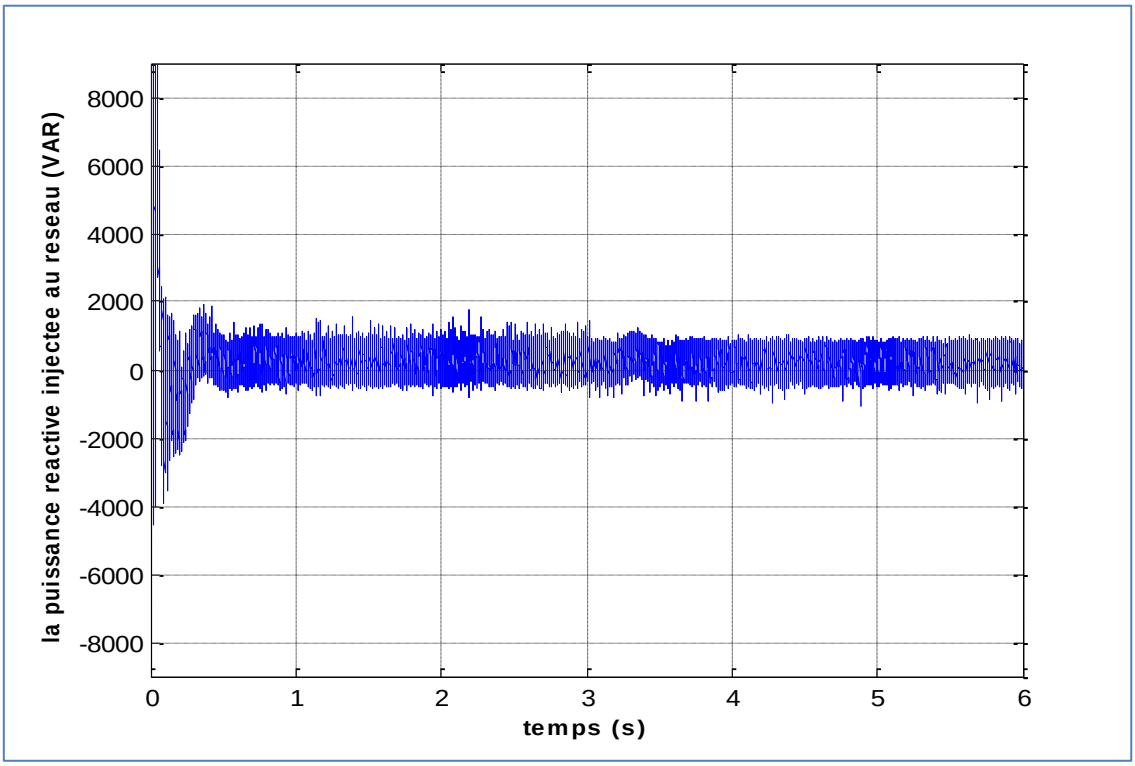


Figure IV.15 :la puissance réactive injectée au réseau en fonction du temps

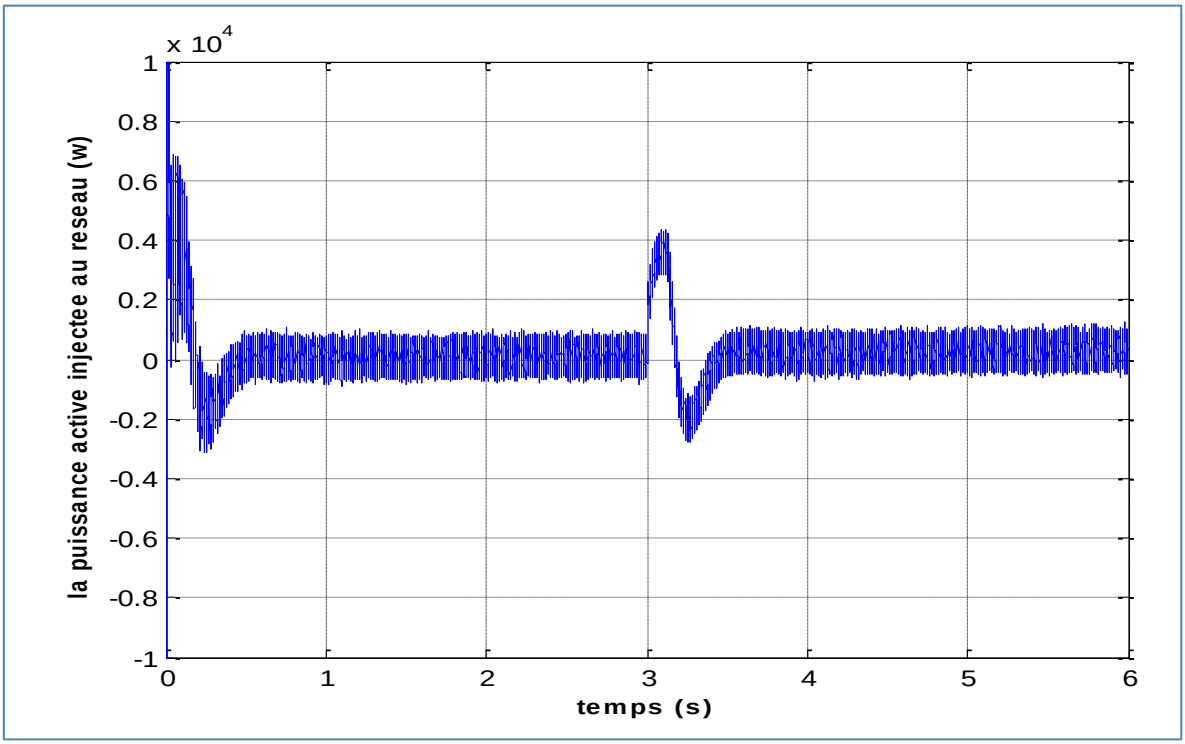


Figure IV.16 :la puissance active injectée au réseau en fonction du temps

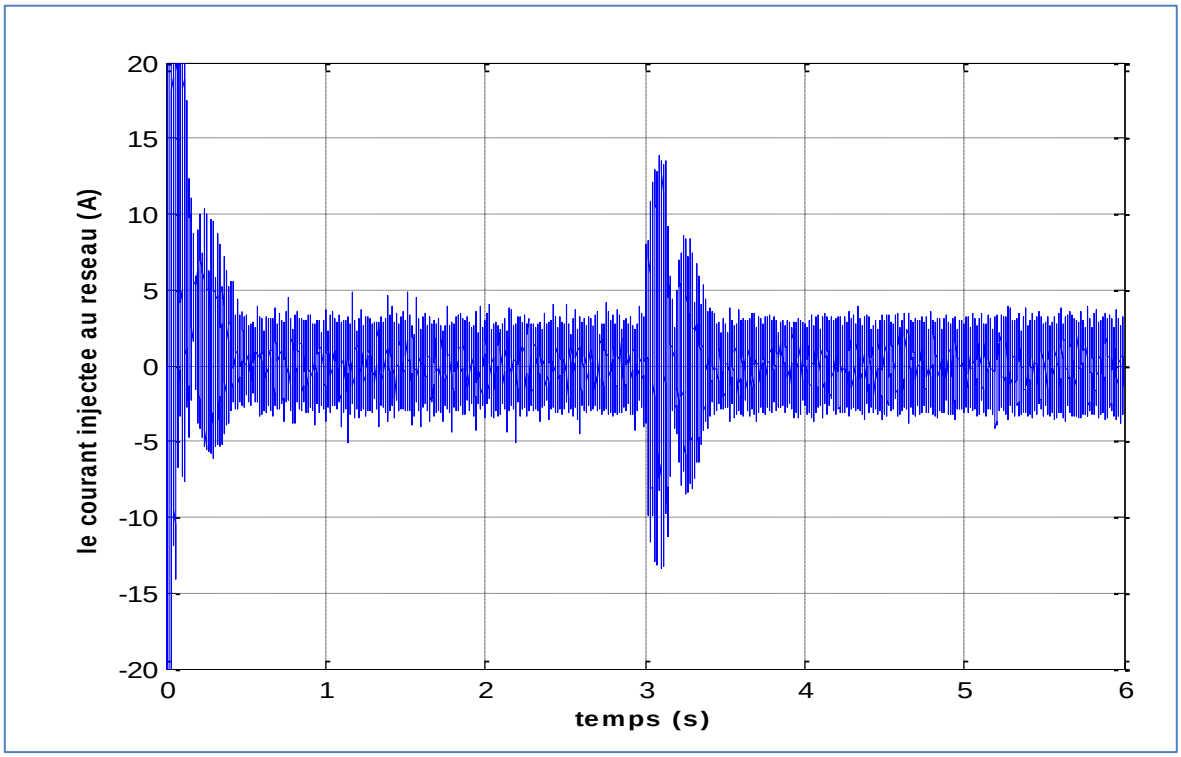


Figure IV.17 :le courant injecté au réseau en fonction du temps

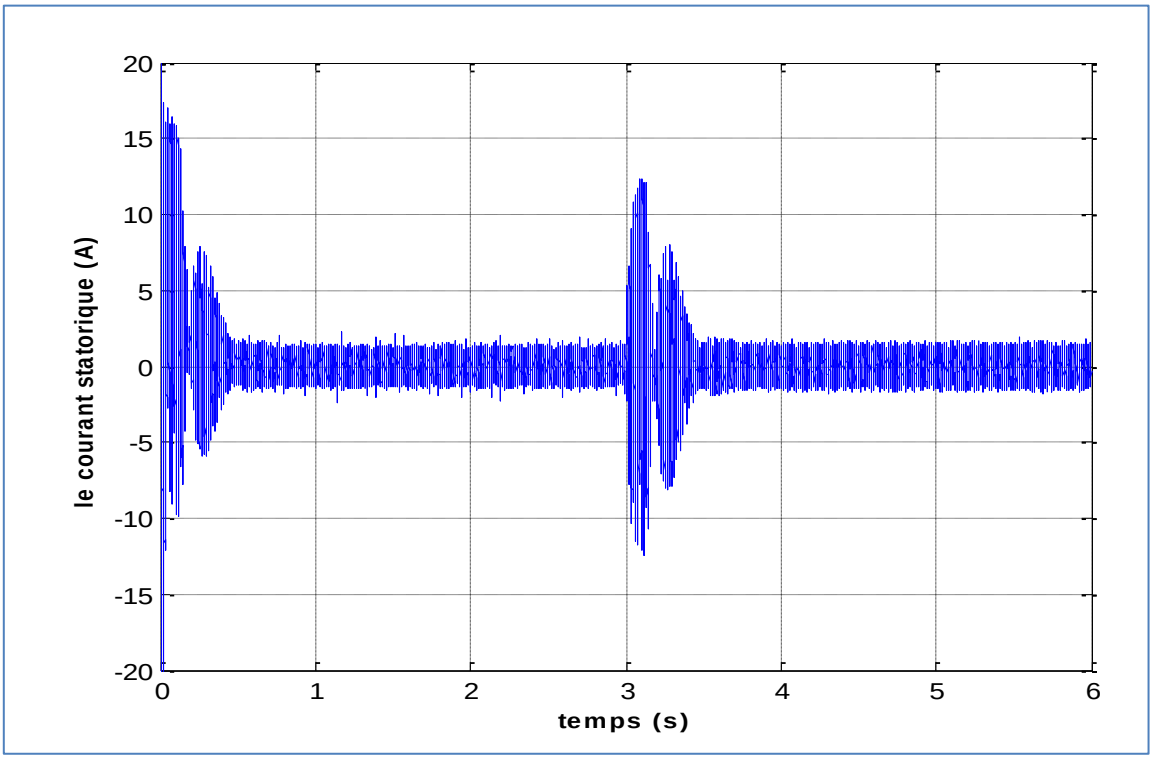


Figure IV.18 :le courant statorique en fonction du temps

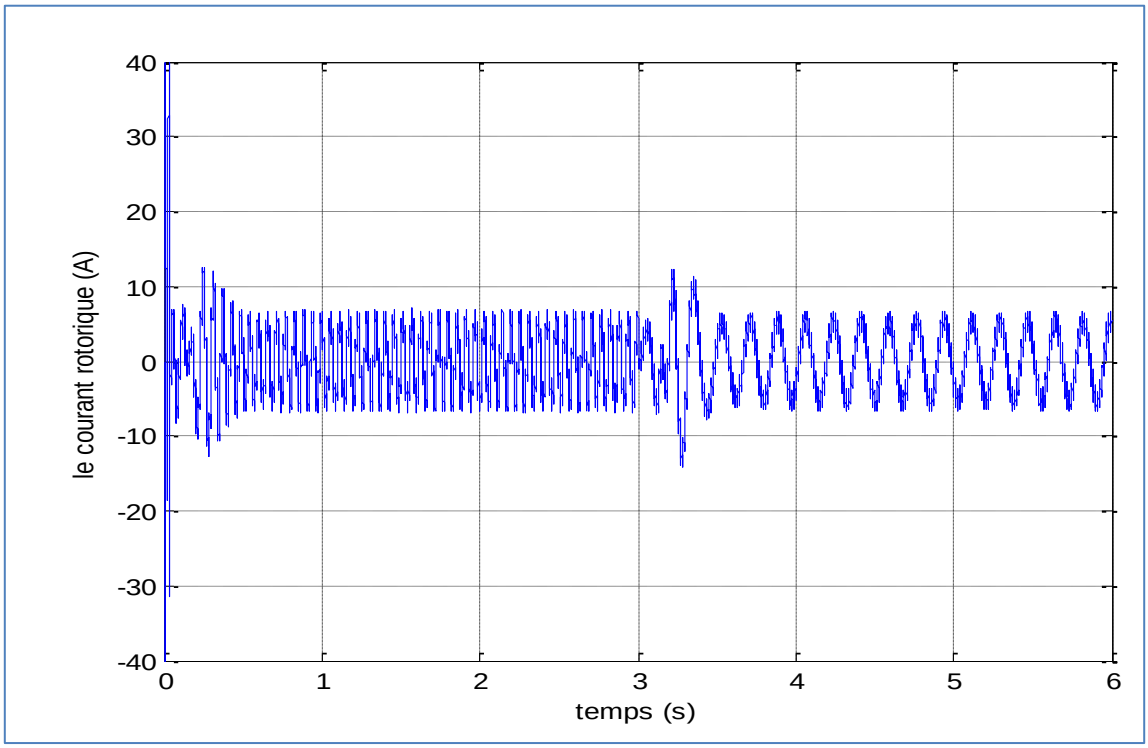


Figure IV.19 :le courant rotorique en fonction du temps

- ***Analyse des résultats de simulation :***

La figure (IV.10) montre l'évolution d'omegaqui s'échelonne entre 100rad /s a 180 rad /s.

Selon les figures (IV.13) (IV.14) et(IV.15) qui montrent l'évolution des puissances réactives au niveau du rotor du stator et celle injectée au réseau ;la valeur de la puissance réactive reste nulle .

On remarque que la valeur du courant rotorique varie en fonction de la variation de la vitesse d'entrainement de la turbine .Son allure est plus pulsatoirede 0 à 3s et puis devient moins pulsatoire et plus sinusoïdale comme le montre la figure (IV.19).

La figure (IV.18) représente la variation du courant statorique et la figure (IV.19) qui montre l'évolution du courant injecté au réseau montre que ces dernier varie légèrement en fonction du temps. Son allure nous montre qu'ilssontdépollués, donc le FAP a bien fonctionné.

Les figures (IV.11) (IV.12) et(IV.16) qui représentent toutes des puissances actives au niveau rotoriquestatorique et injecte au réseau qui ont toute la même allure après un régime transitoire elle reste constante jusqu 'a arriver a 3 s ou la vitesse de rotation de la turbine impose l'hyper

synchronisme a la MADA mais grâce au commende du système et au régulateur MPPT la puissance reprend sa valeur optimale .

a) Mode Hyper synchrone

Les mêmes variations de puissance réactive statorique ont été constatées pour ce mode de fonctionnement que pour le profil du vent précédent. Nous observons également le courant de phase rotorique qui suit parfaitement l'évolution de la vitesse d'entrainement.

b) Mode Hypo synchrone

La puissance réactive statorique varie de la même manière pour ce mode de fonctionnement que pour le profil du vent précédent. Nous observons également le courant de phase rotorique qui suit parfaitement l'évolution de la vitesse d'entrainement.

Les deux modes de fonctionnement sont donc validés, ainsi le contrôle indépendant des différentes puissances du système fonctionne .

IV. 5 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation du système comprennant le système éolienà base de la MADA, ses commandes ainsi que le filtre actif parallèle. En premier lieu, le système sans filtre a été étudie et il a été établis clairement à travers cette étude que la présence d'un filtre au sein du système était nécessaire.

Dans la suite de ce chapitre, nous avons donc centré notre étude sur la comparaison des performances d'un filtre passif parallèle deux niveaux et d'un filtre parallèle trois niveaux avec différents modes d'alimentation raccordés a notre système grâce a cela, on peut affirmer que le filtre actif parallèle trois niveaux alimenté a l'aide d'un bus continu ,est le plus efficace pour dépollué le système .

Enfin, afin de valider la modélisation du système éolien que l'on a étudié, nous avons effectué des simulations pour deux points de fonctionnements : l'un en mode hyposynchrone et l'autre en mode hypersynchrone. Les résultats obtenus ont montré que la puissance active fournie au réseau électrique est optimale quel que soit le mode de fonctionnement et que cette puissance est adaptee aux normes intenaionales en vigueur .Le filtre que nous avons mis au point permet de respecter la norme IEEE519.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de ce mémoire est de faire une analyse harmonique d'un réseauélectrique avec une production éolienne. On a effectué d'abord la modélisation des différents composants du système de production énergie et l'étude des différentssystèmes de contrôle de la machineasynchrone a double alimentation (MADA) qui est la plus utilisée pour ce mode de productiond'énergieélectrique, ensuite on a réalisé une étude comparative entre deux diffèrents types de filtres actifs parallèles.

Dans le premier chapitre (état de l'art), les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique ont été établis. Les différentes structures de conversion éolienne utilisant les machines électriques ont été présentées et analysées en termes d'avantages qu'elles offrent. La structure que nous avons utilisé est basée sur la machine asynchrone à double alimentation, elle présente le meilleur avantage en termes de production de puissance élevée, en fonctionnement à vitesse variable, tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques.

Le deuxième chapitre est axe sur la modélisation d'une éoliennefonctionnant a vitesse variable a base d'une MADA pilotée par le rotor. Le convertisseur fonctionne gracea une commande vectorielle.
Cote réseau, une commande par hystérésispermet de découpler le modèle de laMADA afin de contrôler l'échange des puissances active et réactive entre la machine et le réseau.

Poursimplifier le modèle de la machine, nous avons établi le modèle de la machine dans un système d'axebiphasé (d, q) lie au stator à l'aide de la transformation de PARK. Les résultats de simulation de lagénératrice asynchrone coupléea la turbine éolienne montrent un fort couplage entre la puissanceactive et la puissance réactive.

Le troisième chapitre a décrit la problématique que représententles harmoniques dans les installations électriquesainsi que les diffèrentss moyen employés pour dépolluer le réseau. En outre, afin de respect au mieux les normes en vigueurnous avons réalisé deux FAP différents et leurs avons imposé diffèrent mode de fonctionnement.

Dans le dernier chapitre nous avons observé et analyse le comportement de notre système sans filtrage et nous l'avons comparé avec le système comportant le filtre actif parallèle le plus efficace d'après l'étudeeffectuée. Ainsi nous avons pu nous assurer de la bonne qualité du réseau que nous avons génére grâce à l'éolienne qui injecte une puissance electriquea notre réseau.



ANNEXE

ANNEXE A:

N°	Stations de mesure	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
1	Adrar	5,98	6,42	6,76	7,00	7,19	6,28	6,81	6,33	6,14	5,95	5,94	5,61
2	Ain-Safra	2,26	2,63	2,97	3,28	3,24	2,80	2,40	2,54	2,39	2,10	2,05	2,17
3	Alger-Port	4,23	4,89	5,45	4,67	4,10	3,64	4,07	3,40	3,71	3,12	3,64	3,49
4	Annaba	3,92	3,89	3,78	3,70	3,61	3,73	3,85	3,83	3,63	3,35	3,69	3,86
5	Arzew	4,49	4,34	4,73	4,78	4,62	4,05	4,04	3,87	3,97	3,74	4,06	4,53
6	Batna	3,54	3,92	4,17	4,18	3,85	4,09	4,13	3,85	3,52	3,49	3,54	2,94
7	Borj Bou Arreridj	2,18	2,33	2,26	2,39	2,20	2,14	2,14	2,09	2,08	1,94	1,95	2,02
8	Bechar	2,61	3,25	4,19	4,94	5,17	4,50	4,29	4,02	3,87	3,31	2,98	2,59
9	Bejaia	3,62	3,41	3,22	3,00	2,85	2,94	2,97	2,92	2,88	3,11	3,41	3,78
10	Beni-Abbas	1,94	2,58	2,98	3,52	3,41	3,05	2,97	2,58	2,72	2,55	2,59	2,20
11	Beni-Saf	2,93	3,01	2,99	2,82	2,81	2,26	2,29	2,27	2,49	2,07	2,70	2,89
12	Biskra	4,27	4,29	5,22	5,60	5,68	4,33	3,73	3,82	3,94	3,38	4,04	3,94
13	Bordj Badji Mokhtar	5,56	4,72	5,31	5,70	5,22	5,34	5,94	5,78	5,49	4,11	3,23	3,82
14	Boussaada	3,89	3,66	4,35	4,39	4,19	3,26	2,56	2,56	2,69	2,04	3,20	3,64
15	Chlef	3,19	3,57	3,50	3,19	3,59	3,35	3,00	3,20	3,08	2,80	2,86	3,03
16	Constantine	2,67	2,79	2,52	2,56	2,35	2,43	2,40	2,39	2,06	2,03	2,42	2,57
17	Dar-El-Beida (Alger)	2,62	2,63	2,79	2,89	3,09	3,16	3,15	2,92	2,79	2,27	2,56	2,56
18	Djanet	2,69	2,89	3,56	4,17	4,12	4,10	4,58	4,10	3,56	3,14	2,33	2,07
19	Djelfa	4,27	4,75	5,04	5,53	5,05	4,68	4,40	4,33	4,18	4,41	4,57	4,52
20	El-Kala	3,74	5,03	4,03	4,20	3,71	3,60	3,06	3,03	3,31	3,77	3,70	4,09
21	El-Bayadh	2,60	2,91	3,31	3,71	3,47	3,28	3,02	2,96	2,81	2,65	2,63	2,63
22	El-Golea	3,04	3,80	4,06	4,69	5,01	4,48	3,82	3,49	3,94	3,34	2,96	2,92
23	El-Kheiter	2,80	3,47	3,85	4,47	4,44	3,67	3,29	2,84	3,17	2,90	3,05	3,29
24	El-Oued	2,29	2,63	3,34	3,85	4,01	3,63	3,33	3,14	2,92	2,16	1,93	2,25
25	Ghardaia	3,44	3,48	3,90	4,50	4,35	3,81	3,33	3,19	3,30	2,92	3,10	3,55
26	Ghazaouet	2,50	2,55	2,53	2,59	2,55	2,23	2,14	2,16	2,15	2,11	2,62	2,62
27	Hassi R'Mel	5,57	5,75	6,79	7,80	8,21	7,53	5,66	5,75	5,70	5,03	4,92	5,21
28	Hassi-Massaoud	2,78	3,46	4,10	4,41	4,88	4,25	3,53	3,57	4,04	3,29	2,96	2,91
29	Illizi	3,36	3,76	4,20	4,34	4,70	4,74	4,65	4,50	4,11	3,81	3,34	3,08
30	In-Amenas	3,84	4,29	4,66	5,04	5,67	5,23	4,73	4,84	4,71	4,35	4,08	3,84
31	In-Salah	4,69	5,01	5,17	5,81	6,02	5,75	5,71	5,49	4,88	4,44	4,05	3,97
32	in-Salah-North	4,79	4,98	5,14	5,79	6,16	5,72	5,78	5,56	4,99	4,45	4,12	4,10
33	Jijel-Achouat	2,63	2,79	2,90	2,68	2,58	2,62	2,72	2,69	2,54	2,15	2,52	2,68
34	Jijel-Port	4,08	4,57	4,26	3,82	3,51	3,36	3,34	3,35	3,43	2,96	3,70	3,88
35	Kasr-Chellala	3,37	4,07	4,05	4,04	3,73	3,37	2,58	3,08	2,70	2,50	3,67	3,50
36	Laghouat	3,05	3,56	3,85	4,70	4,28	3,92	3,38	3,29	2,97	2,62	2,82	3,11
37	Maghnia	2,03	2,31	2,23	2,06	2,15	1,81	1,57	1,51	1,62	1,48	1,72	2,31
38	Mascara-Ghriss	2,41	2,53	2,23	2,31	2,68	2,44	2,32	2,16	2,23	2,23	2,59	2,71
39	Mechria	4,70	5,12	5,32	5,64	5,57	5,03	4,73	4,61	4,72	4,44	4,61	5,03
40	Médea	2,93	3,34	3,24	3,38	3,15	3,09	2,63	2,75	2,71	2,82	3,07	3,16
41	Milliana	2,43	2,69	3,08	3,29	3,59	3,62	3,29	3,14	3,01	2,42	2,22	2,28
42	Mostaganem	1,96	2,21	2,31	2,49	2,53	2,34	1,93	2,00	1,89	1,75	1,78	2,01
43	Msila	4,12	4,31	4,97	4,70	5,14	3,97	3,48	3,24	3,69	3,10	3,73	4,22
44	Naama	3,49	4,19	4,70	4,43	4,72	3,59	3,88	3,30	3,18	3,12	3,51	4,17
45	Oran-Senia	2,90	3,07	3,51	3,80	4,06	3,93	3,74	3,49	3,25	2,90	2,83	2,82

46	Oran-Port	5,06	4,74	4,93	4,33	4,86	4,20	4,22	3,74	3,98	3,72	4,01	4,13
47	Oum-El-Bouagui	2,87	3,82	3,64	3,64	3,33	3,48	3,20	2,94	2,89	3,02	3,19	3,28
48	Ourgla	2,87	3,36	4,01	4,38	4,92	4,77	3,97	4,02	4,17	3,32	2,75	2,73
49	Saïda	3,04	3,34	3,30	3,33	3,24	3,17	2,96	2,96	2,68	2,76	3,11	3,18
50	Sétif	3,79	4,04	4,06	4,14	3,89	3,94	3,71	3,75	3,57	3,48	3,90	3,66
51	Sidi-Belabes	1,92	2,65	2,93	3,03	3,15	2,92	2,71	2,63	2,59	2,32	2,35	2,43
52	Skikda	3,81	3,48	3,38	3,10	2,92	3,09	2,96	3,04	3,02	3,14	3,69	4,08
53	Souk-Ahras	3,68	4,12	4,05	3,84	3,26	3,35	3,24	3,38	3,32	2,94	3,56	3,54
54	Tafraoui	2,93	3,60	3,99	3,81	4,09	3,88	3,55	3,38	3,19	2,95	3,53	3,25
55	Tamanrasset	3,10	3,44	3,78	4,15	4,33	4,11	4,42	3,87	3,70	3,41	2,70	2,54
56	Tamanrasset-Aguenna	3,20	3,40	3,81	4,11	4,41	4,20	4,49	3,99	3,84	3,47	2,89	2,68
57	Tebessa	3,14	3,67	3,74	3,89	3,55	3,18	3,05	2,94	2,81	2,66	3,08	3,32
58	Tiaret	4,40	4,28	4,30	4,18	3,87	3,62	3,45	3,43	3,25	3,75	4,62	4,63
59	Timimoun	4,19	5,11	5,15	5,72	6,26	5,12	5,27	4,90	5,07	4,47	4,01	3,76
60	Tindouf	4,65	5,39	5,74	6,92	7,34	6,99	5,65	5,77	6,32	4,82	4,54	4,18
61	Tizi-Ouzou	1,16	1,43	1,69	1,75	1,68	2,25	2,38	2,13	1,60	1,21	1,08	1,09
62	Tlemcen-Zénata	2,05	1,92	1,90	2,07	2,37	2,23	2,21	2,06	1,81	1,75	1,90	1,97
63	Touggourt	2,74	2,93	3,58	3,86	4,08	3,50	3,15	3,10	2,84	2,64	2,52	2,60

[20]

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1] **Zohra BENHACHANI «Elaboration D'un Modèle De Dimensionnement D'un Système Hybride (Solaire-Eolien) Alimentant Une Ferme Dans La Région Des Aurès »** Magister Université Hadj Lakhdar – Batna 2011-2012.

[2] **F. KENDOULI*, K. NABTI, K. ABED ET H. BENALLA«Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation»** Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC'Département d'électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie 2011.

[3] **Dr.Dhaker ABBES «Optimisation et supervision des systèmes énergétiques complexes intégrant des sources renouvelables»**École d'été Franco-Roumaine Commande Avancée des Systèmes & Nouvelles Technologies Informatiques – 2014.

[4] **Ludmil STOYANOV « Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelables»** Doctorat Université Technique De Sofia 2011-2012.

[5] **Nourredine ZIDANE «Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Energies Renouvelables»** Magister Université Ferhat Abbas Setif 2014-2015

[6] **Soumia HAMZA «Conception par la CAO des parties fixes d'une éolienne et les solutions technologiques de liaisons de l'installation.»** magister Université Mohamed Khider – Biskra

[7] **Omar FEDDAOUI «Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : application aux Energies Renouvelables»** Magister Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras 2013-2014.

[8] **Samir GASSAB «Modélisation d'une centrale à énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne. »** Magister Université Ferhat Abbas – Setif 2011-2012

[9] **MahieddineHACIL«Amélioration des Performances des Energies Eoliennes»** Doctorat UniversitéMentouriConstantine 2012-2013.

[10] **Fouzia BRIHMAT «L'étude conceptuelle de puissance pour une centrale hybride PV/éolien »** Magister L'université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2012-2013

[11] **Cherif Bennour «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation»** Magister Université Mohamed Khider – Biskra 2012-2013

[12] **Miguel LOPEZ «Contribution a l'optimisation d'un Système de conversion éolien pour uneUnité de production isolée»**Doctorat Université De Paris Sud 2008-2009.

[13] **Arnaud BOYATTE «contrôle –commande d'un générateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne»**Doctorat université Henri Poincare Nancy I 2006-2007

[14] **Frédéric POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne»** Doctorat L'université De Nantes 2003-2004

[15] **Abdelhakim DEDOUGA«Contrôle des puissances active et réactive de machine adouble alimentation (DFIM) »** Magister Université Hadj Lakhdar – Batna 2010-2011.

[16] **Brice BELTRAN« Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double a alimentation :Du mode glissant classique au mode glissant d'ordresupérieur»**Doctorat Université De Bretagne Occidentale 2011-2012.

[17] **Arnaud GAILLARD «Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service»**Doctorat l'Université Henri Poincaré, Nancy-I 2010-2011

[18] **Abdelhafidh MOUALDIA « Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne »**Doctorat Ecole Nationale Polytechnique 2014

[19] **Sidi MohammedBOUDIA «Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien parSimulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas desVents en Algérie»**Doctorat Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd2013

[20] **Sidi Mohammed Boudiaa, AbdelhalimBenmansourb,Mohammed Abdellatif TabetHellal«Windresourceassessment in Algeria»**Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, Algérie 2016.

[21] **Revue Environnement &technologies«Paris 2015 plein cap vers la COP21»** octobre2015.

[22] **Revue Global Wind Energy Council«Global Wind Statistics 2015»**2016

[23] **Tarak GHENNAM«Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans lagestion d'un réseau électrique,Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage deséoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation»**Doctorat Ecole Militaire Polytechnique d'AlgerEcole Centrale de Lille 2011

[24] **MAHBOUB Mohamed abdelbasset«Modélisation et commande d'un system éolien à baseD'une génératrice double alimentée sans balais»**MagisterUniversite Ferhat Abbas Setif 2012

[25] **Mouloud BOUARKI«Etude d'un entrainement adouble alimentation pour une turbine éolienne a double alimentation :applique sur un site à TINDOUF»**Magister Université De M'hamedBougaraBoumerdes 2011-2012.

[26] **Abderrezzaq BOUHARCHOUCHE «Etude et commande d'un système de production hybride éolien photovoltaïque »**Magister Ecole Militaire Polytechnique2013.

[27] **Sanae Rechka«Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de ditribution»**MagisterL'université Du Québec A Trois-Rivières2002.

[28] **DjamelNEKKAR «Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés»**MagisterUniversité Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras 2013-2014

[29] **MesbahiNADHIR«Contribution à l'Etude des Performances desOnduleursMultiniveaux sur les Réseaux deDistribution»** Doctorat UniversitéBadji Mokhtar Annaba 2014

[30] **Abdelmadjid CHAOUI«Filtrage Actif Triphasé Pour Charges Non Lineaires»**Magister L'université De Ferhat Abbas De Sétif 2010.

[31] **Kuldeep Kumar Srivastava, SaquibShakil, AnandVardhanPandey «Harmonics & Its Mitigation Technique by Passive Shunt Filter»**International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)May 2013

[32] **HindDJEGHLOUD«Filtrage Actif De Puissance»**UniversitéMentouri Constantine 2007

[33] **SalimCHENNAI «Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle»**MagisterUniversité Mohamed KhiderBiskra2013

[34] **BoubakeurROUABAH«Commande d'un Convertisseur Multicellulaire Pour uneApplication de Filtrage Actif»**MagisterUniversité Ferhat Abbas Setif1 2012

[35] **Abdeslem SAHLI «Filtrage Actif Et Contrôle De Puissances :Application Aux Systèmes Photovoltaïques Interconnectes Au Réseau».** Magister Université Ferhat Abbas Setif 2012.

[36] **Noureddine HAMOUDA«Etude Comparative des Techniques de Filtragedes Harmoniques de Courant»**MagisterUniversité Ferhat Abbas Setif 2010

[37] **Amar OMEIRI«Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant»**Doctorat Université Badji Mokhtar Annaba 2007

[38] **A.MORSLI ,A.TLEMCANI M.S BOUCHRIT ET N.OULDCHERCHALI«dépollution des réseauxélectriques basse tension en utilisent un filtre actif parallèle a deux niveaux contrôle par l'algorithme P.Q. »**Mediamira Science Publisher 2012

[39] **WafaHIBER«Analyse Harmonique Dans Un Réseau Electrique Avec Une Production D'énergie Eolienne»** MagisterUniversité Setif1 2013

[40] **Abdelaziz BOUGHERBAL «Etude d''une MPPT d''une éolienne»**Magister A L'universite Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene. alger 2010

[41] **T. Abdelkrim, E.M. Berkouk,K. Aliouane, K. Benamrane et T. Benslimane«Etude et réalisation d'un onduleur à troisniveaux commandé par MLI vectorielle»**Revue des Energies Renouvelables2011.

[42] **Yacine DAILI «contrôle de la fréquence de commutation des hystérésis utilises dans la commande d'une machine à induction »**Magister Université Hadj Lakhdar Batna 2007

[43] **MAZOUZ FARIDA«Commande d'un système éolien à base d'ungénérateur synchrone à aimants permanents»**MagisterUniversité Hadj Lakhdar Batna 2013